

**В. К. Батоврин**, канд. техн. наук, зав. кафедрой, e-mail: batovrin@mirea.ru, Российский технологический университет (МИРЭА), г. Москва, **Б. А. Позин**, д-р техн. наук, проф., техн. директор ЗАО "ЕС-лизинг", e-mail: bpozin@ec-leasing.ru, "ЕС-лизинг", Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, г. Москва

## Инженерия требований на современном промышленном предприятии

*Выделены ключевые проблемные вопросы производственной инженерии требований. В контексте разрешения этих вопросов обсуждены: схема формирования и использования требований в жизненном цикле системы; взаимосвязь между отдельными процессами инженерии требований и их результатами; классификация требований; особенности обеспечения прослеживаемости требований и их распределения между элементами системы.*

**Ключевые слова:** инженерия требований, определение требований, качество требований, документирование требований, прослеживаемость требований

### Введение

Хорошо налаженная инженерия требований является одним из ключевых способов достижения успеха при создании систем различной сложности и назначения. В настоящее время развитие методов и средств практического использования инженерии требований связывают, как правило, с проблематикой создания программных и программно-насыщенных систем. Здесь можно, например, отметить работы К. Вигерса [1], К. Поля [2], Э. Халл и соавторов [3], а также ряда других специалистов. При рассмотрении проблемных вопросов программной инженерии тематика инженерии требований к программному продукту всегда выделяется в качестве раздела, требующего отдельного, подробного рассмотрения (например, [4]). Основные стандарты инженерии требований разрабатываются под эгидой Первого объединенного технического комитета ИСО и МЭК (ISO/IEC Joint Technical Committee 1, JTC1), занятого стандартизацией в области информационных технологий. Таким образом, складывается положение, когда некоторые специалисты связывают инженерию требований главным образом с деятельностью по формированию и развитию ИТ-решений.

Принимая во внимание отмеченную выше связь, следует, однако, подчеркнуть, что практика использования инженерии требований на предприятиях, занятых созданием сложных технических систем, таких как энергетические машины, средства транспорта, системы специального назначения и многих других, требует учета особенностей их архитектуры и проверки соответствия требованиям, предъявляемым к этим объектам (далее для краткости изложения — требованиям). При работе с такими требованиями приходится обязательно учитывать особенности технологий производства систем, их комплексирования,

управления конфигурацией, испытаний, сопровождения, а также логистические аспекты, включая наладку эффективного взаимодействия с множеством поставщиков, как готовых, так и заказных решений. Таким образом, на современном промышленном предприятии инженерия требований не замыкается только на ИТ-решениях и не ограничивается, как это было принято "старой школой", этапами разработки концепции системы и технического задания. На таком предприятии работа с требованиями является неотъемлемой частью инженерной деятельности по поиску и реализации решений, относящихся и к созданию системы, и к ее материальному воплощению, и к ее испытаниям, и к успешному применению и, наконец, к прекращению использования. Следовательно, в центре внимания специалиста по инженерии требований должны находиться полный жизненный цикл (ЖЦ), включая разработку и изготовление системы, а также предполагаемое окружение системы и особенности среды, окружающей предприятие, ответственное за разработку. Подобный подход можно условно назвать производственной инженерией требований.

В настоящей работе предпринята попытка выделения и анализа основных парадигм и методов производственной инженерии требований в целях выявления ключевых аспектов, определяющих успешный характер этой деятельности. Кроме того, рассмотрены вопросы адаптации типовых процессов инженерии требований к условиям промышленного предприятия.

### Проблемы производственной инженерии требований

Важнейшими задачами работы с требованиями в условиях промышленного предприятия являются учет сложности, гетерогенности и многовариантности создаваемых технических систем, а также сложности

логистической поддержки ЖЦ систем. Например, при создании современной авиационной техники используют сотни различных технологий. К самолетам предъявляют десятки тысяч оригинальных требований, в их числе — учет норм летной годности самолетов, которые дополнительно регламентируют тысячи обязательных требований к воздушным судам [5]. Для того чтобы охарактеризовать сложность логистической поддержки, достаточно оценить состав кооперации, реализующей эту поддержку. Так, в создании самолета B777 участвуют более 350 поставщиков различных конструкторских, технических, производственных, программных, технологических и других решений, а также девять поставщиков, обеспечивающих испытания. Для самолета B787 общее число таких поставщиков превышает 450, а для самолета A380 — 500 [6]. При этом для систем, подобных атомным электростанциям или морским буровым платформам, проблемы учета сложности набора требований еще масштабней, чем в случае воздушных судов и других транспортных систем.

Еще одна особенность производственной инженерии требований заключается в том, что на протяжении ЖЦ системы необходимо контролировать ее целостность и выполнение так называемых критических требований, предъявляемых к специально отобранным свойствам системы. В системной и программной инженерии сложились нормативные основы деятельности по контролю целостности [7, 8]. Кроме того, имеются общепризнанные рекомендации по увязке процессов обеспечения уровней гарантии качества и целостности системы с процессами инженерии требований. Пример подобной увязки в разрезе гарантий безопасности можно найти в стандарте ARP4754A [9], принятом в нашей стране в качестве обязательного нормативного руководства для разработчиков воздушных судов [10]. Сложности учета и реализации требований на этом направлении обусловлены тем обстоятельством, что применительно к созданию сложных инженерных объектов подобная отечественная практика по существу отсутствует. При этом некоторый опыт обеспечения целостности и гарантий качества, имеющийся у наших разработчиков программных средств, не может быть непосредственно и без глубокой переработки перенесен в область технических систем.

Зачастую по объективным причинам возникает необходимость в разработке нескольких вариантов изделия, которые базируются на единой платформе, а особенности таких вариантов связаны с использованием опциональных решений. Подобная ситуация характерна для автомобильной, авиационной и ряда других отраслей промышленности. В таких случаях не только появляется необходимость определить исходную совокупность требований и исходную конфигурацию изделия, но и требуется обеспечить гарантированную прослеживаемость в разрезе "требования к функциям (вплоть до объектов конфигурации) — требования к системе (вплоть до объектов конфигурации) — реализованные объекты конфигу-

рации". При сравнительно небольшом (от нескольких десятков до сотен) числе опций на уровне подсистем и отдельных элементов приходится анализировать до  $10^6 \dots 10^9$  и более вариантов конфигурации [11]. Это обстоятельство, в свою очередь, требует особого внимания к решению вопросов автоматизации процессов инженерии требований. Проблемные вопросы производственной инженерии требований обусловлены, таким образом, не только сложностью создаваемых систем, необходимостью обеспечения контроля их целостности и гарантий качества, но и необходимостью поддержки многовариантности. Отмеченные вопросы можно охарактеризовать как ключевые для производственной инженерии требований.

Анализ показывает, что в центре внимания производственной инженерии требований должны находиться: моделирование исходной совокупности требований во взаимосвязи с архитектурой изделия и выделенными объектами конфигурации; практическое прослеживание изменений требований; определение и формализация процессов инженерии требований, адаптированных к условиям промышленного предприятия; повышение уровня их зрелости и критерии контроля запланированных результатов. Именно эти аспекты вносят решающий вклад в успех деятельности системных инженеров и позволяют обеспечить успешную автоматизацию процессов инженерии требований. К сожалению, примеры эффективного решения подобных задач применительно к ЖЦ сложных технических систем на отечественных промышленных предприятиях авторам неизвестны.

Отметим также, что в настоящее время на рынке имеется более сотни инструментальных средств, предназначенных для автоматизации процессов работы с требованиями [12]. При таком их разнообразии осознанный выбор подходящих инструментальных средств возможен только при наличии высокой квалификации как в области инженерии требований, так и в сфере гармонизации процессов реализации этих требований с другими процессами предприятия. В этих условиях отечественные предприятия, как правило, не выбирают наиболее подходящее инструментальное средство, а пытаются настроить для решения своих задач наиболее доступное из них. При этом недостаточно внимания уделяется вопросам налаживания процессов инженерии требований по существу и управления ими. Такое положение ведет к неминусемому росту проектных рисков и повышению затрат на разработку и реализацию принятых решений.

### **Общая схема формирования и использования требований в жизненном цикле системы**

Современные стандарты системной и программной инженерии рассматривают создание систем не само по себе, а в рамках некоей программы работ или проекта, направленного на реализацию потребности заинтересованных сторон (ЗС). К их числу, прежде всего, относятся потенциальные собственники и

пользователи системы [13–15]. Заинтересованные стороны инвестируют средства в этот проект или программу и, как правило, впоследствии организуют правильную и эффективную эксплуатацию системы, ее сопровождение и развитие. Таким образом, управление требованиями к системе осуществляется на протяжении ее полного ЖЦ. Современная парадигма международной системы стандартизации, в частности ISO/IEC/IEEE, основана на рассмотрении полного жизненного цикла системы, в то время как разработанные в конце прошлого века ГОСТ 34 рассматривает в качестве продолжительности действия ТЗ период до сдачи системы заказчику, а ГОСТ 15 — до постановки изделия на производство [19, 20]. Современная международная система стандартизации учитывает, что после постановки сданной или произведенной на заводе системы (изделия) на балансый учет заказчика или покупателя она становится активом владельца. Система при этом такой же актив, как здание, машина или любой другой актив. Его нужно эксплуатировать и обслуживать, проводить ежегодное бюджетирование этой деятельности.

На рис. 1 показана схема формирования требований и взаимосвязи между системой и различными категориями требований, учитывающая рекомендации стандарта ISO/IEC/IEEE 29148. Согласно этой схеме системы создаются предприятиями, функционирующими в определенном окружении. Предприятие при этом имеет дело одновременно с тремя категориями требований, к числу которых относятся:

- деловые требования, определяемые на уровне управления бизнесом;
- требования заинтересованных сторон, которые определяются на уровне программ/проектов и/или деловых операций;

- требования собственно к целевой системе, а также к ее элементам и к программному обеспечению (ПО).

Все три категории требований тесно связаны между собой отношениями прослеживаемости, т. е. возможностью установления и поддержки взаимосвязи между исходными и производными требованиями, их источниками и верификацией фактов выполнения требований. Именно поэтому требования к системе и к ее элементам, включая ПО, выявляются изначально на уровне среды предприятия (в том числе программы или проекта) на основании представлений о необходимых возможностях будущей системы. Последние сформированы ЗС, исходя из потребностей и особенностей бизнеса предприятия или потребностей рынка. Анализ этих возможностей с позиций их реализуемости и последующее согласование с ЗС приводит к появлению *требований к использованию системы*. В ходе декомпозиции этих требований и формирования архитектуры будущей системы разрабатываются требования, используемые в процессе реализации системы и ее элементов, включая ПО, которые также согласуются с соответствующими ЗС. В отличие от прослеживаемости требований к программному обеспечению, поддержание прослеживаемости требований к техническим системам зачастую требует построения "очень длинных" трасс в сотни взаимосвязанных вершин. Это обстоятельство приводит к необходимости создания специальных средств автоматизации анализа и документирования трасс. Для эффективного решения этой задачи необходимо создание инструментальных средств, обеспечивающих ведение и анализ требований разных видов, которые в ходе реализации проекта/программы системы хранятся в единой базе данных (репозитории требований), доступ к которому



Рис. 1. Общая схема формирования требований с учетом положений [13]

предоставляется уполномоченным специалистам. По существу репозиторий должен поддерживаться в актуальном состоянии в течение ЖЦ системы.

В целях выстраивания эффективной производственной инженерии требований промышленному предприятию полезно наладить и поддерживать три гармонизированных между собой процесса, а именно: *процесс анализа бизнеса (бизнес-процессов предприятия)*; *процесс определения нужд и требований ЗС*; *процесс определения требований к системе*. Эти процессы должны быть сопряжены с процессами предприятия [14] и должны являться основой для формирования документов (выделенных ниже), установленных предприятием для внутренних процессов.

В рамках процесса *анализа бизнеса* с учетом принятых концепций ЖЦ, включая концепцию деятельности предприятия, предприятие определяет деловые требования, реализация которых может решить проблему(ы) предприятия и/или позволит ему воспользоваться выявленной возможностью. Традиции составления и утверждения концепции деятельности в увязке с другими типовыми концепциями ЖЦ, определенными, например, в руководстве INCOSE [16], на отечественных промышленных предприятиях, как правило, отсутствуют. Именно поэтому отмеченному вопросу следует уделить особое внимание. Концепция деятельности используется в качестве основы, которая в рамках организации указывает направление развития и общие характеристики будущего бизнеса и систем. В рамках проекта такая концепция помогает понять его предпосылки, а для лиц, занятых инженерией требований, облегчает выявление требований ЗС. Требования, определенные в процессе анализа бизнеса, фиксируются в спецификации деловых требований (*business requirements specification — BRS*) и включаются в базу данных требований.

В рамках процесса *определения нужд и требований ЗС* ответственные за программу/проект инженеры описывают эти потребности совместно с выявленными ЗС. Они определяют совокупность сценариев использования целевой системы и ее необходимые возможности, включая особенности взаимодействия с окружением и потребности в системах обеспечения. Полнота и доказательность определения потребностей ЗС должны быть достаточны для получения разрешения на начало и финансирование новой программы/проекта в рамках процесса управления портфелем проектов. Эти результаты должны содержать и техническую информацию, необходимую для формирования запроса на предложение, если система должна быть приобретена по контракту в рамках процесса приобретения [14]. Такая информация необходима для получения разрешения на разработку и последующую реализацию системы, если она создается в ответ на запросы рынка. Кроме того, важнейшим результатом процесса является преобразование нужд ЗС в их требования. Такие требования формализуются в строго структурированные утверждения, которые могут быть проверены посредством их валидации (в рамках валидации требований высокого уровня до их реализации) и/или верификации требований к системе по отношению к требованиям ЗС

высокого уровня [13]. В промышленности требования ЗС, идентифицированные и документированные на уровне программы/проекта, служащие исходными данными для определения функций целевой системы, иногда называют требованиями высокого уровня (*top level requirement — TLR*) [9].

С определением нужд и требований ЗС тесно связан переход от представления об отдельных возможностях целевой системы, соответствующих потребностям ЗС, к полному, согласованному описанию ее поведения в процессе использования по назначению, т. е. к формированию концепции использования системы. Действия на этом направлении включают определение того, что должна делать система, а именно — выделение набора функций и выявление требований к качеству их выполнения, а также обоснование требований к характеристикам и показателям ее функционирования, таким как производительность, надежность и т. п. Описание того, как система должна реализовывать функции, на этом этапе принципиально не проводится.

Кроме того, при формировании концепции использования необходимо обеспечить двустороннюю прослеживаемость между требованиями к функциям системы и источниками этих требований. В качестве возможных рекомендаций по разработке концепции использования могут быть рассмотрены положения стандарта ANSI/AIAA G-043A-2012 Американского института аэронавтики и астронавтики (*American Institute of Aeronautics and Astronautics*) [17]. Требования ЗС фиксируются в спецификации требований ЗС (*stakeholder requirements specification — StRS*) и включаются в репозиторий требований.

В рамках процесса *определения требований к системе* системные инженеры и инженеры по направлениям преобразуют представление ЗС о требуемых возможностях и функциях системы в техническое представление о решении, которое пригодно к реализации на производстве и к эксплуатации пользователем. Это техническое представление должно содержать критерии того, что, насколько хорошо и при каких условиях должна делать система, чтобы соответствовать деловым требованиям и требованиям ЗС, а также проектным, конструктивным и другим требующим учета ограничениям. Технические требования многообразны, их виды более подробно будут рассмотрены ниже. Поскольку реализация каждого из таких требований связана с определенными затратами, важно, чтобы был установлен, с одной стороны, полный, с другой стороны — минимальный набор требований к системе, обусловленных требованиями ЗС. После определения высокоуровневой совокупности требований к системе, их необходимо распределить и передать на последовательно более низкие уровни системной иерархии. Существенно, чтобы по мере выполнения процессов привязки и распределения требований поддерживалась их двусторонняя прослеживаемость вплоть до самого низкого иерархического уровня. Для этого на каждом из иерархических уровней выполнения проекта каждому (проиндексированному) требованию ставится в соответствие множество атрибутов, отражающих

связь между исходными и производными требованиями или их состояниями. Здесь приводятся предварительные предложения авторов по атрибутированию требований, которые подлежат развитию в последующих работах. Однако они частично использовались в процессе создания, сопровождения и развития программных систем довольно большого масштаба.

Атрибутирование требований направлено на решение нескольких задач. Во-первых, на то, чтобы обеспечить возможность прослеживания системных функций "снизу вверх", поскольку на достаточно низких уровнях декомпозиции такая зависимость может теряться при выборе базовых элементов реализации системы. Во-вторых, на поддержку механизмов, позволяющих маркировать каждый элемент архитектуры атрибутом принадлежности к системной функции. Целью и в этом случае является обеспечение возможности двустороннего прослеживания (прежде всего "снизу вверх", от элементов архитектуры к системным функциям). В-третьих, атрибутирование направлено на создание механизмов, позволяющих маркировать каждый элемент конфигурации атрибутами принадлежности к элементу архитектуры и плановым/достигнутым состояниям в проекте/программе/ЖЦ. В некоторых случаях приходится вводить виртуальные элементы архитектуры. В конструкторской практике граница между системными функциями при их реализации может быть размыта. Не исключены компоновки нескольких системных функций или их элементов в некоторые конструктивные элементы. Такие элементы могут быть не предусмотрены ЗС, однако могут оказаться эффективными на практике, с учетом ремонтпригодности или других критериев.

При определении требований следует также уделять особое внимание гарантиям того, что требования сформулированы надлежащим образом. Полезные предложения можно найти в Руководстве INCOSE по написанию требований [18]. В нем пред-

ставлены рекомендации по написанию требований, а также рассматриваются характеристики качества отдельных требований и наборов требований, атрибуты формулировок отдельных требований и правила описания отдельных требований. Исходная совокупность полных, точных, недвусмысленных требований к системе и ее элементам формируется на ранних стадиях ее ЖЦ. Эти требования фиксируются в утвержденных и опубликованных спецификациях требований к системе (*system requirements specification* — *SyRS*) и вносятся в репозиторий требований, доступ к которому следует обеспечить для всех уполномоченных сторон. Спецификации *SyRS* используется далее для специфицирования требований к элементам системы, включая ПО. В последнем случае разрабатывается спецификация требований к ПО (*software requirements specification* — *SRS*). Таким образом, должно быть создано дерево спецификаций, позволяющее полностью определить (описать) систему и организовать ее производство.

### Взаимосвязь между процессами инженерии требований и их результатами

Традиционное ТЗ (ТТЗ) является контрактным документом и выступает в качестве неотъемлемой части договора между заказчиком и поставщиком продукции [19, 20]. В силу этого обстоятельства интересы собственно разработчиков решений, связанные с возможностью прослеживания связей между особенностями использования (эксплуатации) системы и требованиями к ее материальному воплощению, а также к отдельным элементам не всегда учитываются при формулировании требований в ТЗ. Кроме того, требования, содержащиеся в ТЗ, почти всегда требуют интерпретации, в частности, выделения из состава комплексных требований единичных требований, используемых при верификации решений. Эти обстоятельства зачастую приводят к заметно-

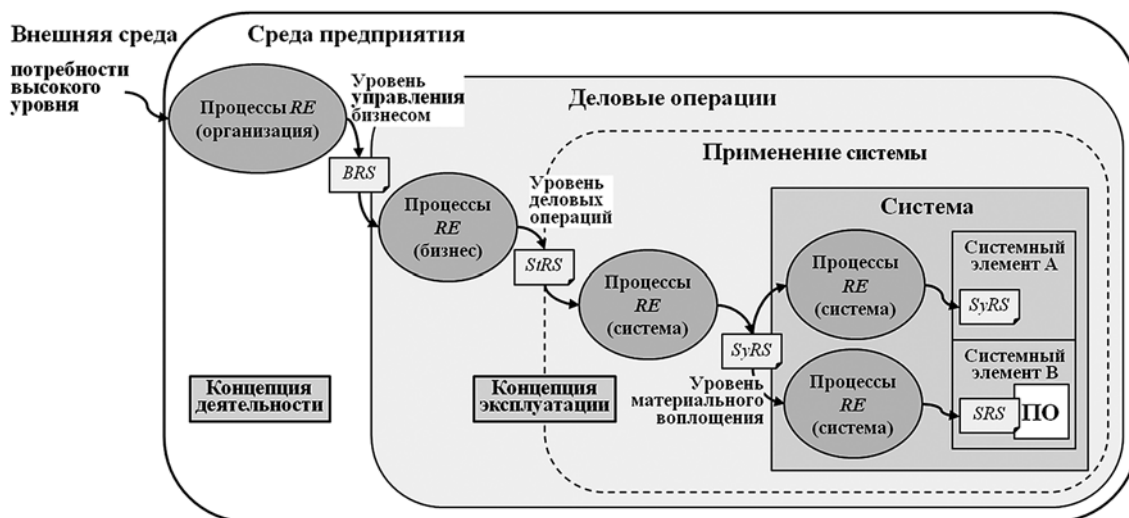


Рис. 2. Взаимосвязь между процессами инженерии требований (RE) и их результатами

му росту затрат на проект и сроков его реализации. На рис. 2 показана последовательность процессов инженерии требований и место соответствующих спецификаций, рекомендованные современной инженерией требования [13]. Эта схема, в отличие от упомянутой традиционной схемы ТЗ (ТТЗ), позволяет систематически использовать совокупность взаимосвязанных спецификаций требований, детализировать требования до необходимой разработчикам глубины, а также на протяжении ЖЦ системы отделять друг от друга управленческие и технические аспекты. В результате спецификации требований становятся неотъемлемой частью пакета документов. На их основе ЗС и предприятие реализуют политики управления ЖЦ продукции и налаживают процессы ЖЦ, что позволяет смягчить риски программ и проектов по созданию систем. Кроме того, использование подобного подхода дает полезную возможность независимого управления функциональными требованиями и требованиями к продукции, а также позволяет существенно упростить деятельность по установлению и поддержанию прослеживаемости требований.

Специфицированные и увязанные между собой требования составляют основу для всех работ по проектированию и производству, по испытаниям и эксплуатации системы, по ее техническому обслуживанию и прекращению использования. Как следствие, определяются стоимость и график реализации проекта. Однако работа с требованиями к системе на этом не заканчивается. По мере увеличения уровня детализации проектно-конструкторских решений, а также по мере их материализации процессы инженерии требований итеративно повторяются на каждом из этапов проекта с непрерывной обратной связью. Полученные результаты увязываются с принятыми на

уровне предприятия концепциями ЖЦ, в частности, с концепциями приобретения, развертывания, использования и сопровождения [16]. Эти результаты также формируют основу для моделирования архитектуры, для выделения и учета подходящих в технологическом или техническом отношении элементов, из которых может быть построена система, а также для учета неизбежного изменения требований на протяжении ЖЦ, что дает возможность налаживания эффективного управления конфигурацией. В итоге может быть сформирован результирующий репозиторий требований. Данные репозитория могут успешно использоваться в процессе верификации и валидации как системы в целом, так и отдельных ее элементов.

Следует отметить, что в практике производственной инженерии первостепенную важность при составлении спецификаций требований имеют обязательные требования, например, сертификационные требования, которые в сочетании с требованиями, полученными в результате анализа ТЗ, позволяют сформировать исходные (начальные) наборы требований. Использование ноу-хау из предыдущих программ расширяет эти исходные (начальные) наборы требований до уровня, достаточного для первоначальных исследований в области архитектуры целевой системы.

В таблице на примере воздушного судна и его тормозной системы показан фрагмент возможной спецификации требований к системе в целом, составленной в соответствии с рекомендациями SAE AIR 6110 [21] и содержащей указания как на источник требований, так и на его обоснование. Общие рекомендации по формированию спецификаций требований можно найти в стандартах ISO/IEC/IEEE 29148 [13] и ISO/IEC/IEEE 15289 [22].

**Пример спецификации требований к воздушному судну (фрагмент)**

Требование	Описание	Источник требования	Обоснование
S18-ACFT-R-0009	Самолет должен иметь средства торможения на земле согласно АП 25.735 [5]	АП 25. Раздел 25.735	Минимальный стандарт, выполнение требований которого обязательно для сертификации воздушного судна
S18-ACFT-R-0110	Самолет должен иметь автоматическое торможение	Производное требование	Технологические усовершенствования возможностей автоматической посадки согласно категории ИКАО CAT III b и исследования рынка, отчет о потребностях клиентов
S18-ACFT-R-0135	Самолет должен обеспечивать противоюзную функцию	Производное требование	Всепогодная эксплуатация и устойчивость самолета во время пробегов по взлетно-посадочной полосе и исследования рынка, отчет о потребностях клиентов
S18-ACFT-R-0184	Самолет должен иметь тормозную систему с гидравлическим приводом	Производное требование	Исследования (отчет TS-18-XXXX) показали, что тормозные системы с гидравлическим приводом экономически целесообразней систем с электрическим приводом
S18-AC FT-R-0185	Экипаж должен иметь возможность пересилить автоматическое торможение	АП 25.25.735(c) [5] и S18-ACFT-R-0110	Экипаж сам выбирает режим управления тормозами

## Виды требований, цели и ожидаемые результаты их использования в жизненном цикле систем и их программного обеспечения

Требования к целевой системе подразделяются по видам с учетом совместных позиций их использования всеми ЗС, а именно участниками процессов ЖЦ на стороне заказчика или пользователя. Прежде всего, целью разработки требований является описание совместного видения системы заинтересованными сторонами. Такое видение включает:

- обязательные или процессуальные требования, в частности, соответствие системы или процесса ее создания необходимым законам, нормам и правилам, установленным для систем данного класса (если таковые существуют);
- требования к функциям системы и ее составных частей, а также к взаимодействию со смежными системами (внешние интерфейсы) и между элементами системы (внутренние интерфейсы);
- требования к характеристикам, которые относятся к функциям, обычно устанавливаются количественно и определяют степень или уровень выполнения функции или задачи;
- нефункциональные требования, например, конструктивные, технологические, эксплуатационные и другие свойства, важные для пользователя в его представлениях об удобстве использования, а также для заказчика в его представлениях о способе производства, эксплуатации, утилизации и т. п.

Как правило, на практике все виды требований формируются итерационно, как по причине сложности самой системы, так и в силу необходимости

обеспечения согласованности и непротиворечивости требований. Это кропотливая системная работа, которую выполняют совместно специалисты заказчика, генподрядчика и других ЗС. Такая работа для сложных систем сопровождается проведением НИР и НИОКР с целью исследовать лучшие решения и апробировать некоторые из них на макетах. Основные виды требований, которые формируются на этом этапе, представлены на рис. 3.

Следует заметить, что требования к функциям не только отражают представление ЗС об основных функциях и использовании (эксплуатации) будущей системы, но также специфицируют функции следующего (одного или нескольких) уровня декомпозиции основных функций с учетом их общесистемной значимости. Кроме того, функциональные требования отражают внешние связи будущей системы со смежными с ней другими системами, которые являются, как правило, источниками данных для решения задач целевой системы или получателями данных от нее. Как следует из представленного описания, *все подсистемы, входящие в состав целевой системы, в совокупности реализуют ее функции*. Как следствие, требования к таким подсистемам по существу задают ожидаемые характеристики реализуемой функции. Таким образом, эти требования могут и должны быть основой для проверки степени реализации соответствующей функции.

Нефункциональные требования отражают условия, в которых система должна работать или существовать, доступность системы, ожидаемые надежность и качество, а также человеческие факторы, например, требования к квалификации или удобству использования. Кроме показателей, которые характеризуют способность системы к выполнению функций в ожидаемых условиях применения, нефункциональные требования могут специфицировать способ (технологии) производства, режимы эксплуатации и обслуживания системы, другие аспекты существования системы на протяжении ЖЦ.

Из изложенного выше следует, что *целью* формирования требований является не только описание внешних свойств создаваемой системы для ее приемки, но и возможность использования функциональных требований для анализа степени полноты и качества реализации функций системы. Кроме того, требования являются основой для подготовки планов проверки соответствия целевой системы и подсистем, входящих в ее состав, в рамках процедуры верификации.

Отметим, что правильно построенные процессы инженерии требований позволяют на протяжении ЖЦ не только проследить соответствие требований архитектуры и конфигурации "сверху вниз" при декомпозиции системы, но и при определенных условиях "снизу вверх", т. е. при проверке степени реализации требований. По причине большой



Рис. 3. Виды требований к системе

размерности системы трассы прослеживания становятся очень длинными.

Важно также отметить, что юридически ответственность за реализацию требований к системе определяется условиями договора на ее разработку. По завершении действия договора прекращает действие и ТТЗ/ТЗ, а ЖЦ системы продолжается. Система подлежит производству, развертыванию, эксплуатации, сопровождению, развитию и, наконец, утилизации. На этих стадиях необходимо хранить и использовать, сопровождать и развивать описание, заменяющее ТТЗ/ТЗ, как у ЗС, так и у разрабатывающих организаций (прежде всего интеграторов). Именно эту роль и должны играть упомянутые выше спецификации требований к системе в том состоянии, которое сформировалось к текущей стадии ЖЦ этой системы, а также требований. Для организаций, создающих серии однотипных систем, наличие репозитория, в которых хранится и/или поддерживается комплекс требований, повышает эффективность управления конфигурацией, создает возможности выработки типовых решений, их унификации и стандартизации и снижения совокупной стоимости ЖЦ.

### Распределение требований между элементами системы

Как отмечалось выше, исходными данными для инженеров, создающих целевую систему, являются представления о ее функциях, отраженные в требованиях высокого уровня — *TLR*. В свою очередь, *TLR* увязываются с концепцией использования. Такая концепция на ранних этапах ЖЦ в текстовом или в графическом виде в контексте потребностей пользователей и других ЗС описывает эксплуатационные возможности и характеристики целевой системы в среде ее использования. Она задает основу для определения рабочего пространства, возможностей системы и ее интерфейсов, а также условий эксплуатации. Причем функции целевой системы выделяются итерационно путем логического сопоставления требований высокого уровня и представлений о поведении системы в среде функционирования, которые отражены в принятой концепции использования. В результате формируется полный перечень функций целевой системы, а также связанных с ними требований к функциям и интерфейсам этих функций, т. е. исходная функциональная конфигурация создаваемого изделия (рис. 4).

Вместе с тем представления о системе или о ее свойствах в окружающей среде, воплощенные в ее элементах и связях между ними, в принципах проектирования и развития системы, формируются в рамках инжиниринга архитектуры. Инжиниринг архитектуры предполагает использование типовых архитектурных представлений [23]. Эти представления должны быть зафиксированы на уровне предприятия. При их выявлении за основу могут быть взяты либо представления, используемые лидерами отрасли, либо библиотечные представления [24].

Следует также учитывать, что стандарт ISO/IEC/IEEE 42010 в контексте процесса системной инженерии рекомендует использовать *точку зрения декомпозиции и привязки (decomposition and allocation viewpoint)* [23]. Эта точка зрения предусматривает решение четырех ключевых задач:

- идентификацию требований к системе с присвоением уникального идентификатора каждому из требований и с декомпозицией (при необходимости) исходных требований на производные требования, определяющие полный набор требований к системе;
- декомпозицию системы на элементы с обязательной идентификацией интерфейсов между элементами;
- распределение (привязку) требований между элементами системы с установлением взаимного соответствия между полным набором требований и всеми элементами системы так, чтобы каждый

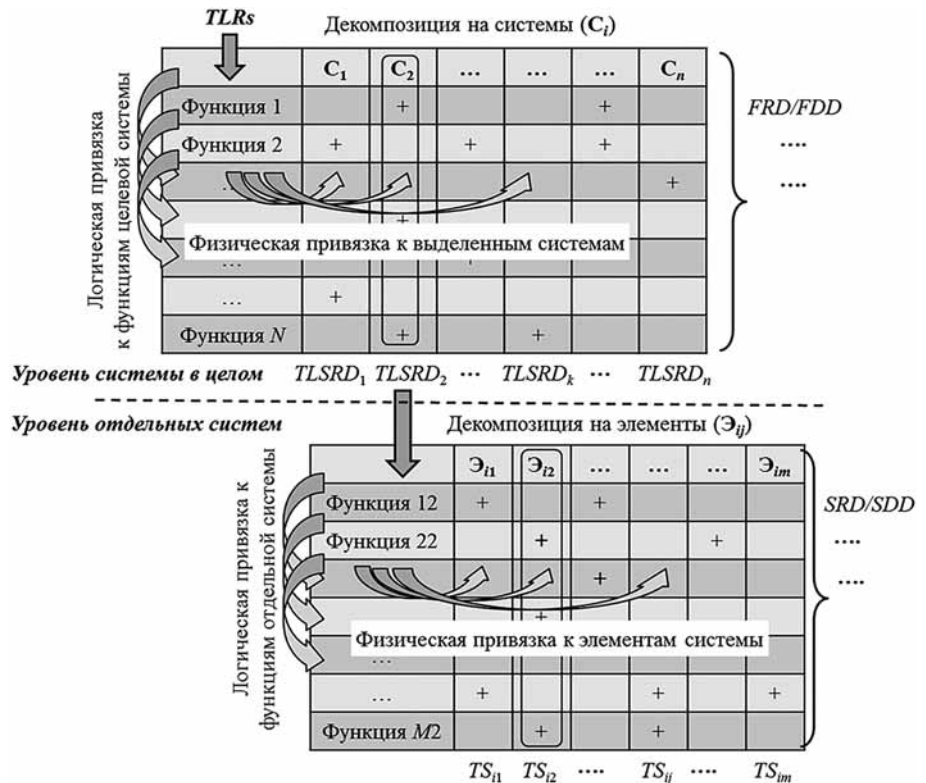


Рис. 4. Распределение требований и функций между элементами системы на различных уровнях системной иерархии



элемент удовлетворял одному или нескольким требованиям, и каждое требование было привязано по меньшей мере, к одному элементу;

- верификацию того, что все требования распределены по элементам системы.

Таким образом, при переходе от описания функционирования к описанию требований к системе и к ее составным частям в центре внимания оказывается процедура привязки этих требований и функций к элементам системы на различных уровнях системной иерархии (рис. 4). В процессе привязки выполняется надлежащая группировка функций целевой системы с их физической привязкой к системам второго иерархического уровня, а также распределение требований, предъявляемых к данным функциям. В результате формируются: спецификация функций (*function description document — FDD*); спецификация функциональных требований (*function requirement document — FRD*) и набор спецификаций высокоуровневых требований к системам, входящим в состав целевой системы (*top level system requirement document — TLSRD*). Спецификация функций *FDD* содержит сведения о системах и структурных доменах, которые в составе целевой системы участвуют в реализации функции, определенной на уровне системы в целом в соответствии с высокоуровневыми требованиями, идентифицированными и документированными на уровне программы/проекта — *TLR*. В свою очередь, спецификация функциональных требований *FRD* включает требования к специфицированным функциям, вытекающие из специфицированных требований ЗС.

Применительно к промышленной инженерии требований декомпозиция целевой системы на отдельные системы выполняется, как правило, в контексте ранее сложившихся представлений о логической архитектуре целевой системы. Далее в ее составе определяют ключевые системы, возможно, основные подсистемы, а также связи между ними. Работа с требованиями в этой ситуации строится сразу в двух направлениях "снизу вверх", т. е. от логической архитектуры к требованиям, и "сверху вниз", т. е. от логической архитектуры к физической архитектуре и элементам конфигурации. Например, в авиастроении сложившиеся представления о системах, входящих в состав воздушного судна, отражены в общепризнанном документе S1000D [25], который используется в нашей стране. В случае отсутствия исходных сведений об архитектуре целевой системы, она отдельно итерационно определяется с учетом специфицированных требований и указанных ранее архитектурных представлений и точек зрения.

Архитектура систем третьего иерархического уровня (на рис. 4 эти системы названы элементами), как правило, определяется непосредственно в процессе разработки. Результатом этой деятельности является описание архитектуры этих элементов, а также привязка функций систем второго иерархического уровня и связанных с ними требований к этим элементам (рис. 4). В итоге формируются:

описание каждой системы в целом (*system description document — SDD*); спецификации требований к системам (*system requirement document — SRD*) и набор технических спецификаций элементов, входящих в состав отдельных систем (*technical specification — TS*). Спецификация *SDD* составляется для каждой из систем в составе целевой системы. Она включает описание архитектуры системы; взаимодействия между элементами в составе системы; функций, выполняемых этой системой. Спецификация требований *SRD* содержит описание всех требований, которым должна соответствовать система для того, чтобы полностью отвечать спецификации требований к системе в целом. Техническая спецификация элемента *TS* содержит сведения, необходимые и достаточные для закупки или производства соответствующего элемента.

В случае необходимости процедура, показанная на рис. 4, может быть продолжена на четвертом уровне системной иерархии.

Разработка архитектуры и распределение требований тесно взаимосвязаны и являются итерационными процессами. В рамках каждого итерационного цикла степень конкретизации и понимания требований повышаются. Распределение системных требований между элементами аппаратного и программного обеспечения при этом становится все более корректным. Важнейшим результатом усилий по распределению требований между элементами является набор технических спецификаций, примерный состав которого описан выше.

Итоговая совокупность прослеживаемых и верифицируемых требований к характеристикам и свойствам отдельных элементов может быть основой для успешного производства системы, управления ее конфигурацией, а также всех видов проверки соответствия.

## Заключение

Ключевой составляющей снижения проектных рисков в ЖЦ сложных технических систем (далее — систем) является инженерия требований. Именно она позволяет найти баланс между сложностью и гетерогенностью таких систем и возможностью поддержания необходимого уровня гарантий их качества, в том числе гарантий безопасности, обеспечения производства и сопровождения в процессе эксплуатации.

Важнейшим условием поставки на рынок качественных систем является наличие у предприятия-поставщика регламентированных и работоспособных процессов сопровождения систем на всех этапах их ЖЦ. Применительно к инженерии требований эти процессы должны обеспечивать взаимоувязанность трех видов описаний: описание совокупности требований; описание архитектуры системы; описание объектов конфигурации. За основу удобно принять стандартные технические процессы, рекомендованные в работах [13, 14], с их последующей адаптацией к условиям предприятия.

Ввиду сложности систем и большого числа участников процессов ЖЦ (с учетом поставщиков готовых решений, а также обеспечивающих и прочих процессов) неотъемлемым условием успешности эффективного использования требований является комплексная автоматизация процессов инженерии требований.

В основу такой автоматизации должны быть положены: стандартизованные на уровне поставщика целевой системы (а значит, и для его кооперации) модели процессов инженерии требований, стандартные иерархические представления систем и их элементов; шаблоны документов, формируемых на выходе типовых процессов инженерии требований (и других связанных с ними процессов ЖЦ); схемы формирования и использования требований в привязке к концепции использования системы и к другим концепциям ЖЦ, включая обеспечение четкой привязки функциональных требований к иерархической структуре создаваемой системы.

Опыт передовых предприятий показывает, что для обеспечения непрерывности перехода от контрактных документов (например, ТТЗ/ТЗ) к проекту и проектным решениям целесообразно использовать разработку совокупности обязательных спецификаций требований, включая спецификации требований заинтересованных сторон (*StRS*), спецификации требований к системе (*SyRS*), спецификации требований к ПО (*SRS*), а также опционально спецификации деловых требований (*BRS*).

Фундаментальное значение для успеха проектов создания систем имеет обеспечение и поддержание прослеживаемости требований на протяжении ЖЦ. Ключевым фактором успеха в этом случае является построение дерева функций системы, а также дерева спецификаций требований к системе и к ее элементам с неперемной взаимной увязкой этих представлений между собой.

### Список литературы

1. **Wieggers K., Beatty J.** Software Requirements (3rd Edition) (Developer Best Practices), Microsoft Press, 2013. 673 p.
2. **Pohl K.** Requirements Engineering: Fundamentals, Principles, and Techniques, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 814 p.
3. **Hull E., Jackson K., Dick J.** Requirements Engineering (4th Edition), Springer-Verlag, 2017. 239 p.
4. **Позин Б. А.** Проблемы программной инженерии на современном этапе ее развития // Программная инженерия. 2011. № 1. С. 2–6.
5. **Межгосударственный** авиационный комитет. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транс-

портной категории. 2015. URL: <http://www.armak-iac.org/dokumenty/aviatsionnye-pravila/>

6. **Airframer:** The aerospace manufacturing directory. URL: <http://www.airframer.com/default.html>

7. **ISO/IEC 15026-3:2015** Systems and software engineering. Systems and software assurance. Part 3: System integrity levels. URL: <https://www.iso.org/standard/64842.html>

8. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 15026-4-2016** Системная и программная инженерия. Гарантирование систем и программного обеспечения. Часть 4. Гарантии жизненного цикла. М.: Стандартинформ, 2016.

9. **SAE Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems ARP4754A:** 2010. URL: <https://www.sae.org/standards/content/arp4754a/>

10. **Межгосударственный** авиационный комитет. Авиационный регистр. Руководство Р-4754а по разработке воздушных судов гражданской авиации и систем. Введено в действие с 22.08.16 директивным письмом № 02-2016 Авиарегистра МАК от 22 августа 2016 г. М.: Авиарегистр МАК, 2016. 103 с.

11. **Батоврин В. К., Балашов Ю. В.** Управление конфигурацией в проектах создания сложных систем // Управление проектами и программами. 2017. № 4 (52). С. 250–263.

12. **Project Performance International Requirements Management Tools List.** PPI. 2015. URL: <https://www.ppi-int.com/wp-content/uploads/2017/07/PPI-005107-5-RqtsManToolList-151008.pdf>

13. **ISO/IEC/IEEE FDIS 29148:2017** Systems and software engineering. Life cycle processes. Requirements engineering. URL: <https://www.iso.org/standard/72089.html>

14. **ISO/IEC/IEEE 15288:2015** Systems and software engineering. System life cycle processes. URL: <https://www.iso.org/standard/63711.html>

15. **ISO/IEC/IEEE 12207:2017** Systems and software engineering. Software life cycle processes. URL: <https://www.iso.org/standard/63712.html>

16. **Systems engineering handbook.** A guide for system life cycle processes and activities. Fourth edition. INCOS-TP-2003-002-04. Hoboken, John Wiley & Sons. 2015. 305 p.

17. **American Institute of Aeronautics and Astronautics.** Guide to the Preparation of Operational Concept Documents. ANSI/AIAA G-043B—2018 URL: <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/4.105487.001>.

18. **INCOS-TP-2010-006-01.** Version/Revision: 1. 2012. URL: <https://www.incose.org/products-and-publications/technical-publications>.

19. **ГОСТ Р 15.201—2000** Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. М.: Стандартинформ, 2008. 17 с.

20. **ГОСТ 34.602—89** Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы. М.: Стандартинформ, 2009. 18 с.

21. **SAE AIR 6110** Contiguous aircraft/system development process example: 2011. URL: <https://www.sae.org/standards/content/air6110/>

22. **ISO/IEC/IEEE 15289:2017** Systems and software engineering. Content of life-cycle information items (documentation). URL: <https://www.iso.org/standard/71950.html>.

23. **ISO/IEC/IEEE 42010:2011** Systems and software engineering. Architecture description. URL: <https://www.iso.org/standard/50508.html>

24. **Architecture** Viewpoint Library. URL: <http://www.iso-architecture.org/viewpoints/>

25. **S1000D-B6865-01000-00** International specification for technical publications using a common source database. Issue No. 4.2. AeroSpace and Defence Industries Association of Europe — ASD. 2016. URL: <http://public.s1000d.org/Pages/Home.aspx>.

## Requirements Engineering at a Modern Industrial Enterprise

**V. K. Batovrin**, batovrin@mirea.ru, MIREA — Russian Technological University, Moscow, 117454, Russian Federation, **B. A. Pozin**, bpozin@ec-leasing.ru, JSC "EC-leasing", Moscow, 117587, Russian Federation; National Research University Higher School of Economy, Moscow, 101000, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Batovrin Victor K.**, Head of Department, MIREA — Russian Technological University, Moscow, 117454, Russian Federation,  
E-mail: batovrin@mirea.ru

The article discusses the key problematic issues of requirements engineering in relation to the projects implemented by industrial enterprises. The enterprise that leads the development, implementation, operation and maintenance processes throughout complex technical systems life cycle is considered. The vital need to state requirements engineering processes at a modern level within the framework of production cooperation is shown in the context of ensuring the integrity and consistency of project activities. The main problems of the absence of mature requirements engineering throughout the life cycle of a complex technical system are discussed. The estimation of the scope of such problems for the aviation industry as an example is given. It is shown that the key success factor to solve these problems is the creation of subdivisions responsible for the forming of various types of requirements and maintaining their integrity and traceability throughout the life cycle of a complex technical system, as well as complex automation of these activities. The objectives, results and content of the basic processes of requirements engineering as well as the modern standards and best practices in this area are discussed. The method for the eliciting, managing and specification of requirements during the life cycle of the technical system is proposed in that context. It is shown that it is possible to ensure two-way traceability between the most important entities: the hierarchies of functional requirements and system requirements, the system architecture and the identified configuration objects when using this method.

**Keywords:** requirements engineering, requirements eliciting, requirements quality, requirements documentation, requirements traceability

For citation:

**Batovrin V. K., Pozin B. A.** Requirements Engineering at a Modern Industrial Enterprise, *Programmnyaya Ingeneriya*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 114–124.

DOI: 10.17587/prin.10.114-124

## References

1. **Wieggers K., Beatty J.** *Software Requirements (3rd Edition) (Developer Best Practices)*, Microsoft Press, 2013. 673 p.
2. **Pohl K.** *Requirements Engineering: Fundamentals, Principles, and Techniques*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 814 p.
3. **Hull E., Jackson K., Dick J.** *Requirements Engineering (4th Edition)*. Springer-Verlag, 2017, 239 p.
4. **Pozin B. A.** Problemy programnoy inzhenerii na sovremennom etape yeye razvitiya (Software engineering problems of at the present stage of its development), *Programmnyaya inzheneriya*, 2011, no. 1, pp. 2–6 (in Russian).
5. **Mezhgosudarstvennyy aviatsionnyy komitet.** *Aviatsionnyye pravila. Chast' 25. Normy letnoy godnosti samoletov transportnoy kategorii* (Aviation rules. Part 25. Airworthiness standards for aircraft of a transport category). 2015, 288 p., available at: <http://www.armak-iac.org/dokumenty/aviatsionnyye-pravila/> (in Russian).
6. **Airframer:** *The aerospace manufacturing directory*, available at: <http://www.airframer.com/default.html>
7. **ISO/IEC 15026-3:2015** Systems and software engineering. Systems and software assurance. Part 3: System integrity levels, available at: <https://www.iso.org/standard/64842.html>
8. **GOST R ISO / MEK 15026-4–2016** Sistemnaya i programmnyaya inzheneriya. Garantirovaniye sistem i programmnoy obezpecheniya. Chast' 4. Garantii zhiznennogo tsikla (Systems and software engineering. Systems and software assurance. Part 4. Assurance in the life cycle), available at: <https://www.gost.ru/portal/gost/home/standarts/catalognacional/> (in Russian).
9. **SAE ARP4754A:2010** Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems, available at: <https://www.sae.org/standards/content/arp4754a/>
10. **Mezhgosudarstvennyy aviatsionnyy komitet.** *Aviatsionnyy registr. Rukovodstvo R-4754a po razrabotke vozdukhnykh sudov i sistem* (Manual R4754A on the development of aircraft and systems), Moscow, Aviaregistr MAK, 2016, 103 p. (in Russian).
11. **Batovrin V. K., Balashov Yu. V.** Upravleniye konfiguratsiyey v proyektakh sozdaniya slozhnykh sistem (Configuration management in complex systems projects), *Upravleniye proyektami i programmami*, 2017, no. (52), pp. 250–263 (in Russian).
12. **Project Performance International Requirements Management Tools List.** PPI, 2015, available at: <https://www.ppi-int.com/wp-content/uploads/2017/07/PPI-005107-5-RqtsManToolList-151008.pdf> (in Russian).
13. **ISO/IEC/IEEE FDIS 29148:2017** Systems and software engineering. Life cycle processes. Requirements engineering, available at: <https://www.iso.org/standard/72089.html>
14. **ISO/IEC/IEEE 15288:2015** Systems and software engineering. System life cycle processes, available at: <https://www.iso.org/standard/63711.html>
15. **ISO/IEC/IEEE 12207:2017** Systems and software engineering. Software life cycle processes, available at: <https://www.iso.org/standard/63712.html>
16. **Systems engineering handbook. A guide for system life cycle processes and activities**, Fourth edition, INCOSE-TP-2003-002-04. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2015, 305 p.
17. **American Institute of Aeronautics and Astronautics.** ANSI/AIAA G-043B–2018. Guide to the Preparation of Operational Concept Documents, available at: <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/4.105487.001>
18. **INCOSSE** Guide for Writing Requirements. INCOSE-TP-2010-006-01. Version/Revision: 1. 2012, available at: <https://www.incose.org/products-and-publications/technical-publications>
19. **GOST R 15.201–2000** Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Produktsiya proizvodstvenno-tekhnicheskogo naznacheniya. Poryadok razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. System development and delivery of products for production. (Products for industrial purposes. The order of development and delivery of products for production), Moscow, Standartinform, 2008, 17 p. (in Russian).
20. **GOST 34.602–89** Kompleks standartov na avtomatizirovaniye sistemy. Tekhnicheskoye zadaniye na sozdaniye avtomatizirovannoy sistemy. (Set of standards for automated systems. Terms of Reference for the creation of an automated system), Moscow, Standartinform, 2009, 18 p. (in Russian).
21. **SAE AIR 6110** Contiguous aircraft/system development process example: 2011, available at: <https://www.sae.org/standards/content/air6110/>
22. **ISO/IEC/IEEE 15289:2017** Systems and software engineering. Content of life-cycle information items (documentation), available at: <https://www.iso.org/standard/71950.html>
23. **ISO/IEC/IEEE 42010:2011** Systems and software engineering. Architecture description, available at: <https://www.iso.org/standard/50508.html>
24. **Architecture** Viewpoint Library, available at: <http://www.iso-architecture.org/viewpoints/>
25. **S1000D-B6865-01000-00** International specification for technical publications using a common source database. Issue No. 4.2. AeroSpace and Defence Industries Association of Europe — ASD, 2016, available at: <http://public.s1000d.org/Pages/Home.aspx>