

ОРГАНИЗАЦИЯ НАУКИ И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СТАТЬЯ

УДК: 001.1: 001.89

JEL: Z 18

<https://doi.org/10.22394/2410-132X-2024-10-3-82-97>**ПОВЫШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ НИР:
ПЛАНИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ
СНИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ДВИГАТЕЛЕЙ****А.Д. КОНДРЯКОВ^{1,2}, А.В. САРТОРИ², Е.Ю. МАРЧУКОВ^{1,2},
А.В. СОЛОВЬЕВА², С.В. ЧУКЛИНОВ¹**¹ Московский Авиационный Институт, Москва, Российская Федерация, e-mail: tetra1337@mail.ru, evgeny.marchukov@okb.umpo.ru, mai@mai.ru² ОКБ им. А. Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО», Москва, Российская Федерация, e-mail: tetra1337@mail.ru, sartoriandrey@gmail.com, evgeny.marchukov@okb.umpo.ru, anastasiya.soloveva@okb.umpo.ru

Аннотация: В данной статье представлены основы и результаты применения методики Бережливого НИР к планированию как важнейшему инструменту повышения результативности инновационных разработок. Эффективность выполнения проекта повышается за счет пошагового алгоритма задания полного перечня основных испытаний по нарастающей сложности, который упрощает раннюю диагностику сбоев и снижает риск возникновения подводных камней на этапе проектирования. Представлена новая методика бережливого планирования, включающая определение срока готовности изделия к конструированию согласно дорожной карте, анализ структуры его критических элементов (КЭ) и определение текущего уровня их готовности, функциональный анализ КЭ и раздельное синхронное планирование разработки каждого из них, используя результаты выполнения детальных критериев достижения уровней технологической готовности (УГТ+) как контрольные точки проекта. Процесс бережливого планирования проиллюстрирован в области двигателестроения на примере разработки интегрированного стартера-генератора (СГ). Рассмотрены конкретные элементы структуры плана, проведен функциональный анализ КЭ СГ по внутренним и внешним основным и второстепенным воздействиям, их взаимодействиям, определены контрольные события плана по детализированным критериям УГТ+. Предлагаемый инструмент планирования позволяет снизить технологические риски, сократить время выполнения проекта, повысить результативность разработки инновационной техники.

Ключевые слова: Планирование НИР; результативность, снижение рисков, газотурбинный двигатель; критические элементы; уровни готовности технологий УГТ; стартер-генератор; контрольные события; функциональный анализ.

Информация о финансировании: Данное исследование выполнено без внешнего финансирования.

Для цитирования: Кондряков А.Д., Сартори А.В., Марчуков Е.Ю., Соловьева А.В., Чуклинов С.В. Повышение результативности НИР: планирование как инструмент снижения технологического риска при разработке двигателей // Экономика науки. 2024. № 10(3). С. 82–97. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2024-10-3-82-97>

GOVERNANCE OF SCIENCE AND MANAGEMENT ISSUES

ORIGINAL RESEARCH ARTICLE

UDC: 001.1: 001.89

JEL: Z 18

<https://doi.org/10.22394/2410-132X-2024-10-3-82-97>

INCREASING R&D EFFECTIVENESS: PLANNING AS A TOOL FOR REDUCING TECHNOLOGICAL RISK IN ENGINE DEVELOPMENT

**A.D. KONDRYAKOV^{1,2}, A.V. SARTORI², E.JU. MARCHUKOV^{1,2},
A.V. SOLOVIEVA², S.V. CHUKLINOV¹**

¹ Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation, e-mail: tetra1337@mail.ru, evgeny.marchukov@okb.umpo.ru, mai@mai.ru

² Lyulka Design Bureau, Moscow, Russian Federation, e-mail: tetra1337@mail.ru, sartoriandrey@gmail.com, evgeny.marchukov@okb.umpo.ru, anastasiya.soloveva@okb.umpo.ru

Abstract: This article presents the basics and results of applying the Lean R&D methodology in planning as a crucial tool for enhancing the success of innovative projects. By following a step-by-step process, the effectiveness of project execution is improved through a comprehensive list of key tests that increase in complexity. This approach simplifies early identification of potential issues and reduces the risk of errors during the design phase. A new lean planning method is introduced, including assessing the readiness of the designed product at the design stage based on a roadmap. It also involves analyzing the critical elements (CE) of the product and determining their current level of readiness. Additionally, a functional analysis of the CE is conducted, followed by separate planning for the development of each element. Finally, the project is checked against a set of criteria to achieve technology readiness levels (TRL+). The process of lean planning is demonstrated in the field of engine building through the case of integrated starter-generator (SG) development. Specific elements of the planning structure are considered, and a functional analysis of the SG's CE is conducted for both internal and external primary and secondary impacts. Their interactions and control events are determined according to detailed TRL+ criteria, allowing for the reduction of technological risks, shorter project execution times, and increased efficiency in innovative technology development through the use of this planning tool.

Keywords: R&D planning; gas turbine engine; risk mitigation, critical elements; TRL; starter-generator; milestones; functional analysis.

Funding: This study received no external funding.

For citation: Kondryakov, A.D., Sartori, A.V., Marchukov, E.Ju., Solovieva, A.V., Chuklinov, S.V. (2024). Increasing R&D effectiveness: planning as a tool for reducing technological risk in engine development. *Economics of Science*, 10(3), 82–97. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2024-10-3-82-97>

ВВЕДЕНИЕ

Повышение результативности исследований и разработок инновационных изделий является ключевым условием укрепления технологического суверенитета страны.

Разработка инновационных продуктов в авиастроении важна для поддержки конкурентоспособности на горизонте до 10–15 лет. Однако результативность технологических инновационных проектов не всегда удовлетворительна, внедрение инноваций занимает больше времени, требует больших

ресурсов, чем запланировано (Little, 2014). Одна из причин этого заключается в том, что теории управления не адаптированы в должной степени для практического планирования разработки радикальных инноваций.

Актуальность вопроса вызвана тем, что по доступной статистике вероятность внедрения технологических инноваций невысока (Соколов, 2017; Mavris, Vandte, Brewer, 1998; Сартори и др., 2020). Распространены случаи, когда неполное соответствие характеристик критических элементов

(КЭ)¹ техническому заданию выясняется только на стадии ОКР после завершения всего цикла НИР. Вследствие этого разработка тормозится и возвращается на более ранние уровни готовности.

В частности, в проектах НАСА в последние годы отмечается возрастание затрат до 20% и задержек до 12 месяцев (Charette, 2018) по сравнению с планами, что является максимумом за последние десять лет. В качестве основных причин этих негативных тенденций приводятся следующие: рискованные управленческие решения, непредвиденные технические проблемы, недооценка сложности интеграции и тестирования проектов менеджерами и техническими командами на уровне планирования.

Международный институт PMI в 2020 г. сфокусировал особое внимание на качественном изменении процессов управления проектами (The Project Economy, 2021). В еще большей степени это касается прикладных НИР, результативность которых весьма чувствительна к рациональному планированию ввиду своей уникальности, высоких рисков, разнообразия и неповторяемости (Carter, 2023; Сартори и др., 2020; Минко, 2014; Сартори, Манцевич, 2020; Митрофанова, 2020). Традиционные модели управления предполагают планирование на уровне организационных мероприятий, в то время как требование результативности разработки инженерного изделия выдвигает на первый план планирование по проверяемым результатам при соблюдении конкретных сроков.

Практические методики планирования разработки инновационных продуктов по результатам, применяемые в компаниях – технологических лидерах, являются инструментом повышения конкурентоспособности продукции и в открытой литературе не представлены.

Целью данного исследования является разработка детального алгоритма составления

плана НИР по разработке КЭ инженерных продуктов, обеспечивающих их конкурентоспособность. На основе функционального анализа в план пошагово включаются необходимые и достаточные испытания для всех альтернативных решений. При этом выбор решения с наименьшим риском минимизирует вероятность возврата к НИР со стадии испытаний КЭ в составе продукта.

В целях адаптации традиционных моделей управления проектами PMBOK (PMBOK Guide, 2017), Agile, Scrum, Kanban, MCDA (Wątrybski et al., 2019), SAFe, Lean, LeSS, Flow (Blank, 2021), Stage-Gate (Oorschot et al., 2010) к планированию по конкретным результатам с учетом высоких технических рисков в исследовании представлен универсальный алгоритм детального планирования необходимых и достаточных испытаний, результатов и подготовки на его основе полного технического задания при разработке сложного инженерного изделия. Алгоритм является важной составной частью модели Бережливого НИР (Сартори и др., 2020; Сартори, Манцевич, 2020; Сартори, 2022) и может использоваться на практике как совместно с моделью, так и самостоятельно для стадии разработки НИОКР.

Планирование ведется отдельно по КЭ изделия. В целях настоящей статьи критическими являются инновационные составные части, элементы и технологии их изготовления, без которых невозможно достичь конкурентоспособности продукта (ГОСТ Р 58048–2017).

Применение детальной матрицы критериев уровней готовности (УГТ+)² дает возможность вести планирование по конкретным результатам, а следовательно, позволяет осуществить оперативные корректирующие действия, повысить результативность работ, сократить количество и длительности возвратов на

¹ Критический элемент в рамках данной методики представляет составную часть изделия, удовлетворяющую следующим условиям:

– технологии применяются впервые и/или в неизвестных условиях,
– КЭ создает конкурентные преимущества конечному изделию, которые иначе достичь невозможно.

² УГТ+ – термин для обозначения расширенной и доработанной авторами матрицы критериев достижения уровней готовности инженерного изделия для всех уровней от УГТ1 до УГТ9. Особенностью матрицы является формулировка объективных критериев достигаемого результата, разнесение критериев по блокам: материал, полнота верификации экспериментальных образцов, интеграция узла/агрегата в продукт верхнего уровня, изготовление образцов, ресурс элемента. Для каждого уровня готовности и для каждого блока введен бинарный критерий достижения результата.

Повышение результативности НИР: планирование как инструмент снижения технологического риска при разработке двигателей

доработку, повысить вероятность бесшовной интеграции составной части в продукт верхнего уровня, сократить другие технологические риски.

Для демонстрации актуальности такой задачи рассмотрен негативный опыт традиционного планирования в рамках применения ГОСТов разработки антифрикционных покрытий элементов механизации поворотных направляющих аппаратов компрессора ГТД. При разработке направляющих аппаратов необходимые и достаточные испытания для преодоления технологического риска были запланированы не полностью, что привело к существенной задержке реализации данного проекта.

В качестве варианта преодоления технологического риска представлен алгоритм выявления и планирования необходимых и достаточных испытаний по уровням готовности на примере выполняемого в настоящее время проекта разработки стартера-генератора (СГ) газотурбинного двигателя.

Оценка экономической эффективности нового подхода к планированию НИР ввиду отсутствия прибыли на этом этапе, уникальности исследований и неприменимости традиционных показателей может быть проведена путем оценки сокращения задержки сроков завершения работ при Бережливом планировании по сравнению с традиционным подходом, содержащим риски неполного планирования исследований и возвращения к НИР со стадии ОКР. Последнее ведет к увеличению сроков и затрат на проект (Цена задержки, 2024). Возврат с УГТ6 на УГТ3 может сдвинуть срок реализации проекта на 5–10 лет (по текущей статистике в среднем на увеличение уровня готовности на единицу требуется несколько лет (Dubos, Saleh, 2010).

АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ НИР

Актуальность задачи продемонстрируем на конкретном примере проекта в двигателестроении как одной из наиболее инновационных отраслей. Для улучшения показателей эффективности отдельных узлов ГТД используется

различные покрытия, технология нанесения которых в авиационной технике считается хорошо отработанной. Следуя этому тезису при проектировании одного из новых узлов, конструкторы не отметили элемент «Покрытия» как критический. Однако на этапе сертификационных испытаний в реальных условиях эксплуатации было отмечено, что узлы, в которые интегрированы данные элементы, не позволяют достичь требуемых характеристик двигателя. В реальном демонстраторе двигателя температура эксплуатации узлов, характеристики вибрации и ряд других условий отличались от тех, для которых сами покрытия и их математические модели были верифицированы. Имеющихся данных по свойствам покрытия оказалось недостаточно для устранения несоответствия.

В итоге было принято решение вернуться на этап НИР. С экономической точки зрения это привело к увеличению как длительности разработки всего двигателя, так и затрат на его реализацию.

Данный пример подтверждает актуальность разработки универсальной пошаговой методики бережливого планирования необходимых и достаточных испытаний КЭ для сокращения возвратов к НИР со стадии ОКР.

Такая методика разработана и проиллюстрирована ниже на примере проекта разработки инновационного стартера – генератора ГТД, который выполняется в настоящее время с использованием данной методики.

МЕТОДИКА БЕРЕЖЛИВОГО НИР: ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТ

Планирование по результатам является важной частью методики управления инновационными проектами «Бережливый НИР» (Сартори и др, 2020; Сартори, Манцевич, 2020; Сартори, 2022), в основе которой лежит матрица критериев уровней готовности УГТ+. Методика дополняет традиционный подход к планированию, в котором фиксируются в основном организационные мероприятия дорожной карты, и представляет из себя пошаговую инструкцию по детальному планированию НИР с фокусом на необходимые

и достаточные результаты на стадии жизненного цикла «Разработка» (ГОСТ Р 58849–2020). Критерии в методике сформулированы так, чтобы объективно определить достижение результатов на коротких интервалах. Это позволяет оценить реальную динамику продвижения проекта и оперативно диагностировать риски. Лишь убедившись в реализуемости детального плана, можно укрупнить его до календарного плана, являющегося неотъемлемой частью договора на НИР.

Целью повышения результативности НИР при разработке КЭ инновационного изделия в данном контексте мы будем понимать факт обоснованного достижения ими УГТ6 в установленные планом сроки (ГОСТ Р 57194.1–2016). Иными словами, достижение УГТ6 должно означать выполнение всех критериев готовности, что является достаточным обоснованием для использования КЭ при конструировании изделия/продукта с целью обеспечения его конкурентоспособности. Снижение риска интеграции составных частей в демонстратор продукта верхнего уровня обеспечивается условием достижения УГТ6 всеми КЭ к установленной дате. Отметим, что в УГТ+ присутствует группа критериев готовности к интеграции³.

В итоге применения методики достигаются три главных результата:

- 1) Создание изделия правильно с первого раза (соблюдение целевых сроков и затрат);
- 2) Ранняя диагностика технических рисков (фокусировка ресурсов на наименее рискованных альтернативных решениях);
- 3) Обоснование объема работ и распределение ресурсов (выполнение необходимых и достаточных мероприятий, оценка элементарных работ).

Основные этапы бережливого планирования по результатам состоят в следующем:

- 1) Построение дорожной карты проекта: готовность в начале проекта, целевая

готовность со сроком достижения и разбиением на этапы по последовательному достижению УГТ вплоть до УГТ6;

- 2) Построение структуры КЭ продукта/изделия (ГОСТ 2.711–82);

- 3) Функциональный анализ изделия и декомпозиция его на КЭ и применимые к ним критические функции;

- 4) Отбор релевантных критериев из матрицы УГТ+ для каждого КЭ.

- 5) Синхронное планирование каждого КЭ по критериям УГТ+, одновременное достижение всеми КЭ УГТ6.

Контрольные события для каждого КЭ на каждом уровне готовности формулируются универсальным образом с учетом тех факторов, которые влияют на их характеристики по результатам функционального анализа. Пример контрольных событий приведен ниже.

Иными словами, задача универсальной формулировки контрольных событий заключается в том, чтобы создать шаблон, чек-лист для анализа и включения в план верификации всех тех факторов, которые могут позитивно или негативно повлиять на интеграцию составной части в демонстратор продукта/изделия.

Следует отдельно отметить, что ввиду невысокой вероятности реализации инноваций для каждого КЭ целесообразно разрабатывать несколько альтернативных вариантов технических решений. Вариантов должно быть тем больше, чем ниже УГТ. Данное требование является ключевым в достижении высокой результативности НИР. Планирование необходимых и достаточных процедур верификации и своевременный отбор наименее рискованных технических решений сокращает возвраты на ранние уровни готовности с УГТ6 (представлено на рисунках 1а и 1б).

ПРИМЕР АНАЛИЗА КРИТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА

Одним из перспективных направлений совершенствования авиационной техники является создание инновационного СГ внутри двигателя в рамках проектов по созданию гибридных и электрических силовых установок

³ В более широкой постановке задачи повышения результативности следует рассматривать достижение 6-го уровня и по другим уровням готовности: производственной, организационной, коммерческой. Такие критерии разработаны авторами. Однако их описание выходит за рамки данной статьи.

Повышение результативности НИР: планирование как инструмент снижения технологического риска при разработке двигателей



Рис. 1а

Рисунок 1а. Иллюстрация возврата на дополнительное исследование при идентификации проблем на уровне демонстратора (УГТ6)

Figure 1a. The case when additional research is required while identifying problems at the demonstration level (TRL6)



Рис. 1б

Рисунок 1б. Иллюстрация сокращения задержки возвратов в пределах одного УГТ при детальном планировании по конкретным результатам в Бережливом НИР

Figure 1b. Illustration of reducing delay in returns within a single TRL by detailed planning for specific outcomes in Lean R&T

(Кондряков, 2022). Пример размещения исходного и инновационного вариантов СГ внутри двигателя представлен далее (рисунок 2).

В отличие от типового СГ, который размещается в ограниченных пространствах корпусов двигателя и из-за этого имеет ограниченную вырабатываемую мощность, инновационный СГ размещается во внутренних полостях двигателя с гораздо большим объемом доступного пространства, что при

аналогичных удельных характеристиках позволит вырабатывать большую мощность. Однако при этом СГ и его составные части будут подвержены более агрессивным тепловым и механическим воздействиям. Сочетание всех перечисленных факторов делает данный СГ инновационным, так как отсутствует обоснование того, что разработанные с учетом доступных знаний и моделей составные части агрегата будут надежно функционировать

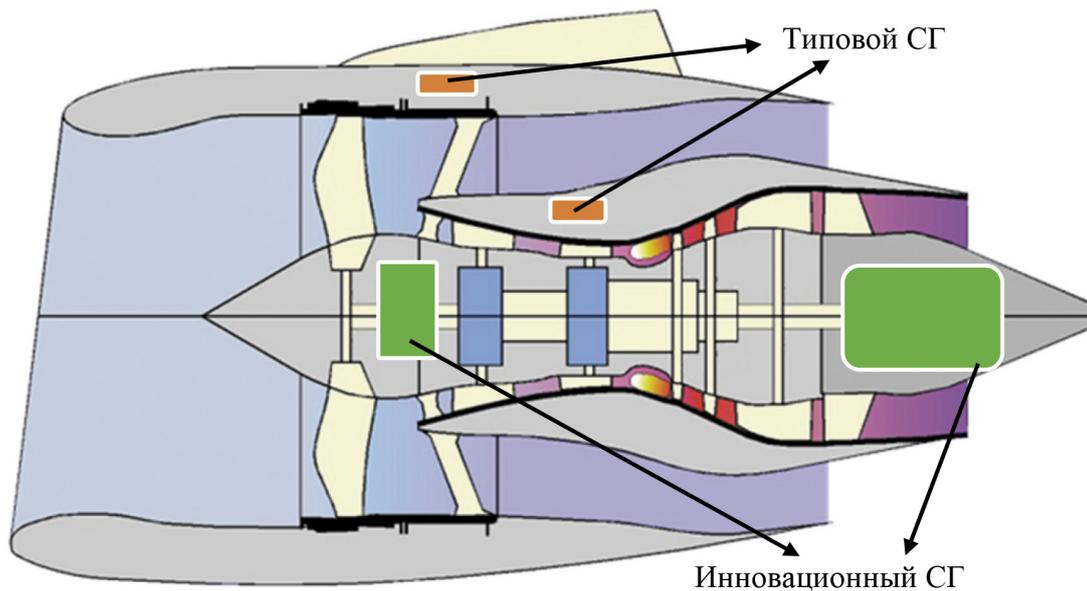


Рисунок 2. Пример размещения типового и инновационного вариантов СГ внутри двигателя
Figure 2. The example of placing typical and innovative starter generator options inside an engine.

Источник: Popov et al., 2021.

в новых условиях. Таким образом, для результативного выполнения проекта требуется разработка полного плана работ.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ (ПРИМЕР)

Рассмотрим пошагово процесс планирования на примере разработки СГ.

Стадия 1. Построение дорожной карты проекта: готовность в начале и целевая готовность с разбиением на этапы

Для простоты иллюстрации принципа планирования представим гипотетический сценарий, в котором все КЭ находятся на УГТ2 («концепция технологии и/или ее применения сформулированы»), а срок начала конструирования назначен через 24 месяца после даты начала исследований (T_n). Следовательно, за 24 месяца все КЭ должны достигнуть УГТ6 как необходимого условия их использования на стадии конструирования продукта/изделия. В итоге получаем следующие исходные ограничения.

Начальные/конечные уровни готовности и соответствующие сроки их достижения: УГТ2 – T_n / УГТ6 – $T_n + 24$ мес.

Промежуточные контрольные точки по УГТ устанавливаются равномерно по времени, если нет иных обоснованных предложений: УГТ3 – $T_n + 6$ мес., УГТ4 – $T_n + 12$ мес., УГТ5 – $T_n + 18$ мес., где T_n – дата начала работ.

Стадия 2. Построение структуры СГ и выделение КЭ технологии

Для определения объектов планирования создается структура изделия, которая включает в себя все составные части, элементы, материалы конструкции, системы управления. Каждая составная часть СГ анализируется на предмет критичности. Некоторые части могут быть типовыми и их функционал проверен на испытаниях в аналогичных условиях. Такие составные части не относят к КЭ. По ним планируются только организационные мероприятия.

Но обязательно есть и такие части, для которых пока нет надежных средств моделирования, функционал которых не может быть верифицирован традиционными методами. Такие части экспертным образом отнесены к КЭ (Сартори и др., 2020; Сартори, Манцевич, 2020).

КЭ предлагаются главным конструктором изделия и подтверждаются экспертами.

Повышение результативности НИР: планирование как инструмент снижения технологического риска при разработке двигателей

В подтверждение оценок и окончательного отнесения составных частей к КЭ проводится функциональный анализ (см. ниже). Отметим, что данная процедура была опущена в предыдущем примере с покрытиями, что явилось одной из главных причин возврата на стадию «Исследования» и задержки всей программы.

Составные части СГ представлены на рисунке 3. КЭ, определенные по результатам анализа, выделены цветом. Снижению риска разработки отвечает синхронное повышение уровней готовности всех КЭ. Действительно, при разных уровнях готовности КЭ нет возможности проверить интеграцию в демонстратор, по этой причине возрастает риск их бесшовной интеграции в СГ (Сартори и др., 2020; Сартори, Манцевич, 2020). Иными словами, дорожная карта для каждого КЭ должна быть синхронизована с дорожной картой СГ.

Обращаем внимание на иерархию КЭ. Так СГ в свою очередь является КЭ инновационного продукта более высокого уровня, например, двигателя. Элемент «Система охлаждения» тоже может содержать собственную структуру КЭ более низкого уровня, включающую, например, инновационный материал теплообменника.

Стадия 3. Функциональный анализ изделия и декомпозиция функций на его КЭ

Ввиду важности данной процедуры и последствий ошибок, вызванных ее отсутствием в примере с покрытиями, функциональный анализ выделен в данный раздел. Его результатом является фиксация КЭ и условий, в которых они должны верифицироваться для планирования работ.

СГ должен выполнять свои основные задачи генерации электроэнергии и запуска



Рисунок 3. Разделение СГ на составные части. КЭ структуры выделены синим цветом

Figure 3. The decomposition of starter-generator into its component parts. The CE are highlighted in blue

Повышение результативности НИР: планирование как инструмент снижения технологического риска при разработке двигателей

двигателя в условиях реальной эксплуатации (Уразбахтин, Нуриева, Пронин, 2022). Для примера рассмотрим декомпозицию задач на основные инновационные функции, выполнение которых невозможно подтвердить инженерными методами расчета для некоторых КЭ.

1. Обеспечение основных электротехнических характеристик:

1.1. Выполнение ТЗ по току, напряжению, нагрузкам, режимам.

1.2. Высокий КПД на штатных режимах.

1.3. Выполнение ТЗ по габаритам и стыковки со смежными узлами.

1.4. Электромагнитная совместимость с внешними системами.

2. Обеспечение целостности конструкции:

2.1. Обеспечение высокотемпературных свойств материалов.

2.2. Стабильность размеров, допусков.

2.3. Эффективное охлаждение.

2.4. Требуемый ресурс на штатных режимах.

3. Обеспечение характеристик электротехнических элементов:

3.1. Электропрочность изоляции.

3.2. Стабильность электротехнических свойств магнитов.

Программа исследований в составе плана работ должна включать необходимые и достаточные испытания этих функций в различных вариантах технического исполнения КЭ.

Следующим шагом является анализ составных частей СГ на предмет их участия в выполнении критических функций (представлено в таблице 1). В ячейках, отмеченных «+», требуется запланировать мероприятия по верификации выполнения технических требований. Степень полноты верификации и приближения к реальным условиям эксплуатации последовательно нарастает от УГТЗ к УГТ6 и определяется критериями УГТ+. При планировании задаются сроки предоставления численных исходных данных по внешним, внутренним, основным и второстепенным воздействиям, а также их взаимодействие и диапазоны изменения, численные результаты верификации.

Стадия 4. Планирование по критериям готовности и контрольным событиям

Рассмотрим составляющие детального планирования на примере одного из КЭ – постоянных магнитов по разработке с УГТ2 до УГТ3. Для магнитов ранее отмечены следующие критические функции: 1.1, 1.2, 2.1, 2.3,

Таблица 1. Функции и их влияние на КЭ СГ

Table 1. Functions and their impact on the critical elements of the product

Функция	Критические элементы					
	Магнито-провод	Подшипники	Система охлаждения	Магниты	Электрические обмотки	Система ротора
1.1. Выполнение ТЗ по I, U, нагрузке во внешних условиях и режимах работы	+	-	-	+	+	+
1.2. Высокий КПД	+	+	-	+	+	+
1.3. Выполнение ТЗ по габаритам и смежным узлам	+	+	+	-	+	+
1.4. Электромагнитная совместимость	+	-	-	-	+	+
2.1. Высокотемпературные свойства материалов	-	+	-	+	+	-
2.2. Стабильность размеров, формы, допусков	-	+	-	-	-	+
2.3. Эффективное охлаждение	+	+	+	+	+	-
2.4. Требуемый ресурс на штатных режимах	-	+	-	-	-	-
3.1. Электропрочность изоляции	+	-	-	-	+	-
3.2. Стабильность электротехнических свойств	-	-	-	+	+	-

Повышение результативности НИР: планирование как инструмент снижения технологического риска при разработке двигателей

3.2 (представлено в таблице 1). По каждой из критических функций должны быть сформулированы исходные данные и целевые значения в соответствии с критериями УГТЗ+, достижение которых можно проверить в процессе экспериментальной верификации.

Этот процесс представлен в таблице 2.

Отметим, что достижение УГТЗ+ элемента «Магнит», как и прочих КЭ СГ, означает выполнение всех критериев третьего уровня готовности из блоков функциональных критериев матрицы УГТ+, отмеченных знаком «+» в таблице 2. Фактически УГТ функции определяется по минимальному значению уровня готовности по строке.

Приведем пример последовательности мероприятий (задач/контрольных событий) для отражения в детальном плане по КЭ «Магнит» с формулировкой измеримого результата по всем отмеченным в таблице 2 позициям, срокам исполнения и взаимосвязи с другими мероприятиями.

1. Анализ начального уровня готовности КЭ⁴. В общем случае УГТ+ разных элементов могут отличаться в зависимости от полноты верификации по разным критическим функциям (представлено на рисунке 4).

2. Готовность исходных данных для достижения УГТЗ+: необходимые и достаточные данные.

3. Утверждение критических факторов, их значений и целевых характеристик для испытания на УГТЗ. Примеры:

3.1. Основные факторы на УГТЗ+: внешняя температура, дополнительный нагрев и эффективность теплоотвода;

3.2. Второстепенные факторы на УГТЗ+ не рассматриваются: механический интерфейс, пусковой режим, вибрация, термошоки.

4. Эскиз экспериментального образца (УГТЗ+, макет): стандартный образец для испытаний, система моделирования тепловыделения, система охлаждения.

Таблица 2. Матрица (чек-лист) результатов, получение которых должно быть указано в плане работ на УГТЗ+⁵ по разработке КЭ «Магнит». Обозначение «+» отражает факт того, что в плане определены измеримые критерии УГТЗ+ по данному блоку критериев

Table 2. Matrix (checklist) of the results, the achievement of which should be incorporated into work plan for TRL3+ for the development of critical element “Magnet”. The “+” symbol indicates that the plan meets all the functional criteria of TRL3+

Критический элемент: Магнит	Блоки функциональных критериев матрицы УГТ+							
	Экспериментальные образцы. Верификация	Полнота испытаний	Интеграция	Экспериментальная база	Опытное производство	Материалы	Ресурс	Эксплуатационная технологичность
1.1. Выполнение ТЗ по I, U, нагрузке во внешних условиях	+	+		+	+			
1.2. Выполнение условий по КПД	+	+	+	+				+
2.1. Высокотемпературные свойства материалов	+	+		+		+	+	
2.3. Эффективное охлаждение	+	+	+	+	+			+
3.2. Стабильность электротехнических и механических свойств	+	+	+	+			+	+

⁴ Для простоты далее по тексту предполагается, что все КЭ имеют одинаковый уровень готовности УГТ2.

⁵ УГТЗ+ – термин для обозначения достижения УГТЗ по расширенной матрице критериев УГТ+.

5. Компьютерное моделирование с учетом всех блоков матрицы критериев УГТ+:

5.1. Оценка характеристик альтернативных решений макета, в т.ч. характеристик нового материала, возможности проведения испытаний, интеграции, ресурса, эксплуатационной технологичности;

5.2. Обоснование выбранных вариантов, методики испытаний, измерительных средств: подтверждение гипотезы по всем критическим функциям.

6. Программа методика испытаний (ПМИ): необходимые и достаточные процедуры по критериям УГТ+, факторы, диапазоны их изменения, целевые характеристики:

6.1. Изменение магнитной индукции при температурах от T1 до T2: < A%;

6.2. Дополнительный индуцированный нагрев при номинальной мощности генерации при нормальных условиях ΔT – не более B (градусов/кВт);

6.3. Деградация магнитных свойств от 1 до N1 циклов нагрева: не более C%;

6.4. Деградация механических свойств от 1 до N2 циклов нагрева: < D%;

6.5. Теплоотвод – не менее E (кВт/градус);

6.6. Подтверждение на матмодели интеграции с внешними элементами по основным факторам;

6.7. Оценка ресурса по матмоделям (не менее F% от целевого);

6.8. Концептуальная оценка эксплуатационной технологичности в пределах ТЗ. ТЗ (КД) на макет(ы)⁷: учет всех требований и ПМИ для УГТЗ.

7. ТЗ на макеты магнита с учетом всех требований и ПМИ для УГТЗ+.

8. Экспериментальные партии образцов магнитов для испытаний, отобранные на предыдущем уровне, изготовлены по опытным ТЗ.

9. Приемка кандидатных партий магнитов, факт соответствия ТУ.

10. Подготовка и приемка испытательного стенда и контрольно-измерительной аппаратуры: соответствие ТЗ и ПМИ.

11. Проведение испытаний в соответствии с программой испытаний:

11.1. Выполнение ТЗ по I, U, нагрузке во внешних условиях и режимах;

11.2. Высокий КПД;

11.3. Высокотемпературные свойства материалов;

11.4. Эффективное охлаждение;

11.5. Стабильность электротехнических и механических свойств.

12. Анализ предварительных испытаний по всем блокам критериев УГТЗ+.

13. Предложения по коррекции макета(ов)⁸: обоснование для доработки макета.

14. Доработка и повторные испытания.

15. Анализ и подтверждение на соответствие ТЗ.

16. Коррекция математической модели «Магнита» по полученным данным.

17. Отбор наименее рискованных технических решений, рекомендации на экспериментальные образцы на УГТ4+ (модель).

18. Формула зонтичного патента (ов) на магнит(ы).

19. Технико-экономическое обоснование продолжения разработки до УГТ4.

Для каждого мероприятия устанавливаются сроки, трудозатраты, необходимые ресурсы. Отметим, что указанная выше последовательность мероприятий с той или иной степенью подробности повторяется на УГТ4, УГТ5 и УГТ6.

Аналогичный план строится для всех параллельных вариантов технических решений магнита, испытания которых призваны сократить технологические риски недостижения результата на УГТ6.

Для долгосрочного планирования аналогичный план для магнита строится по достижению последующих уровней готовности (УГТ4, УГТ5, УГТ6).

Учет ограниченности имеющихся ресурсов может привести к смещению даты достижения

⁶ Численные значения здесь и далее устанавливают исходя из ТЗ на изделие.

⁷ На УГТЗ в силу высокого технологического риска достижения положительного результата целесообразно испытать несколько (до 5–7) альтернативных макетов с тем, чтобы впоследствии выбрать оптимальный вариант.

⁸ Верификация на макетах проводится по всем альтернативным техническим решениям.

Повышение результативности НИР: планирование как инструмент снижения технологического риска при разработке двигателей

УГТЗ вправо. В этом случае проводится коррекция дорожной карты, либо планируются дополнительные ресурсы для выполнения работы в срок.

По результатам аналогичного детального планирования всех остальных КЭ (магнитопровода, подшипников, системы охлаждения, электрических обмоток, системы ротора) формируется сводный график КЭ. Пример сводного графика детального планирования по всем КЭ продукта представлен на рисунках 4а и 4б. По вертикальной оси отложены уровни готовности по критическим функциям, определенные для шести КЭ (представлено на рисунке 3). Неоднородность УГТ по критическим функциям и КЭ элементам является индикатором

повышенного риска интеграции КЭ в продукт (смотри комментарии к таблице 2).

План, построенный таким образом, позволяет контролировать достижение целевых результатов на коротких интервалах времени (месяц). Такой контроль является эффективным средством раннего реагирования на риски достижения конечного результата. В случае диагностики проблем принимаются оперативные меры, компенсирующие риски, выбираются наименее рискованные технические решения. В итоге существенно повышается результативность НИР.

В случае невозможности достижения целевых результатов, план послужит обоснованием того, чтобы, несмотря на негативный

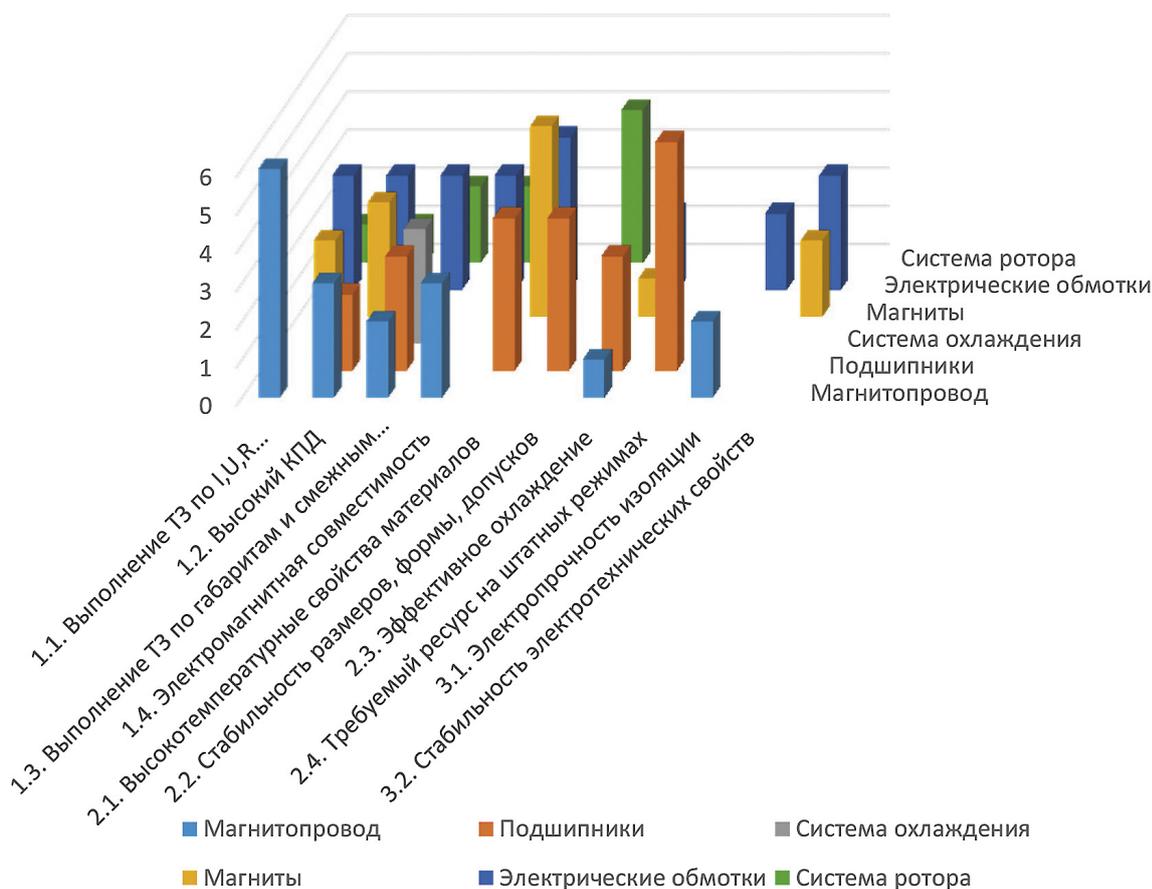


Рисунок 4а. Пример сводного графика детальной оценки уровня готовности по всем КЭ продукта и всем критическим функциям при стихийном планировании (УГТ различаются по величине)

Figure 4a. Example of summary diagram for a detailed assessment of TRL for all critical elements and all critical functions during the spontaneous planning process (TRL varies in value)

Повышение результативности НИР: планирование как инструмент снижения технологического риска при разработке двигателей

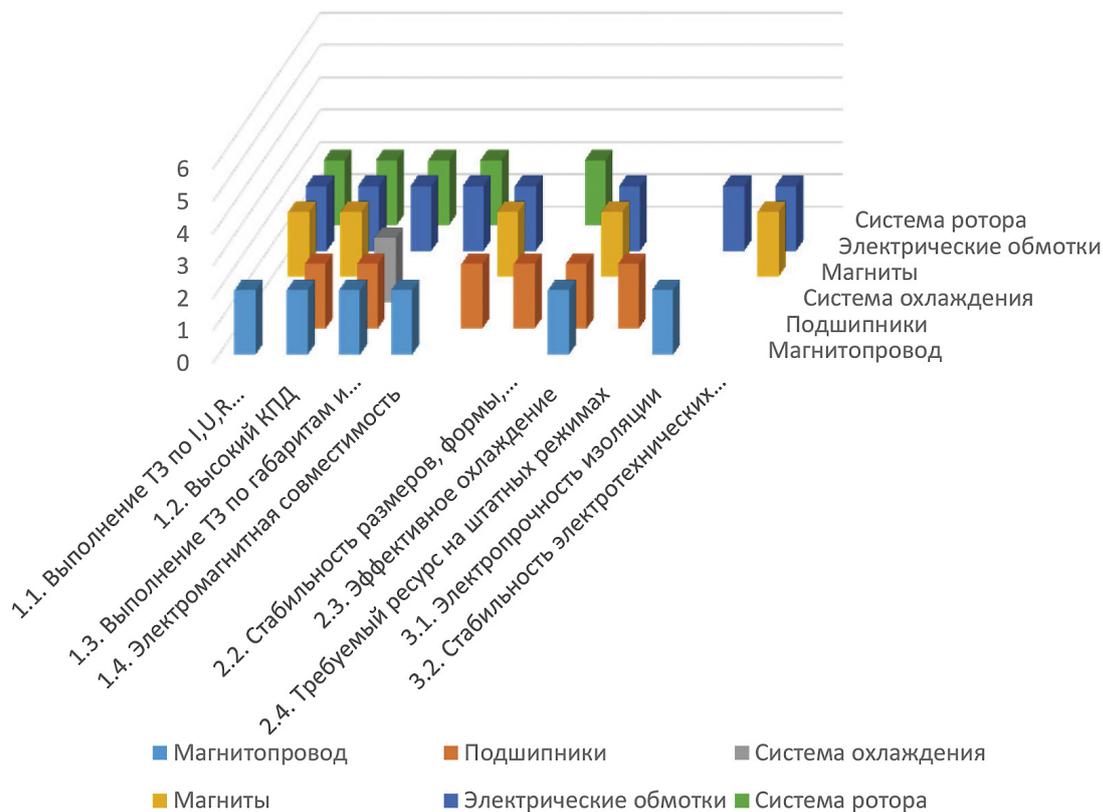


Рисунок 46. Пример сводного графика детальной оценки уровня готовности по всем КЭ продукта и всем критическим функциям при соблюдении требований Бережливого НИР к синхронному развитию КЭ по критериям УГТ+

Figure 4b. Example of a summary diagram for a detailed assessment of TRL for all product critical elements and all critical functions, while meeting the requirements of Lean R&T for the synchronous development of critical elements based on TRL+ criteria

результат, были предприняты все необходимые и достаточные мероприятия по его достижению, а, следовательно, причина заключается в фундаментальных законах природы, а не в низком качестве управления разработкой. Это обоснование может служить аргументом при обсуждении затрат на проведение НИР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана актуальность детального планирования инновационных проектов с целью повышения результативности прикладных НИР. Приведены примеры пошаговой процедуры планирования, типовой состав

контрольных событий, синхронизация планов по КЭ. Показано, что детальное планирование создает базу для повышения оперативности принятия решений, упрощения контроля достижения промежуточных результатов, приводя к сокращению сроков НИР, обоснованию объема работ, повышению их результативности. Шаблон планирования применим к широкому классу технологических инновационных проектов. Управление разработкой на основе Бережливого НИР и состав матрицы критериев УГТ+ и УГТ+ являются отдельной методической задачей и будут представлены в последующих работах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 2.711-82. Единая система конструкторской документации. Схема деления изделия на составные части. Разработано Стандартом. Москва: Стандартинформ, 2020. 12 с.
2. ГОСТ Р 57194.1-2016. Передача технологии. Общие положения. Разработан ООО «Техно-сервис». Москва: Стандартинформ, 2016. 10 с.
3. Кондряков А.Д. Концепция электрификации авиационного двигателя. 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». Москва. Тезисы. Москва: Издательство «Перо», 2022. 8,06 Мб.
4. Минко И.С. Бизнес-планирование инновационных проектов. Учеб. пособие. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО; Институт холода и биотехнологий Университета ИТМО, 2014. 171 с.
5. Митрофанова Я.С. Гибридный подход к управлению проектами цифровой трансформации бизнеса // Вектор науки ТГУ. Серия: Экономика и управление. 2020. № 3. С. 42–48. <https://doi.org/10.18323/2221-5689-2020-3-42-48>
6. Сартори А.В. Повышение результативности исследований: планирование по уровням готовности в бережливом НИОКР // Экономика науки. 2022. № 8(1). С. 4–21. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2022-8-1-4-21>
7. Сартори А.В., Гареев А.Р., Ильина Н.А., Манцевич Н.М. Применение подхода уровней готовности для различных предметных направлений в бережливом НИОКР // Экономика науки. 2020. № 6(1–2). С. 118–134. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2020-6-1-2-118-134>
8. Сартори А.В., Манцевич Н.М. Модель бережливого управления инновационными проектами на основе учета рисков и численной оценки экономической целесообразности выполнения этапов работ // Вопросы инновационной экономики. 2020. Т. 10, № 4, октябрь-декабрь. <https://doi.org/10.18334/vinec.10.4.110974>
9. Соколов М. Почему «взлетает» только 1% стартапов – и это нормально. 2017. Форбс. URL: <http://www.forbes.ru/tehnologii/339113-pochemu-vzletaet-tolko-1-startapov-i-eto-normalno> (дата обращения: 11.09.2024).
10. Уразбахтин Р.Р., Нуриева А.М., Пронин Е.А. Выбор электрической машины на роль интегрированного стартера-генератора // Вестник Тувинского государственного университета. Выпуск 3. Технические и физико-математические науки. 2022. № 3 (98). С. 6–17. <https://doi.org/10.24411/2221-0458-2022-98-06-17>
11. Цена задержки: как оценить и снизить стоимость переноса или пропуска сроков проекта. 2024. FasterCapital. URL: <https://fastercapital.com/ru/content/Цена-задержки-как-оценить-и-снизить-стоимость-переноса-или-пропуска-сроков-проекта.html> (дата обращения: 11.09.2024).
12. Blank S. Lean Innovation Management – Making Corporate Innovation Work. Forbes. 2021. URL: <https://www.forbes.com/sites/steveblank/2015/06/25/lean-innovation-management-making-corporate-innovation-work/?sh=5ee0f0c87c6a> (дата обращения: 11.09.2024).
13. Carter J. Innovation Strategic Planning Process. A Long Term Horizon for Product Planning. TCGen company website. 2023. URL: <https://www.tcgen.com/blog/strategic-planning-process-innovation-long-term-horizon-product-planning> (дата обращения: 11.09.2024).
14. Charette R.N. 4 Reasons Why NASA Projects Miss Deadlines and Blow Budgets. 2018. URL: <https://spectrum.ieee.org/gao-warns-of-deteriorating-costs-and-schedules-in-nasas-major-project-portfolio> (дата обращения: 11.09.2024).
15. Dubos G.F., Saleh J.H. Spacecraft Technology Portfolio: Probabilistic Modeling and Implications for Responsiveness and Schedule Slippage. AIAA Infotech@Aerospace0. 2010. URL: <https://repository.gatech.edu/entities/publication/8247b40f-1807-4089-8d75-326176c73b06> (дата обращения: 11.09.2024).
16. Little A.D. Transformation by Radical Innovation. 2014. URL: https://www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/TIM_2014_Transformation_by_Radical_Innovation.pdf (дата обращения: 11.09.2024).
17. Mavris D.N., Bandte O., & Brewer J.T. A Method for the Identification and Assessment of Critical Technologies Needed for an Economically Viable HSCT. 1998. URL: <https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/284a22d6-bb85-492a-9b81-cf3f109ffdce/content> (дата обращения: 11.09.2024).
18. Oorschot K. Van, Sengupta K., Akkermans H., & Wassenhove L. Van. Get fat fast: Surviving stage-gates in NPD // Journal of Product Innovation Management. 2010. № 27(6). URL: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2010.00754.x> (дата обращения: 11.09.2024)
19. PMBOK Guide A Guide To The Project Management Body of Knowledge (6th ed.). Project Management Institute. 2017. URL: <https://project-management.com/pmbok-guide-6-sixth-edition-a-book-review/> (дата обращения: 11.09.2024).
20. Попов, В., Yepifanov, S., Kononykhyn, Y., Tsaglov, A. Architecture of Distributed Control System for Gearbox-Free More Electric Turbofan Engine // Aerospace. 2021. № 8(11). P. 316. <https://doi.org/10.3390/aerospace8110316>

21. The Project Economy The website of the Project Management Institute. 2021. URL: <https://www.pmi.org/learning/library/beyond-agility-gymnastic-enterprises-12973> (дата обращения: 11.09.2024).
22. *Wątrybski J., Jankowski J., Ziemia P., Karczmarczyk A., & Ziolo M.* Generalised framework for multi-criteria method selection // *Omega* (United Kingdom). 2019. № 86. P. 107–124. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.07.004>

Информация об авторах

Кондряков Артур Дмитриевич – ассистент, аспирант кафедры 203 «Конструкция и проектирование двигателей», Московский авиационный институт, начальник бригады статора конструкторского отдела компрессоров, ОКБ им. А. Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО», SPIN-код: 8255–9902, ORCID0009–0007–5649–650x (Российская Федерация, 129301, г. Москва, ул. Касаткина, д. 13, tetra1337@mail.ru).

Сартори Андрей Владимирович – кандидат физико-математических наук, главный специалист службы заместителя генерального конструктора, ОКБ им. А. Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО», ORCID 0000-0001-8042-2294 (Российская Федерация, 129301, г. Москва, ул. Касаткина, д. 13, sartoriandrey@gmail.com).

Марчуков Евгений Ювенальевич – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов», Московский Авиационный Институт, Генеральный конструктор-директор, ОКБ им. А. Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО», SPIN-код: 7295–9160 (Российская Федерация, 129301, г. Москва, ул. Касаткина, д. 13, evgeny.marchukov@okb.umpo.ru).

Соловьева Анастасия Валерьевна – главный конструктор; ОКБ им. А. Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО» (Российская Федерация, 129301, г. Москва, ул. Касаткина, д. 13, anastasiya.soloveva@okb.umpo.ru).

Чуклинов Сергей Владимирович – директор научно-образовательного центра развития технологий двигателестроения, Московский Авиационный Институт (Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, mai@mai.ru).

REFERENCES

1. *Blank, S.* (2021). Lean Innovation Management – Making Corporate Innovation Work. *Forbes*. Retrieved September 11, 2024, from <https://www.forbes.com/sites/steveblank/2015/06/25/lean-innovation-management-making-corporate-innovation-work/?sh=5ee0f0c87c6a>
2. *Carter, J.* (2023). Innovation Strategic Planning Process. A Long Term Horizon for Product Planning. TCGen company website. Retrieved September 11, 2024, from <https://www.tcgen.com/blog/strategic-planning-process-innovation-long-term-horizon-product-planning>
3. *Charette, R.N.* (2018). 4 Reasons Why NASA Projects Miss Deadlines and Blow Budgets. Retrieved September 11, 2024, from <https://spectrum.ieee.org/gao-warns-of-deteriorating-costs-and-schedules-in-nasas-major-project-portfolio>
4. *Dubos, G.F., Saleh J.H.* (2010). Spacecraft Technology Portfolio: Probabilistic Modeling and Implications for Responsiveness and Schedule Slippage. AIAA Infotech@Aerospace. Retrieved September 11, 2024, from <https://repository.gatech.edu/entities/publication/8247b40f-1807-4089-8d75-326176c73b06>
5. GOST 2.711-82. Unified system of design documentation. The scheme of dividing the product into its component parts. (2020). Developed by Standartinform, Moscow: Standartinform. (in Russ)
6. GOST R57194.1-2016. Technology transfer. General provisions. (2016). Developed by Techrechservice LLC. Moscow: Standartinform (in Russ)
7. *Kondryakov, A.D.* (2022). The concept of electrification of an aircraft engine. 21st International Conference “Aviation and Cosmonautics”. Moscow. Abstracts. Moscow: Publishing house “Pero” (in Russ)
8. *Little, A.D.* (2014). Transformation by Radical Innovation. Retrieved September 11, 2024, from https://www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/TIM_2014_Transformation_by_Radical_Innovation.pdf
9. *Mavris, D.N., Bandte, O., & Brewer, J.T.* (1998). A Method for the Identification and Assessment of Critical Technologies Needed for an Economically Viable HSCT. Retrieved September 11, 2024, from <https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/284a22d6-bb85-492a-9b81-cf3f109ffdce/content>
10. *Minko, I.S.* (2014). Business planning of innovative projects: Textbook. St. Petersburg: ITMO Research Institute; ITMO University Institute of Refrigeration and Biotechnology. (in Russ)
11. *Mitrofanova, Ya.S.* (2020). A Hybrid Approach to Project Management of Business Digital Transformation. *Vector of Science TSU. Series: Economics and Management*, 3, 42–48. <https://doi.org/10.18323/2221-5689-2020-3-42-48> (in Russ)

Повышение результативности НИР: планирование как инструмент
снижения технологического риска при разработке двигателей

12. Oorschot, K. Van, Sengupta, K., Akkermans, H., & Wassenhove, L. Van. (2010). Get fat fast: Surviving stage-gates in NPD. *Journal of Product Innovation Management*, 27(6). Retrieved September 11, 2024, from <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2010.00754.x>
13. PMBOK Guide (2017). *A Guide To The Project Management Body of Knowledge* (6th ed.). Project Management Institute. Retrieved September 11, 2024, from <https://project-management.com/pmbok-guide-6-sixth-edition-a-book-review/>
14. Popov, V., Yepifanov, S., Kononykhyn, Y., Tzaglov, A. (2021). Get fat fast: Surviving stage-gates in NPD. *Aerospace* 2021, 8, 316. <https://doi.org/10.3390/aerospace8110316>
15. Sartori, A. (2022). Improving Research Performance Through Planning by Readiness Levels in Lean R&D. *Economics of Science*, 8(1), 4–21. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2022-8-1-4-21> (in Russ)
16. Sartori, A.V., Gareev, A.R., Ilyina, N.A., Mantsevich, N.M. (2020). Application of the approach of readiness levels for various subject areas in lean R&D. *Economics of Science*, 6(1–2), 118–134. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2020-6-1-2-118-134> (in Russ)
17. Sartori, A.V., Mantsevich, N.M. (2020). Model of innovative projects lean management based on risk accounting and numerical evaluation of the work stages economic expediency. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki*, 10(4), 2141–2164. <https://doi.org/10.18334/vinec.10.4.110974> (in Russ)
18. Sokolov, M. (2017). Why does only 1% of startups succeed – and this is normal. *Forbes*. Retrieved September 11, 2024, from <http://www.forbes.ru/tehnologii/339113-pochemu-vzletaet-tolko-1-startapov-i-eto-normalno> (in Russ)
19. The Cost of Delay: How to Estimate and Reduce the Cost of Postponing or Missing a Project Deadline (2024). *FasterCapital*. Retrieved September 11, 2024, from <https://fastercapital.com/ru/content/Цена-задержки-как-оценить-и-снизить-стоимость-переноса-или-пропуска-сроков-проекта.html> (in Russ)
20. The Project Economy (2021). The website of the Project Management Institute. Retrieved September 11, 2024, from <https://www.pmi.org/learning/library/beyond-agility-gymnastic-enterprises-12973>
21. Urazbakhtin, R.R., Nurieva, A.M., Pronin, E.A. (2022). Electric Machine Selection for The Role of Integrated Starter-Generator. *Bulletin of Tuva state University. Technical and Physical-Mathematical Sciences*, 3 (98). 6–17 <https://doi.org/10.24411/2221-0458-2022-98-06-17> (in Russ)
22. Wątrybski, J., Jankowski, J., Ziemba, P., Karczmarczyk, A., & Ziolo, M. (2019). Generalised framework for multi-criteria method selection. *Omega* (United Kingdom), 86, 107–124. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.07.004>

Authors

Arthur D. Kondryakov – Assistant and postgraduate student of the Department 203 “Design and Engineering of engines”, Moscow Aviation Institute, Head of the Stator Brigade in the Compressor Design Department, Lyulka Design Bureau, ORCID 0009-0007-5649-650x (Russian Federation, 129301, Moscow, Kasatkina Street, 13, tetra1337@mail.ru).

Andrey V. Sartori – PhD, Chief specialist of the Deputy General Designer Office, Lyulka Design Bureau, ORCID 0000-0001-8042-2294, (Russian Federation, 129301, Moscow, Kasatkina Street, 13, sartoriandrey@gmail.com).

Evgeny Ju. Marchukov – Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department 205 “Technology of Aircraft Engine Production”, Moscow Aviation Institute, General Designer Director, Lyulka Design Bureau (Russian Federation, 129301, Moscow, Kasatkina Street, 13, evgeny.marchukov@okb.ump.ru).

Anastasiya V. Solovieva – Chief Designer, Lyulka Design Bureau (Russian Federation, 129301, Moscow, Kasatkina Street, 13, anastasiya.soloveva@okb.umpo.ru).

Sergey V. Chuklinov – Head of the Scientific and Educational Center for the Development of Engine Building Technologies, Moscow Aviation Institute (Russian Federation, 125993, Moscow, Volokolamskoe highway, 4, mai@mai.ru).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received) 15.04.2024

Поступила после рецензирования (Revised) 14.09.2024

Принята к публикации (Accepted) 17.09.2024