

---

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

---

УДК 004.42.621.659

А.Ф. Колчин, С.В. Сумароков  
A.F. Kolchin, S.V. Sumarokov

## Цифровизация и управление жизненным циклом продукции машиностроения

## Digitalization and life cycle management of engineering products

*Данная статья посвящена восьмидесятилетию со дня рождения выдающегося ученого и педагога Юрия Михайловича Соломенцева, а также его вкладу в становление МГТУ «СТАНКИН» флагманом автоматизации станкостроения. Особенностью работы является развитие идей Ю.М. Соломенцева его последователями в области автоматизации и управления жизненным циклом сложных наукоемких изделий.*

*This article is dedicated to the 80th anniversary of the outstanding scientist and mentor Yuri Mikhailovich Solomentsev and to his contribution to the making MSTU «STANKIN» the leader of automatization in machine-tool industry. The article discusses the development of his ideas in the field of automatization and life cycle management of complex high-tech products by the followers.*

**Ключевые слова:** жизненный цикл продукции, машиностроение, Индустрия 4.0, автоматизация производства, МГТУ СТАНКИН, ООО «Корпоративные электронные системы».

**Keywords:** product life cycle, engineering, Industry 4.0, automation of production, MSTU STANKIN, «Corporativnyye elektronnyye systemy» LLC.

В процессе формирования в СТАНКИНе под руководством Ю.М. Соломенцева нового направления — автоматизация проектирования в станкостроении — в университете было сформировано большое количество активно работающих творческих коллективов, многие из которых, отделившись от него, продолжают свою деятельность и сегодня, развивая и реализуя идеи своего Учителя. Авторы настоящей работы, разное время проработавшие с Ю.М. Соломенцевым, представляют собой один из них (ООО «Корпоративные электронные системы»). В круг наших интересов входят исследования в области технологии управления жизненным циклом сложных технических объектов, информационные системы управления жизненным циклом (PLM-системы; PLM — Product Lifecycle Management) и методология внедрения этих систем на промышленных предприятиях. Мы также активно ведем исследова-

ния по применению различных компонентов PLM-систем и их интеграции между собой для построения единого информационного пространства предприятия, в частности:

- систем автоматизированного проектирования (САПР; CAD — Computer Aided Design);
- систем управления данными об изделии (PDM — Product Data Management);
- систем управления расчетными данными (SPDM — Simulation Process and Data Management);
- систем оперативного управления производством (MES — Manufacturing Execution System);
- систем мониторинга оборудования (MDC — Manufacturing Data Collection);
- систем управления активами предприятия, в том числе техническим обслуживанием и ремонтом оборудования (EAM — Enterprise Asset Management).

**Основные принципы технологий цифровизации и управления жизненным циклом**

Любая современная организация, имеющая дело со сложной наукоемкой продукцией (будь то продукция машиностроения или программное обеспечение), неизменно сталкивается с одними и теми же условиями своей деятельности: необходимо обеспечивать требуемое заказчиками качество своей продукции, соблюдая при этом сроки разработки и поставки, стоимостные ограничения на разработку и производство продукции и дополнительные требования к продукции и процессам ее жизненного цикла от различных регулирующих органов. К числу ключевых параметров качества относятся, например, функциональность, эргономичность, габаритно-массовые характеристики, отказоустойчивость, ремонтпригодность, а также такие экономические характеристики, как цена и общая стоимость владения продукцией.

Общемировая тенденция в области наукоемкой продукции состоит в постоянном повышении сложности изделий при одновременном сокращении сроков их разработки и постановки на производство и увеличении количества требований как со стороны заказчиков, так и со стороны регулирующих органов, в то время как финансовые ресурсы на выполнение проектов во все времена были ограничены. В этих условиях естественным ответом, позволяющим предприятию все-таки соблюсти требования по качеству, срокам и стоимости, является переход к такой организации своей работы, при которой контроль степени соблюдения этих ключевых параметров должен осуществляться на постоянной

основе после выполнения каждого этапа работы над продукцией. Таким образом, в самом начале жизненного цикла необходимо разработать и формализовать набор требований к продукции, после чего контролировать степень соблюдения этих требований: после проведения НИР, разработки конструкторской документации, выполнения проектных работ, разработки технологии производства, изготовления и испытания опытного образца и т.д. При этом каждое требование описывается в виде характеристики и допустимого интервала ее значений, а также способов расчета значения характеристики и ограничений по применяемым для этого расчетным системам или условиям проведения экспериментов (см. рис. 1).

Такой подход требует постоянной работы с большими массивами информации об изделии, процессах его жизненного цикла и о производственной и эксплуатационной среде изделия. Превалирующие в настоящее время подходы к управлению информацией сводятся либо к главенству «бумажного» представления информации и использованию компьютерных систем в качестве средства создания бумажного документа, либо к применению отдельных информационных систем, которые также не позволяют решать поставленные задачи. Ключевыми недостатками «бумажного» подхода является физическая невозможность для человека обработать такие большие массивы информации, и, кроме того, некоторые данные об изделии могут быть представлены только в электронном виде и никак иначе (например, 3D-модели). Недостатками существующих на предприятиях информационных систем чаще всего являются разбросанность данных по разным систе-

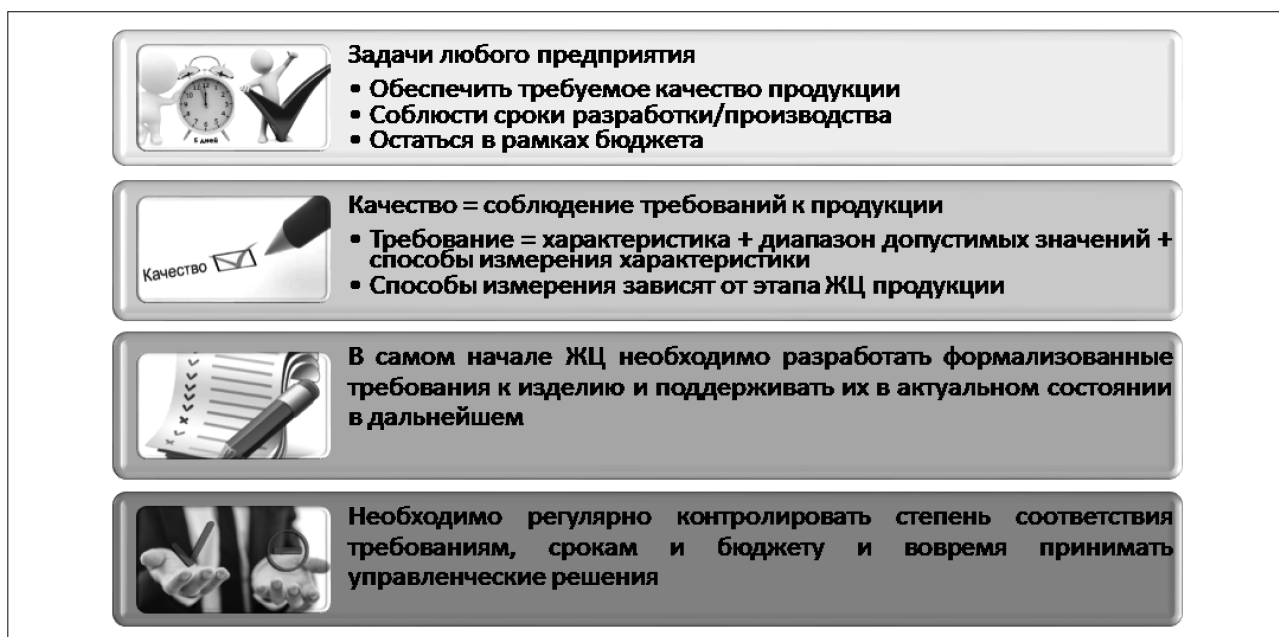


Рис. 1. Подходы к управлению требованиями

мам, хранение одних и тех же данных в разных системах (что приводит к неизбежному появлению противоречий между ними) или неполноте построенных электронных информационных моделей. Любой из перечисленных вариантов управления данными не позволяет в полной мере решать задачи по постоянному контролю соблюдения требований к изделию, сроков и стоимости работ в силу невозможности быстро и качественно собрать нужную для принятия решения информацию, которая была бы полной, непротиворечивой и отражала бы реальную картину. К тому же, описанные выше процессы работы с данными сами создают заметные стоимостные и временные издержки, влияющие на экономику проекта, а некачественные данные могут стать источником снижения качества самого изделия, например, привести к появлению брака в производстве.

Цифровизация деятельности предприятия является неизбежным способом решения обозначенных проблем. Речь идет о создании и использовании в деятельности организации так называемых «цифровых прототипов» изделий, процессов жизненного цикла, производственной и эксплуатационной среды изделий, а также об организации деятельности предприятий в соответствии с концепцией «Индустрии 4.0». Цифровой прототип представляет собой максимально полное электронное описание изделия/процесса/среды, причем информация в нем является структурированной, связанной и взаимосогласованной. Идея применения цифрового прототи-

па на этапах проектирования и разработки изделия, а также разработки процессов его производства и эксплуатации проста. Перед тем как переходить к физическому изготовлению изделия или его эксплуатации, необходимо построить его компьютерную модель и провести на ней максимально возможный комплекс расчетов для определения степени соблюдения требований к изделию, а также стоимостных и временных параметров производства и эксплуатации. По итогам такого анализа обязательно будут выявлены ошибки и возможности для оптимизации, которые в противном случае проявились бы на более поздних этапах жизненного цикла. Примерами являются: анализ изделия на собираемость и соответствие геометрических размеров, прочностные, тепловые, вибрационные расчеты, моделирование производственной, логистической и эксплуатационной среды. Все это полностью согласуется с обозначенной ранее идеей постоянного контроля за соблюдением требований, сроков и стоимостных характеристик изделий. Безусловно, современные предприятия уже сейчас частично проводят такие испытания; разница состоит в том, что теперь для испытаний предлагается использовать логически единый цифровой прототип. Другой важной особенностью цифрового прототипа является его легитимность как единственного источника информации, причем представлена эта информация исключительно в электронном виде. Структура информации цифрового прототипа показана на рис. 2.



Рис. 2. Структура конструкторской информационной модели (часть цифрового прототипа изделия)



Рис. 3. Основные тренды Индустрии 4.0

Что касается этапов производства и эксплуатации, то здесь речь идет об организации сбора информации об изделии и окружающих его объектах при помощи разнообразных датчиков и аккумуляции собранных данных в цифровой прототип (прежде всего, данных о ходе производства изделия, параметрах его эксплуатации, обслуживания и ремонта). С одной стороны, это обеспечит разработчику и изготовителю возможность обратной связи, помогающей им улучшать свои изделия. С другой стороны, анализ параметров изделия в процессе эксплуатации позволит перейти к обслуживанию и ремонту «по состоянию», а не «по регламенту», что является более эффективным. Кроме того, подобный подход в рамках идеологии «Индустрии 4.0», тренды которой показаны на рис. 3, открывает путь к построению так называемых «киберфизических систем», являющихся основой четвертой промышленной революции и позволяющих выполнять сложные производственные и эксплуатационные процессы практически без участия человека, что экономит ресурсы и позволяет избежать влияния пресловутого «человеческого фактора». Помимо исключения человека из производственного процесса как «рабочих рук», такие системы берут на себя и оперативное управление процессом.

Киберфизическая система представляет собой совокупность датчиков, изделий, оборудования и информационно-управляющих систем, взаимодействующих между собой по стандартным правилам без участия человека. Примером такой системы являются «безлюдные» заводы, строительство которых с каждым годом растет. В киберфизической системе все элементы взаимодействуют между собой для

достижения заранее заданного результата (скажем, производства изделия), а информационно-управляющие системы организуют управление этим процессом, собирая информацию с датчиков и выдавая управляющие воздействия на исполнительные механизмы. Киберфизическая система и все входящие в нее компоненты должны быть «умными», т.е. обладать возможностью адаптации к изменяющимся внешним условиям (изменение производственной программы, корректировка конструкции изделия, форс-мажорные факторы, например, выход из строя оборудования и т.п.). При этом подобные системы опираются в своей работе на постоянно дополняемые цифровые прототипы изготавливаемых изделий, промышленного оборудования и других значимых элементов окружающей среды. То же самое справедливо и для этапов эксплуатации изделий.

#### Информационные системы управления жизненным циклом

Для организации деятельности предприятия с применением технологии цифровых прототипов необходимо создание соответствующей информационной системы — системы управления жизненным циклом продукции (PLM-системы), основанной на технологии цифровых прототипов. Такая система должна использовать все имеющиеся на настоящий момент возможности программных платформ для управления жизненным циклом, но при этом идеологически должна быть построена с упором на цифровой прототип и решение упомянутых выше задач обеспечения требуемого качества, сроков и стоимости продукции. Система должна учитывать органи-

зационную структуру предприятия и ее внешнее окружение, быть распределенной, чтобы обеспечить совместную работу всех филиалов и удаленных площадок, а также способной организовать качественное информационное взаимодействие с подрядчиками и заказчиками предприятия. Программная архитектура системы управления жизненным циклом продукции на основе технологии цифровых прототипов представлена на рис. 4.

PLM-систему недостаточно просто установить на рабочих местах и научить сотрудников использовать ее функциональность — ее необходимо внедрять. Причина в том, что PLM-система представляет собой инструмент организации работы, который необходимо настраивать под те рабочие процедуры, которые приняты на предприятии. По статистике, менее 50 % проектов по внедрению информационных систем на предприятиях заканчиваются успешно. В остальных случаях имеют место такие негативные факты, как неудовлетворение руководства и/или конечных пользователей результатами проекта, превышение сроков и бюджета проекта, либо все это в совокупности.

Подобные неудачи, как правило, имеют несколько причин, но чаще всего они связаны с отсутствием какой-либо методики внедрения, недостаточным опытом участников процесса, неадекватным выбором программно-технических средств, отсутствием организационной поддержки со стороны руководства и, очень часто, недостаточным финансированием. Для обеспечения успеха при внедрении не-

обходимы, в первую очередь, наличие проверенной методики, четко определяющей ожидаемый результат внедрения и все шаги, которые требуется предпринять для его достижения, а также наличие команды, имеющей успешный опыт внедрения подобных систем на других предприятиях.

Результатом внедрения является PLM-система, которая включает в себя:

- перепроектированные бизнес-процессы и структуры данных предприятия (адаптированные под работу в электронном виде);
- специализированное программное обеспечение (САПР, PDM и другие системы);
- системное программное обеспечение (ОС, СУБД, офисные пакеты, системы ЭЦП);
- аппаратное обеспечение (серверы, ЛВС, рабочие станции, периферийное оборудование);
- кадровое обеспечение (подготовленные к работе пользователи);
- нормативно-методическое обеспечение (стандарты предприятия (СТП), классификаторы, справочники);
- юридическое обеспечение (юридическая чистота использования электронных данных, в том числе организационные механизмы ЭЦП).

Работа по внедрению включает в себя:

- перепроектирование бизнес-процессов и структур данных предприятия;

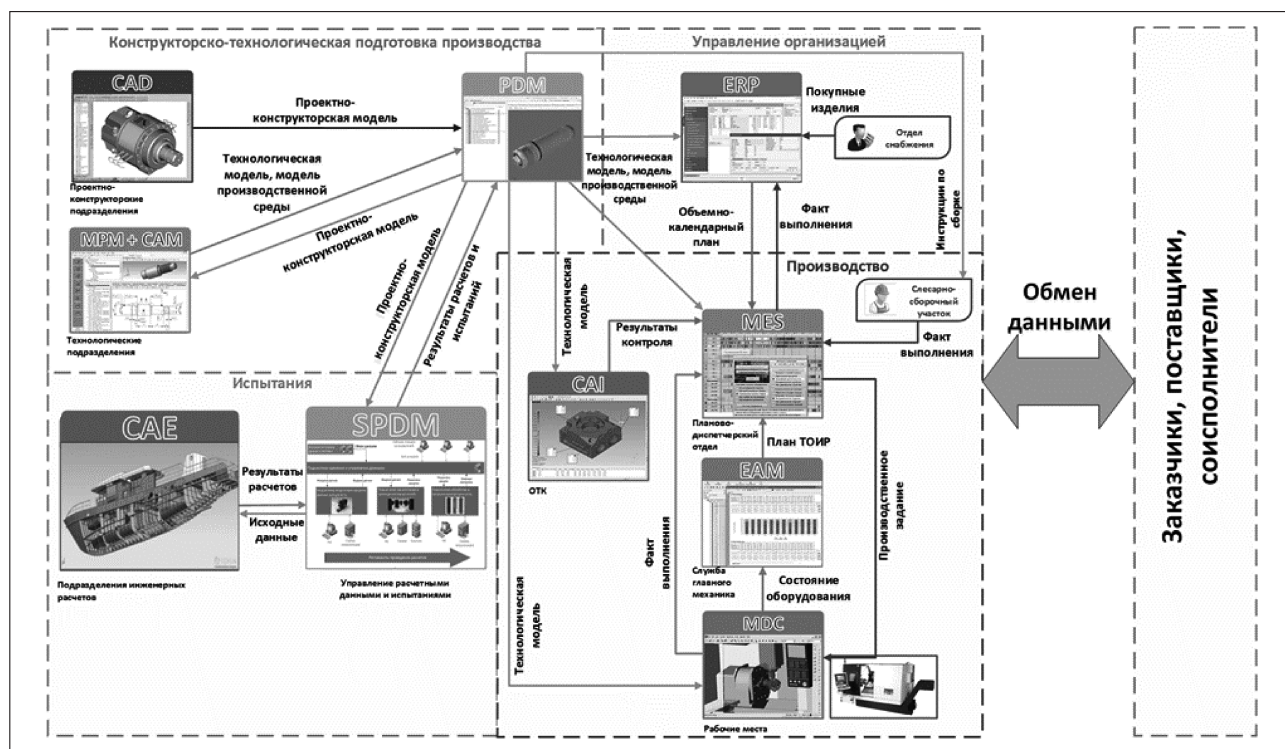


Рис. 4. Программная архитектура PLM-системы

- определение требований к компонентам PLM-системы и их взаимная увязка;
- выбор программного и аппаратного обеспечения (в особенности, специализированного ПО) из имеющегося на рынке;
- настройку специализированного ПО под бизнес-процессы и структуры данных предприятия;
- настройку системного ПО и аппаратного обеспечения;
- подготовку кадров;
- корректировку СТП;
- выверку классификаторов и справочников;
- решение юридических вопросов;
- решение внутренних организационных вопросов предприятия по вводу системы в действие (в том числе вопросов мотивации сотрудников).

**Адаптация и внедрение технологий управления жизненным циклом программных комплексов**

Программные комплексы являются такими же продуктами, как и машиностроительные изделия. При этом программное обеспечение может существовать как само по себе, так и являться частью еще более сложной мехатронной системы. Например, в таких современных изделиях, как автомобиль или самолет, одинаковую важность имеют механическая конструкция, электронные схемы и встроенное программное обеспечение, причем эти три компонента все более тесно интегрированы между собой. Более того, зачастую конечные потребительские характеристики изделий определяются в большей степени

именно программным обеспечением, под управлением которого работают остальные системы. Это, а также увеличивающаяся сложность «обычных» программных комплексов приводит к необходимости активно использовать подходы по управлению жизненным циклом и при разработке и поддержке программного обеспечения. Жизненный цикл ПО отличается некоторыми специализированными этапами, которые представлены на рис. 5.

Процессы ЖЦ, например расчетных кодов, могут быть сгруппированы по семи основным дисциплинам, каждая из которых определяет деятельность участников процесса в своей области, а в совокупности все дисциплины формируют единый подход по управлению процессами жизненного цикла ПО.

Эти дисциплины включают в себя:

- управление требованиями — в части сбора и формализации требований, их согласования и утверждения, управления изменениями требований и отслеживания их выполнения;
- управление разработкой — в части непосредственной разработки, включая физико-математическое моделирование, проектирование, программирование и документирование;
- управление тестированием, верификацией и валидацией — в части подготовки и проведения тестирования, верификации и валидации, включая проверки соответствия разработанного ПО предъявляемым к нему требованиям, а также их применимости в реальных условиях эксплуатации;
- управление поставкой и сопровождением — в части поставки и сопровождения ПО, в том числе проведения опытной эксплуатации;

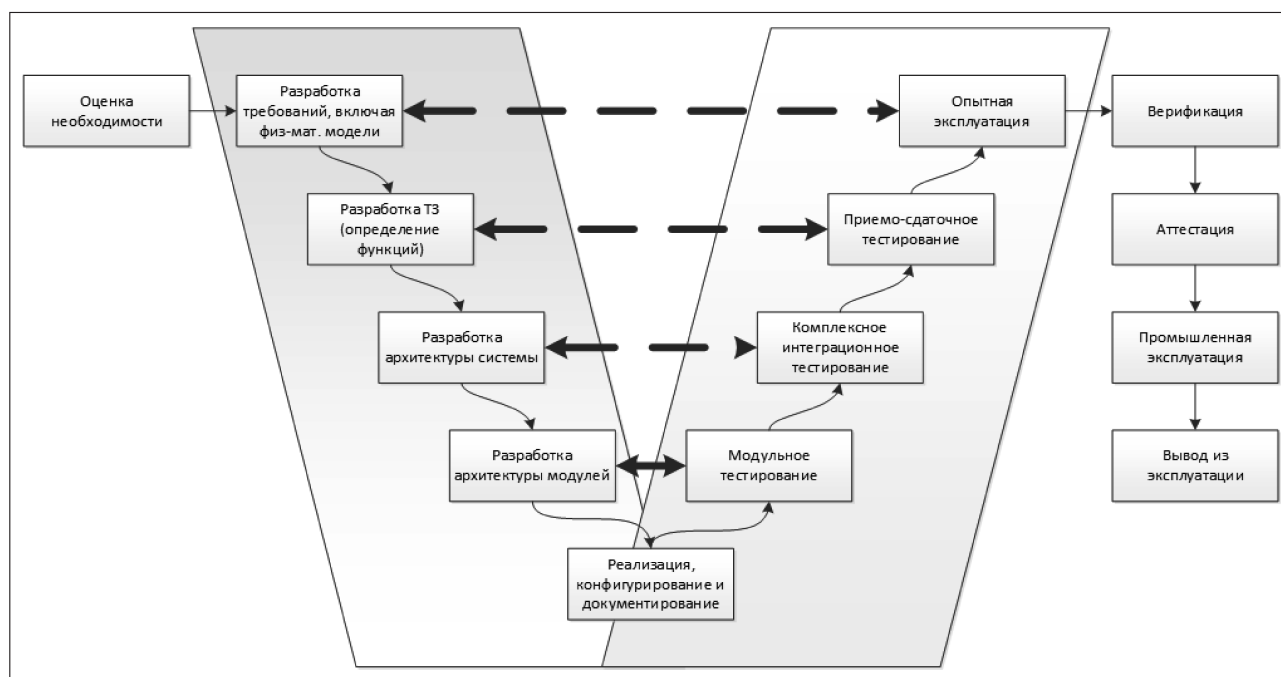


Рис. 5. Жизненный цикл программных комплексов

— управление проектом — в части планирования всех видов проектных работ и координации их выполнения соответствующими исполнителями;

— управление конфигурациями — в части планирования, идентификации и контроля за состоянием конфигурации ПО, а также компоновки и выпуска релизов;

— управление изменениями — в части управления запросами на изменение (требований) и дефектами в процессе разработки.

Процессы управления требованиями, разработкой, тестированием, верификацией и валидацией, поставкой и сопровождением составляют четкую последовательность на протяжении всего ЖЦ ПО, а процессы управления проектом, изменениями и конфигурациями действуют на всех этапах и непрерывно сопровождают разработку.

Для поддержки управления ЖЦ ПО применяются специализированные информационные системы — ALM-системы (ALM — Application Lifecycle Management), которые автоматизируют процессы ЖЦ и позволяют организовать групповую работу над ПО. Важная организационная составляющая внедрения описываемого подхода — подготовка регламентов в соответствии с выделенными дисциплинами для обеспечения выполнения процессов управления ЖЦ ПО.

В результате внедрения представленного подхода и ALM-системы могут быть достигнуты следующие эффекты:

— оперативность и качество управления проектом (выполнение запланированной работы с учетом ограничений по срокам и бюджету, без снижения качества результата);

— высокий уровень качества разрабатываемого ПО;

— эффективность взаимодействия участников проекта;

— оперативность и качество поддержки пользователей.

### Заключение

В данной работе кратко рассмотрены лишь основные направления развития технологий поддержки жизненного цикла сложной продукции машиностроения. Нетрудно понять, что основные проблемы возникают при их практической реализации. Количество задач, с которыми сталкиваются и разработчики, и интеграторы, и пользователи реализуемых систем в рамках формирующейся в настоящее время идеологии «Индустрии 4.0, только растет. Это и проблемы интероперабельности (взаимодействие различных информационных систем), и обеспечение безопасности, и вопросы качества данных, и много других. Именно от их решения, как показывает практика, и будет во многом зависеть конкурентоспособность страны.

**Колчин Александр Федорович** — канд. техн. наук, доцент, заместитель генерального директора ООО «Корпоративные электронные системы», заместитель председателя ТК 459 «Информационная поддержка жизненного цикла изделий» и заместитель председателя ТК 058 «Функциональная безопасность».

E-mail: kolchin@calscenter.ru

**Сумароков Сергей Вячеславович** — генеральный директор ООО «Корпоративные электронные системы».

E-mail: sumarokov@calscenter.ru

**Kolchin Alexander Fedorovich** — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Deputy General Director of «Corporativnyye elektronnyye systemy» LLC, Deputy Chairman of TC 459 «Information support of product life cycle» and Deputy Chairman of TC 058 «Functional Safety».

E-mail: kolchin@calscenter.ru

**Sumarokov Sergei Viacheslavovich** — Director General of «Corporativnyye elektronnyye systemy» LLC.

E-mail: sumarokov@calscenter.ru