

# АДАПТАЦИЯ ЛУЧШИХ МИРОВЫХ ПРАКТИК ПО ОЦЕНКЕ УРОВНЕЙ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ, УРОВНЕЙ ГОТОВНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ, СИСТЕМНОГО УРОВНЯ ГОТОВНОСТИ

Баданов А.Ю.<sup>1</sup>, Рызванов Р.А.<sup>2</sup> ©

<sup>1</sup>Инженер 1к.; <sup>2</sup>Инженер-программист 1к.

Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), г. Жуковский

## *Аннотация*

*Статья описывает адаптацию мировых практик по оценке уровней готовности технологий, уровней готовности интеграции и уровень готовности системы. В статье описаны чек-листы уровней готовности интеграции, приведены формулы для расчета уровня готовности системы. Показан пример применения практик системной инженерии.*

**Ключевые слова:** системная инженерия, уровни готовности технологий, уровни готовности интеграции, уровень готовности системы.

**Keywords:** systems engineering, technology readiness level, integration readiness level, system readiness level.

Разработку и интеграцию сложной системы очень часто считают слишком дорогими работами, связанными со значительными рисками по стоимости, соблюдению графика работ и в достижении технической эффективности для менеджеров по программному обеспечению, системных инженеров и коллективов разработчиков. В данной статье представлено продолжение научно-исследовательских работ коллективом авторов, проведенных ранее, направленных на анализ и адаптацию передового зарубежного и отечественного опыта оценки уровня зрелости технологий, с перспективой развития в сторону численной оценки уровней готовности интеграционных и системных с помощью чек-листов, в рамках комплексной научно-исследовательской программы по созданию обеспечивающей системы управления созданием НТЗ авиационной отрасли РФ.

Использование признанных международным сообществом методик и инструментов их реализации при разработке наукоемкой технической продукции, в частности авиационно-космической техники, позволит отечественным разработчикам технологий более эффективно участвовать в совместной разработке новых технологий и образцов ЛА.

Таковыми унифицированными средствами являются: методология системной инженерии (Systems Engineering), методика оценок готовности технологии - TRA (Technology Readiness Assessment), методика оценки уровней готовности технологий - TRL (Technology Readiness Levels); методика оценки уровней готовности производства - MRL (Manufacturing Readiness Levels); методика оценки уровней готовности программ - PRL (Programmatics Readiness Levels); методика оценки уровней готовности интеграции (технологий) - IRL (Integration Readiness Level); методика оценки уровня готовности систем - SRL (System Readiness Level). Данные методики применяются в различных государственных структурах и крупных фирмах: DoD (министерство обороны США), DoE (министерство энергетики США), NASA, EADS, Lockheed-Martin, ESA, Northrop Grumman и других.

TRA представляет собой краткую характеристику (снимок во времени) зрелости технологий и их готовности к внедрению в план проекта разрабатываемой целевой системы и в график выполнения работ[1]. Technology Maturation Plan (TMP) - это документ планирования, который в деталях описывает этапы, необходимые для разработки технологий, являющихся менее зрелыми, чем желательно, до того момента, когда они будут готовы к внедрению в проект. TRAs и TMPs - это эффективные инструменты управления для

уменьшения технических рисков и минимизации возможностей увеличения затрат на технологии и отставаний от графика работ.

Обязательное проведение оценок технологической готовности Technology Readiness Assessments (TRAs), совершенствование процедур в части увязки TRL с процессами интеграции, компонентов и подсистем с временными, стоимостными и прочими ограничениями, а также желание иметь приемлемые для решения задач управления (планирования, оценки, контроля) интегральные количественные показатели состояния и эффективности разработки новых высокотехнологичных систем, привели к появлению ряда количественных метрик готовности (TRL, SRL, IRL, MRL, PRL и т.д.).

Создание приемлемых для использования на практике метрик/показателей и процедур оценки на их основе призвано дополнить действие аналогичных, используемых повсеместно, многообразных—показателей экономической, и финансовой результативности, и эффективности деятельности предприятий.

Главная цель использования уровней готовности технологии состоит в том, чтобы помочь с принятием решений, касающихся разработки технологии, чтобы гарантировать способность выполнения заданной миссии целевой системы. Пробел между зрелостью технологии и требованиями к проекту целевой системы представляет собой риски.

В данном случае преимущества использования уровней готовности технологий включают:

- обеспечение общего стандарта для периодически измеряемых и передаваемых по средствам коммуникации данных о готовности новых технологий или новых применений существующих технологий в заданный момент времени в цикле осуществления проекта;

- предоставление оценки (меры) риска в качестве инструмента измерения;
- содействие в принятии решений, касающихся финансирования технологии;
- содействие в принятии решений, касающихся преобразования технологии;
- содействие в выборе наилучшего альтернативного варианта технологии.

TRA - это систематический, опирающийся на метрический базис процесс, сопровождаемый отчетом с оценками зрелости некоторых—технологий (называемых элементами новых важнейших технологий Critical Technology Elements (CTEs)), используемых в системах.

TRA является оценкой, показывающей, насколько далеко продвинулась разработка технологии на базе документального доказательства. Это не критерий прохождения/непрохождения и не предполагается предоставление ценностного суждения разработчиков технологии или программы разработки технологии. Это процесс обзора-рецензии, способствующий проведению демонстрации новейших технологий, отраженных в плане осуществления проекта, показывающий, что технологии работают, как предполагалось, (готовность технологии) прежде, чем будут произведены расходы на конструирование. Оценки TRA должны выполняться квалифицированным техническим персоналом, не зависящим от проекта. Оценка TRA может:

- выявлять пробелы в программе испытаний, демонстрировании и знаниях текущего уровня готовности технологии и отсутствие информации и этапов, необходимых для достижения уровня готовности, требуемого для успешного включения в проект;

- идентифицировать уязвимые технологии с риском, которым требуется повышенное внимание руководства или дополнительные ресурсы для разработки технологии;

- повышать прозрачность принимаемых руководством решений путем определения ключевых технологий, которые продемонстрировали свою работоспособность, или путем обнаружения незрелых или не апробированных технологий, которые могут привести к возрастанию риска проекта.

Модель процесса TRA состоит из трех последовательных этапов:

1. Идентификация критических элементов технологии (СТЕ). Элементы СТЕ - это подверженные риску технологии, которые важны для успешной работы установки или

оборудования. Они новые или применяются новыми либо оригинальными способами и в необычной среде.

2. Процедура оценки уровня готовности технологии (TRL). Для DoD и NASA использовалась шкала TRL, которая так же принята руководством по охране окружающей среды ЕМ в их пилотной программе демонстрации для проведения оценок готовности технологии[2]. В других программах Департамента энергетики (DOE) при разработке руководств и описаний собственных программ, необходимо учитывать опыт по оценке готовности технологий, полученные ЕМ, DoD и NASA, собственную область применения, и свой опыт в измерении готовности технологии для конкретных проектов и программ. TRL показывает уровень зрелости данной технологии, это не показатель качества реализации технологии в проекте. Для получения достоверных оценок нужно проводить испытания в соответствующей среде, а испытываемая технология должна иметь соответствующую шкалу и точность воспроизведения.

3. Разработка плана дозревания технологии (TMP). Если уровень TRL для СТЕ не соответствует ожидаемому уровню на каждом уровне принятия критического решения, то требуется довести незрелую технологию до соответствующего уровня зрелости. В ходе разработки или ревизии плана дозревания технологии (Technology Maturation Plan - TMP), определяются виды деятельности, необходимые для доведения незрелых элементов СТЕ до желаемого TRL.

Процедура оценки уровня готовности технологий и технологических направлений производится на ранних стадиях исследований перспективной целевой системы, когда ее архитектура и сценарии применения точно не определены (обычно при проведении фундаментальных и прикладных исследований, научно-исследовательских работ), выбор критических технологий или критических элементов технологий определяется экспертным путем.

В справочнике TRA также сказано, что «оценки TRA не следует считать единственно обоснованными доводами выявления риска технологии», необходимо наличие дополнительных метрик для оценки зрелости разработок в области сложных систем.

Уровень TRL является показателем степени развитости конкретно взятой технологии посредством описания, что было сделано и при каких условиях в определённый момент времени. Так же уровень готовности подтверждается документами, которые определены в вопросах данного уровня[3].

В случае если уровень готовности технологии является недостаточным для продолжения работ по проекту, необходимо разработать TMP, в котором описать перечень мероприятий для доведения степени развития технологии до заданного уровня, с точки зрения параметров времени, стоимости и риска работы по проекту, для чего также необходимо определить:

- тезаурус для обсуждения и качественной оценки зрелости технологий;
- точку отсчёта для оценки технологий, определяющую исходные данные для оценки рисков по включению технологии в существующую или новую программу.

Основные этапы процесса оценки технологии:

1. Определение систем, подсистем и компонентов посредством разбиения продукта на составляющие на этапе предпроектных работ;
2. Назначение TRL для каждого компонента, основанного на оценке зрелости;
3. Назначение TRL для каждой подсистемы, основанного на наименьшем TRL, входящих в неё компонентов;
4. Назначение TRL для каждой системы, основанного на наименьшем TRL, входящих в неё подсистем;
5. Определение всех компонентов, подсистемы и системы, которые находятся на более низком TRL, чем требуется программой (проектом);
6. Оформление отчёта по первоначальной оценке технологий программы, уровень готовности которых ниже требуемого;

7. Разработка:

- плана развития технологий;
- бюджета (плана финансирования);
- план-графика;
- плана управления рисками;

8. Проведение повторной оценки проекта с корректировкой планов и принятием решения о продвижении программы (проекта).

Как TRL используется для оценки риска, связанного с развитием технологий, IRL оценивает риск интеграции технологий. IRL метрика обеспечивает систематическое измерение готовности интеграции развивающейся технологии с другой технологией.

Например, система, изображенная на рисунке 1, состоит из двух проектов развития технологий. Каждый проект имеет соответствующий TRL. Интеграция представляет собой процесс сборки отдельных компонентов в единую систему функционирования. Мало того, что каждый отдельный компонент технологии должен быть разработан, необходимо завершить работы по интеграции между технологиями для получения желаемой системы.

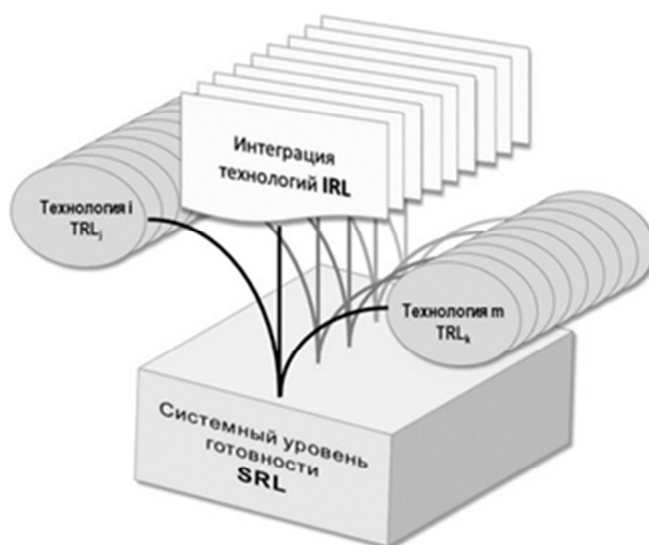


Рис. 1 - Системный уровень готовности

При создании системы из разрабатываемых технологий очень большое значение имеет правильное решение вопроса о совместимости разрабатываемых технологий в системе. Очень важно, еще на этапе разработки технологий, оценить уровень их совместной интеграции в единую систему. Именно для этих целей предназначены и используются уровни готовности интеграции (технологий) - IRL. В таблице 1 представлены для каждого из 9-ти уровней IRL унифицированные признаки и дополнительные описания.

Таблица 1

**Детальное описание уровней готовности интеграции**

Уровень IRL УГИ	Значение уровня IRL	Детальное описание уровня IRL
1	Интерфейс между технологиями определен с детализацией, достаточной для дальнейшего проектирования взаимодействия	Это низший уровень готовности к интеграции, на котором выбирается среда интеграции.

Уровень IRL УГИ	Значение уровня IRL	Детальное описание уровня IRL
2	<p>Определена спецификация характеризующая взаимодействие (способность оказывать влияние) между технологиями через интерфейс.</p>	<p>После определения среды интеграции, должен быть выбран метод такой, что две интегрируемые технологии способны влиять друг на друга через выбранную среду. На этой стадии утверждается концепция интеграции.</p>
3	<p>Достигнута совместимость (общий язык) технологий, позволяющая обеспечить их упорядоченную и эффективную интеграцию и взаимодействие.</p>	<p>Минимально требуемый уровень для обеспечения успешной интеграции. Две технологии способны не только влиять одна на другую, но и передавать интерпретируемые данные. Это первый реальный уровень зрелости в процессе интеграции.</p>
4	<p>Достигнуто качество взаимодействия и гарантируется интеграция между технологиями.</p>	<p>Много процессов интеграции технологии завершили неудачно на уровне УГИ 3 из-за предположения, что, если две технологии способны успешно обмениваться информацией, тогда они полностью интегрированы. УГИ 4 идет дальше простого обмена данными и требует, что данные полученные соответствовали данным отправленным и существует механизм для проверки этого.</p>
5	<p>Достигнут достаточный уровень управления технологиями, чтобы устанавливать, поддерживать и прекращать взаимодействие.</p>	<p>Обозначает способность одной или нескольких интегрируемых технологий самостоятельно управлять интеграцией (устанавливать, поддерживать и прекращать взаимодействие).</p>
6	<p>Интегрируемые технологии могут принять, преобразовать и структурировать информацию по назначению.</p>	<p>Высший технический уровень, который может быть достигнут, он включает способность не только управлять интеграцией, но и определять какой информацией обмениваться, метки, определяющие, что это за информация, способность транслировать данные из внешнего формата в внутренний.</p>
7	<p>Интеграция технологий была верифицирована и валидирована с достаточной для использования степенью детализации.</p>	<p>Представляет собой значительный по сравнению с УГИ 6 шаг, интеграция работает не только с технической точки зрения, но и с точки зрения требований. УГИ 7 подтверждает соответствие интеграции требованиям по производительности, пропускной способности и надежности.</p>

Уровень IRL УГИ	Значение уровня IRL	Детальное описание уровня IRL
8	Реальная интеграция завершена и проверена испытаниями и демонстрацией в составе системы.	Представляет не только соответствие интеграции требованиям, но и демонстрацию в составе системы в релевантном окружении. Это позволяет выявить любые неизвестные ошибки/дефекты, которые не могут быть обнаружены до тех пор, пока взаимодействие двух интегрируемых технологий не проверяется в составе системы.
9	Возможность интеграции проверена в применении.	Технологии использованы в составе системы. Чтобы технология достигла УГТ 9, она должна быть интегрирована в систему и после проверена в релевантном окружении. Переход на УГИ 9 также влияет на достижение технологией уровня зрелости УГТ 9.

Существует взаимосвязь между стадиями разработки технологии и стадиями интеграции технологий (от более простых к более сложным)—краткое описание которой, приведено на рисунке 2.

Технология - элемент		Интеграция - интерфейс	
TRL	Описание УГТ	IRL	Описание УГИ
9	Доказательство готовности системы к эксплуатации (в воздухе) через ее успешное функционирование в ходе выполнения полетов.	9	Интеграция подтверждена в успешной работе.
8	Завершение разработки и подтверждение пригодности системы в ходе летных испытаний и демонстрации (на земле и в воздухе).	8	Интеграция завершена и подтверждена испытаниями.
7	Демонстрация прототипа в условиях его будущей эксплуатации (земля, воздух, космос).	7	Произведена валидация и верификация технологий интеграции.
6	Демонстрация систем/подсистем модели или прототипа в релевантной среде.	6	Технологии могут принимать, обрабатывать, структурировать информацию для дальнейшего использования.
5	Компонент и/или макет средней точности. Валидация в релевантной среде.	5	Существует необходимый контроль над интеграцией, который позволяет устанавливать, управлять и прекращать интеграцию.
4	Компонент и/или макет низкой точности, который демонстрирует только функциональные возможности. Валидация в лабораторной среде.	4	Достигнут достаточный уровень качества и уверенности в интеграции технологий.
3	Подтверждение критических параметров и/или характеристик концепции аналитическим или экспериментальными методами.	3	Налажено взаимодействие между технологиями.
2	Формулировка концепции технологии и/или сферы ее применения.	2	На достаточном уровне определено взаимодействие между технологиями через их интерфейс.
1	Анализ и утверждение базовых принципов технологии.	1	Интерфейс между технологиями идентифицирован в достаточной степени для определения отношений этих технологий.

Уровни готовности технологий

Уровни готовности интеграции

Рис. 2 - Взаимосвязь уровней готовности технологий (TRL), и уровней интеграции технологий (IRL)

Как указывалось, ранее, одной из главных целей настоящей статьи является начало разработки верифицированного и валидированного набора метрик которые могли бы быть полезными при разработке более сложной, комплексной методологии оценок, когда рассматривается еще и сложность интеграции. Для более точного определения уровня интеграции технологии в данной статье предлагается подход по использованию чек-листов, аналогичный методике, заложенной в калькуляторе УГТ. Таким образом, при создании чек-листов IRL были использованы статьи и стандарты системной инженерии, исследования и другие руководящие документы[4]. Ниже представлены девять чек-листов IRL по каждому уровню.

Таблица 2

### Перечни вопросов для каждого уровня IRL

IRL 1
1. Идентифицированы главные технологии интеграции

2. Определены функциональная архитектура верхнего уровня и интерфейсные точки
3. Известно и задокументировано наличие главных технологий
4. Определен/начерчен план-концепция интеграции
5. Определен/начерчен план-концепция испытания интеграции
6. Определены/вычерчены высокоуровневая концепция операций и главные примеры использования
7. Определены/вычерчены метод/ подход к последовательным программам интеграции
8. Определен начертан план управления интерфейсами
9. Главные требования к интеграции (установки, аппаратура, программы, причиндалы и т.д.) определены и начертаны
10. Определена роль, обязанности и ответственности специалистов команды по интеграции и испытаниям
<b>IRL 2</b>
1 Главные технологии интеграции функционируют как автономные блоки
2. Входн./выходн. данные главных технологий интеграции известны, охарактеризованы и задокументированы
3 Определены/составлены основные требования к интерфейсам технологий интеграции
4 Определены/составлены спецификации основных требований к технологиям интеграции
5 Определены/описаны основные риски технологий интеграции
6 Обновлены концепция/план интеграции
7 Обновлены концепция/план испытаний интеграции
8 Обновлены высокоуровневая концепция операций и основные сценарии использования
9 Обновлены метод/график работ последовательных операций интеграции
10 Обновлен план контроля/управления интерфейсом
11 Обновлены требования к интеграции и ресурсам испытаний (установки, аппаратура, программы, суррогатные средства и т.д.)
12 Иницированы крупномасштабные планирование/координация интеграции и ресурсов испытаний
13 Обновлены роль, ответственность и обязанности команды по интеграции и испытаниям
<b>IRL 3</b>
1 Проведено предварительное моделирование /или аналитические исследования, чтобы выявить риски и произведена оценка на совместимость технологий интеграции
2 Определены (первоначальный вариант) риски совместимости и соответствующие стратегии их уменьшения для технологий интеграции
3 Определены (первоначально) требования к испытаниям интеграции
4 Завершены диаграммы высокоуровневой системы
5 Определены требования к интерфейсам на концептуальном уровне
6 Завершена инвентаризация внешних интерфейсов
7 Идентифицированы и задокументированы блоки инженерии данных
8 На базе предварительных анализов модифицированы/обновлены концепция интеграции и другие документы планирования
<b>IRL 4</b>
1 Завершен и реализован план гарантии качества
2 Полностью идентифицированы / охарактеризованы риски кросс-технологии
3 Использование средств моделирования для проведения имитации интерфейсов между компонентами
4 Начало созревания разработки архитектуры формальной системы
5 Известны/приняты за базис требования к комплексной системе для применений



конечным пользователем
6 Завершены с благоприятным исходом лабораторные/программные стендовые испытания интеграции систем с использованием имеющихся технологий интеграции
7 Завершены и испытаны в лабораторной среде интеграция и инженерия «системы» технологии воспроизведения с низкой точностью
8 Полностью определены концепция операций, сценарии использования и требования к интеграции
9 Завершен анализ требований к внутренним интерфейсам
10 Определены метод(ы) и спецификации передачи информации
11 Осуществлен процесс тщательного инспектирования (проверки) требований
<b>IRL 5</b>
1 Выполнен план управления интерфейсом (т.е., создан документ управления интерфейсом, сформирована рабочая группа управления интерфейсом и т.д.).
2 Выполняются оценки риска интеграции
3 Реализуются стратегии ослабления рисков & риски уменьшены
4 Составлены черновые спецификации требований к интерфейсам системы
5 Правильно определены внешние интерфейсы (напр., источник, форматы данных, структура, контент, метод поддержки и т.д.)
6 Успешно продемонстрирована функциональность интегрированных элементов конфигурации (модули/ /функции/узлы) в лабораторной/ /искусственной среде
7 Рассмотрение интеграции и связанных с ней интерфейсов в Плане управления системной инженерией
8 Определены метрики тестирования интеграции для сквозных испытаний
9 Успешно произведены моделирование и имитация данных технологии интеграции
<b>IRL 6</b>
1 Завершены выходные измерения кросс-технологии, и проведена валидация рабочих характеристик производительности (characteristic validations completed)
2 В сборочные модули загружены компоненты ПО (операционная система, промежуточное ПО, приложения)
3 Протестированы отдельные модули, чтобы убедиться в совместной работоспособности модульных компонентов (их функциональности)
4 Стабилизирован процесс управления интерфейсом и документирования
5 Успешно завершены демонстрации интегрированной системы
6 Подготовлены системы логистики для обеспечения интеграции
7 Успешно проведена оценка готовности среды (условий) испытаний
8 Успешно проведены испытания передачи данных
<b>IRL 7</b>
1 Успешно продемонстрирована сквозная функциональность интеграции систем
2 Каждый системный/программный интерфейс протестирован отдельно в условиях стресса и аномалий
3 Полностью интегрированный прототип продемонстрирован в реальной или смоделированной рабочей среде (simulated operational environment)
4 Контент данных управления информацией верифицирован в системе
5 Интерфейс, данные и функциональная верификация
6 Запланированы и реализованы коррективные меры
<b>IRL 8</b>
1 Все интегрированные системы могут удовлетворять общим системным требованиям в рабочих условиях
2 Системные интерфейсы сертифицированы и правильно функционируют в рабочих условиях
3 Завершены испытания интеграции с документированием результатов испытаний,

аномалий, дефектов, недостатков и коррективных действий
4 Сформированы компоненты, настроены и функционируют в совместимости с рабочей системой
5 Сформирована система, отлажена и функциональна для предназначенного применения и рабочих условий
6 Выполнен/завершен процесс управления интерфейсом
7 Представлены на рассмотрение окончательные диаграммы архитектуры
8 Продемонстрирована эффективность принятых коррективных мер для выполнения главных конструктивных требований
9 Выявлены, охарактеризованы и зарегистрированы ошибки передачи данных
10 Эффективное управление каналами передачи данных и инициирование процесса усовершенствований
<b>IRL 9</b>
1 Демонстрация эксплуатационной эффективности полностью интегрированной системы и ее пригодности к работе в предполагаемых или репрезентативных рабочих условиях
2 Полностью охарактеризована частота сбоев/отказов интерфейсов, что соответствует требованиям пользователя
3 Затраты на поддержку жизненного цикла соответствуют требованиям пользователей, и приняты инициативные программы уменьшения этих затрат

У разработчиков технологий и тех, кто её внедряет, всегда существует проблема: как донести до стейкхолдеров, что прогресс есть и можно ожидать заявленных результатов. TRL и IRL предназначены способствовать такому диалогу и тем самым содействовать коммерциализации технологии, совместным разработкам с новыми партнерами, планированию привлечения поставщиков и выводу новых технических средств на рынок. Уровни готовности могут также быть полезными в самооценке, мониторинге прогресса и при планировании целей и действий. Имеется ряд преимуществ, реализуемых благодаря общему взаимопониманию. Когда собираются и интегрируются компоненты, их индивидуальные TRL и IRL вносят свой вклад в готовность всего компоуемого узла. Интегрированные системы могут содержать компоненты с различными уровнями готовности, влияя на состояние сборки в целом. В таких случаях при использовании уровней готовности можно выделять некоторые области и устанавливать их приоритеты для достижения наибольших успехов.

С учетом временных рамок, уровни готовности помогают отображать направление разработок или сроки реализации технологий следующего поколения. Уровни готовности также предлагают возможности оценки сложных систем на высоком уровне, например, электрификацию транспорта, и концентрировать внимание на комплектующих компонентах, таких как технологии аккумуляторов, в то время как, УГИ позволяют производить оценку интеграции инфраструктур.

#### **Описание методики расчета SRL**

Уровень готовности системы (SRL). SRL это индекс для оценки зрелости системы, который дополняет существующие инструменты системной инженерии для принятия решений на стадиях жизненного цикла (ЖЦ). SRL метод объединяет технические риски и вопросы интеграции на системном уровне, и предлагает точные и эффективные средства оценке готовности системы.

Методика SRL учитывает уровни готовности технологий - TRL и уровни готовности интеграции (технологий) - IRL, входящих в разрабатываемый продукт, систему и предлагает средства расчета уровня готовности системы - SRL.

Предложенная методика, использует нормированные матрицы TRL и IRL индексы для расчета SRL системы обозначенный как SRLсистемы. Подход для вычисления SRL системы можно описать следующим образом:

- создать столбец, состоящий из значений TRL для каждой технологии;
- создать матрицу, состоящую из IRL значений;
- используя нормированные TRL и IRL матрицы, соответственно, вычислить SRL столбец;
- вычислить SRL индекс для всей системы, SRLсистемы. SRLсистемы представляет собой индекс зрелости от 0 до 1 и применяется на системном уровне.

Допустим, проект имеет связанное значение TRL в диапазоне от 1 до 9. TRL столбец определяется формулой 1 и состоит из одной колонки, содержащей значения TRL по каждой технологии в системе, т.е.  $TRL_i$  является значением TRL для технологии  $i$ . Столбец TRL выглядит следующим образом:

$$[TRL]_{n \times 1} = \begin{bmatrix} TRL_1 \\ TRL_2 \\ \vdots \\ TRL_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Для расчета IRL необходимо построить матрицу интеграции технологий - определить степень взаимодействия различных технологий (эту оценку производит команда по интеграции, в соответствии с таблицей \_ интеграционные уровни готовности IRL). IRL-матрица показывает, как интегрируются технологии друг с другом с позиции общей системы. Для системы из N технологий  $IRL_{ij}$  это IRL между технологиями  $i$  и  $j$ . Матрица интеграции технологии выглядит следующим образом:

$$[IRL]_{n \times n} = \begin{bmatrix} IRL_{11} & IRL_{12} & \dots & IRL_{1n} \\ IRL_{21} & IRL_{22} & \dots & IRL_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ IRL_{n1} & IRL_{n2} & \dots & IRL_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Формула для расчета SRL столбца выглядит так:

$$[SRL]_{n \times 1} = [IRL]_{n \times n} * [TRL]_{n \times 1} \quad (3)$$

SRL столбец состоит из одного значения для каждой технологии, определяет уровень готовности конкретной технологии с учетом интеграции по отношению ко всем остальным технологиям в системе. Также принимается во внимание уровень развития технологии посредством её TRL.

Для системы с N технологиями SRL считается так следующим образом:

$$[SRL] = \begin{bmatrix} SRL_1 \\ SRL_2 \\ \dots \\ SRL_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} IRL_{11} TRL_1 + IRL_{12} TRL_2 + \dots + IRL_{1n} TRL_n \\ IRL_{21} TRL_1 + IRL_{22} TRL_2 + \dots + IRL_{2n} TRL_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ IRL_{n1} TRL_1 + IRL_{n2} TRL_2 + \dots + IRL_{nn} TRL_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

SRL общей системы представлен формулой 5. Где  $n$  - это количество интеграций с технологией  $i$  plus интеграция на саму себя.

$$SRL = \frac{SRL_1 + SRL_2 + \dots + SRL_n}{n} \quad (5)$$

В таблице 3 представлено унифицированное определение фазы и описание для диапазонов значений уровней готовности системы - SRL [5].

Таблица 3

### Уровни SRL

SRL	Фаза	Описание
0,90-1,00	Эксплуатация и поддержка.	Поддерживать систему в самой эффективной форме работы на протяжении всего жизненного цикла.
0,80-0,89	Производство.	Достичь рабочих параметров удовлетворяющих потребности пользователей.

<b>SRL</b>	<b>Фаза</b>	<b>Описание</b>
0,60-0,79	Разработка и демонстрация системы.	Разработка системы, уменьшение рисков интеграции и производства, реализовать механизмы поддержки. Обеспечить доступность и защиту критической информации. Продемонстрировать интеграцию системы, надежность и полезность.
0,40-0,59	Развитие технологии.	Уменьшить риски технологии и определить подходящий набор технологий для интеграции в полную систему.
0,10-0,39	Концепция.	Улучшить начальную концепцию. Разработать стратегию системы.

Данные методики являются передовыми, как следствие их развитие продолжается не только в авиационной отрасли, но и в энергетике, строительстве, транспорте. Для эффективного использования данных методик на практике необходимо провести дополнительную работу по адаптации методик и создать программное обеспечение для прикладного применения в проектах авиационной отрасли. В целом, детальное изучение опыта зарубежных стран и, прежде всего США, в области технических экспертиз (и, в частности TRL, IRL, SRL) на различных этапах жизненного цикла разработки, производства, эксплуатации сложных и высокотехнологичных систем, например, таких, как авиационные системы - тема серьезная и требует детальных и отдельных исследований в области управления процессами системной инженерии.

Технические экспертизы, такие как оценки уровней готовности технологий, оценка уровней интеграции являются общепринятыми мировыми практиками. Эти экспертизы являются инструментами системной инженерии, которые предоставляют возможность для оценки прогресса и зрелости технологии, а также как эта технология движется через различные фазы и процессы жизненного цикла. Технические экспертизы являются важным инструментом контроля, для того чтобы руководители программы могли, используя их, оценить состояния системы и программы, переориентировав деятельность при необходимости, поэтому необходимо проводить адаптацию данных методик для авиационной отрасли РФ.

#### **Обозначения и сокращения**

УГТ - уровень готовности технологии,

НТЗ - научно-технический (технологический) задел,

ЛА - летательный аппарат,

НИР - научно-исследовательская работа,

AFRL - Air Force Research Laboratory (исследовательская лаборатория ВВС США),

TRL - Technology Readiness Levels (уровень готовности технологии),

MRL - Manufacturing Readiness Levels (уровень готовности производства),

PRL - Programmatic Readiness Levels (уровень готовности программы),

IRL - Integration Readiness Level (уровень готовности интеграции),

SRL - System Readiness Levels (уровень готовности системы),

CTE - Critical Technology Elements (критические элементы технологии).

DoD - Department of Defence (Министерство обороны США)

TRA - Technology Readiness Assessments (проведение оценок технологической готовности)

TMP - Technology Maturation Plan (документ планирования, который в деталях описывает этапы, необходимые для разработки технологий, являющихся менее зрелыми, чем желательно, до того момента, когда они будут готовы к внедрению в проект.)

#### **Литература**

1. Department of Defense directive 5000.01 [Электронный ресурс], - Режим доступа: <http://www.dtic.mil/whs/directives/corres/pdf/500001p.pdf>
2. Department of Defense instruction 5000.02 January 7, 2015 [Электронный ресурс], - Режим доступа: <http://www.navysbir.com/docs/500002p.pdf>
3. Systems Engineering Guide for Systems of Systems Version 1.0 August 2008 [Электронный ресурс], - Режим доступа: <http://www.acq.osd.mil/se/docs/SE-Guide-for-SoS.pdf> .
4. А.Ю. Баданов, Р.А. Рызванов; «Модель жизненного цикла системной инженерии для создания инновационного летательного аппарата», материалы XIX международной научно-практической конференции «Интеграция науки и практики как механизм эффективного развития современного общества» 12-13 апреля 2016г., г. Москва Институт стратегических исследований.
5. В.С. Криворученко, И.П. Дмитренко, А.Ю. Баданов, Р.А. Рызванов; «Уровни готовности и интеграции технологий», материалы XII международной научно-практической конференции «Интеграция науки и практики как механизм эффективного развития современного общества» 2014 г., г. Москва.