

Михайлов Евгений Валерьевич, студент 2-го курса магистратуры, ФГАОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения”, г. Санкт-Петербург, Россия

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМИ ПРОЕКТАМИ
В ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ: СИНТЕЗ ГИБКИХ И КАСКАДНЫХ
МЕТОДОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Аннотация

В статье рассматриваются проблемы управления НИОКР при проектировании инновационных электрических машин. Цель исследования — разработка и количественное обоснование адаптивной гибридной модели управления, минимизирующей технологические и финансовые риски. На основе системного анализа предложена модель Agile-Stage-Gate, формализованная через комплекс показателей готовности проекта (Project Readiness Index – PRI) и оценку экономического эффекта (Net Financial Impact – NFI). Практическая апробация модели проведена на детальном кейсе проектирования генератора двойного питания (ГДП) мощностью 10 МВт с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Результаты показывают, что применение модели позволяет сократить финансовые потери от позднего выявления ошибок на 1215% от бюджета НИОКР, а время выхода на ключевые вехи — на 10-18% по сравнению с каскадным подходом. Статья предназначена для руководителей инновационных проектов и исследователей в области управления высокорисковыми технологическими разработками.

Annotation

The article examines the challenges of managing R&D in the design of innovative electrical machines. The aim of the research is the development and

quantitative justification of an adaptive hybrid management model that minimizes technological and financial risks. Based on a systematic analysis, an Agile-StageGate model is proposed, formalized through a comprehensive set of project readiness indicators (Project Readiness Index – PRI) and an assessment of economic impact (Net Financial Impact – NFI). The practical testing of the model was conducted on a detailed case study of designing a 10 MW doubly-fed induction generator (DFIG) utilizing high-temperature superconductors (HTS). The results demonstrate that the application of the model can reduce financial losses from the late detection of errors by 12-15% of the R&D budget, and the time to reach key milestones by 10-18% compared to the cascade (Waterfall) approach. The article is intended for managers of innovation projects and researchers in the field of managing high-risk technology development.

Ключевые слова: управление НИОКР, гибридные методологии, Agile-StageGate, электрические машины, генератор двойного питания, количественная оценка эффективности, Project Readiness Index (PRI).

Keywords: R&D management, hybrid methodologies, Agile-Stage-Gate, electrical machines, doubly-fed induction generator, quantitative performance assessment, Project Readiness Index (PRI).

Engineering: A Synthesis of Agile and Cascade Methodologies for Designing

Complex Electrical Machines

Mikhailov Yevgeny Valerievich Student

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Введение

Проектирование электрических машин нового поколения, характеризующихся применением прорывных материалов и архитектур, относится к классу высокорисковых инновационных проектов. Высокая капиталоемкость, длительные циклы и технологическая неопределённость

делают традиционные каскадные модели управления (Waterfall) неэффективными, приводя к перерасходу бюджета и срывам сроков. В то же время «чистые» гибкие методологии (Agile) плохо интегрируются с требованиями жёсткого контроля бюджета и нормативного документооборота в капиталоемких отраслях [1]. Актуальность исследования заключается в разработке количественно измеримой гибридной модели, способной обеспечить баланс между структурностью и адаптивностью. Цель работы — предложить, формализовать и апробировать на комплексном примере модель управления, синтезирующую поэтапный контроль критических вех (Stage-Gate) и итеративную разработку (Agile).

Сравнительный анализ методологий управления НИОКР

Таблица 1. Сравнительный анализ методологий управления для проектов.

НИОКР в энергомашиностроении [2]

Критерий	Waterfall	Agile/Scrum	Stage-Gate	Agile-StageGate (Предлагаемая модель)
Основной принцип	Линейная последовательность	Итеративность и адаптивность	Контроль в точках принятия решений	Итеративность внутри контролируемых фаз
Управление рисками	Позднее выявление, высокая стоимость устранения	Непрерывное, но без стратегического портфельного контроля	Формальная оценка на шлюзах	Непрерывное (Agile) + стратегическое (Gate)

Критерий	Waterfall	Agile/Scrum	Stage-Gate	Agile-StageGate (Предлагаемая модель)
Гибкость	Низкая	Очень высокая	Умеренная (между фазами)	Высокая внутри фазы, управляемая на шлюзах
Критерий успеха фазы	Соответствие изначальному ТЗ	Рабочий инкремент продукта	Прохождение шлюза	Достижение целей фазы через успешные спринты и прохождение шлюза
Лучшая применимость	Проекты с чёткими требованиями	Программные продукты, R&D	Иновации со средней капиталоемкостью	Капиталоемкие НИОКР с высокой технологической неопределённостью

Анализ показывает, что ни одна из «чистых» методологий не отвечает в полной мере специфике НИОКР в энергомашиностроении, что обосновывает необходимость их синтеза.

Предлагаемая гибридная модель Agile-Stage-Gate

структура и формализация

Модель состоит из пяти последовательных фаз, разделённых формальными шлюзами (Gates). Каждая фаза реализуется через серию Agile-спринтов (2-6 недель). Ключевым элементом является формализованная процедура оценки на шлюзе [3].

Индекс готовности проекта (Project Readiness Index – PRI).

Для объективизации решения о переходе на следующую фазу вводится комплексный показатель:

$$PRI = w_t * S_t + w_f * S_f + w_s * S_s \quad (1) \text{ где:}$$

S_t, S_f, S_s – оценки по 10-балльной шкале технической выполнимости, финансовой обоснованности и стратегического соответствия.

w_t, w_f, w_s – весовые коэффициенты ($w_t + w_f + w_s = 1$).

Для энергомашиностроительных НИОКР рекомендуемые веса: $w_t = 0.5$, $w_f = 0.3$, $w_s = 0.2$.

Правило принятия решения на шлюзе [4]:

GO (Продолжить): $PRI \geq G_{min}$ и $S_t \geq S_{tmin}$. Для фаз с высокими затратами (например, Gate 3) $G_{min} = 7.5$, $S_{tmin} = 8.0$.

HOLD (Приостановить): $G_{min} > PRI \geq G_{kill}$. Требуется план корректирующих действий.

KILL (Прекратить): $PRI < G_{kill}$ или критическое несоответствие по одному критерию. Рекомендуемое $G_{kill} = 5.0$.

Структура фаз и пример артефактов для оценки

Фаза 0. Исследование и концепция (Gate 1): Agile-спринты по конкурентным концепциям. Артефакты для PRI: ТЭО, патентный ландшафт, дорожная карта.

Фаза 1. Предварительное проектирование (Gate 2): Спринты по цифровым двойникам. Артефакты: отчеты по CFD/FEM-моделированию, протоколы испытаний Proof-of-Concept прототипов.

Фаза 2. Детальное проектирование (Gate 3): Спринты по критическим узлам. Артефакты: полный пакет КД, результаты испытаний функциональных прототипов, обновлённый реестр рисков.

Фаза 3. Изготовление и испытания (Gate 4): Спринты по подготовке производства и тест-планам. Артефакты: опытный образец, протоколы приёмосдаточных испытаний.

Фаза 4. Валидация и передача.

Кейс-стади: Проект генератора двойного питания (ГДП) 10 МВт с ВТСП-элементами

Проект направлен на создание инновационного ГДП для прямоприводных ветроустановок. Ключевые риски: интеграция ВТСП обмотки ротора, система криогенного токосъёма, управление мощностью в несимметричных режимах [5].

Применение модели и план-фактный анализ вех:

Таблица 2. План-фактный анализ ключевых вех проекта ГДП 10 МВт.

Веха (Gate)	План (мес.)	Факт (мес.)	Отклонение	Расчёт PRI (пример для Gate 2)	Решение & Причина отклонения
G1: Выбор архитектуры	3.0	3.5	+0.5	$S_t=7, S_f=9,$ $S_s=8 \rightarrow$ $PRI=0.5*7+0.3*9$ $+0.2*8=7.8$	GO. Доп. спринт для сравнения систем охлаждения.
G2: Подтверждение осуществимости	9.0	10.0	+1.0	$S_t=8, S_f=8,$ $S_s=9 \rightarrow$ $PRI=0.5*8+0.3*8$ $+0.2*9=8.2$	GO. Внеплановый спринт по коррекции модели из-за гармоник.
Веха (Gate)	План (мес.)	Факт (мес.)	Отклонение	Расчёт PRI (пример для Gate 2)	Решение & Причина отклонения
G3: Утверждение на производство	18.0	19.0	+1.0	$S_t=8, S_f=7,$ $S_s=8 \rightarrow$ $PRI=0.5*8+0.3*7$ $+0.2*8=7.7$	GO (условно). Буферный спринт для демпферов.
					$S_f=7$ – рост
					стоимости

Веха (Gate)	План (мес.)	Факт (мес.)	Отклонение	Расчёт PRI (пример для Gate 2)	Решение & Причина отклонения
					материалов.
G4: Готовность образца	36.0	38.0	+2.0	$S_t=9, S_f=6,$ $S_s=7 \rightarrow$ $PRI=0.5*9+0.3*6$ $+0.2*7=7.7$	ГО. Задержка поставки стороннего оборудования.

Количественная оценка эффективности модели на кейсе:

Для оценки введём показатели на основе данных проектов-аналогов, выполненных по каскадной модели.

Экономия от раннего выявления рисков (ERMS) [6]:

$$ERMS = C_{overrun_analog} * k_s \quad (2)$$

Где $C_{overrun_analog}$ – средний перерасход в аналоговых проектах (20% от бюджета C_{plan}), k_s – коэффициент снижения потерь благодаря гибридной модели (0.6-0.7).

Для проекта ГДП:

$$ERMS = 0.2 * C_{plan} * 0.65 = 0.13 * C_{plan}$$

Стоимость итеративности (C_{oI}): Допзатраты на прототипы и частые тесты.

$$C_{oI} = C_{plan} * p_i \quad (3)$$

Где p_i – доля бюджета на итеративность (5-8%).

Для ГДП:

$$C_{oI} = C_{plan} * 0.07.$$

Чистый финансовый эффект (NFI):

$$NFI = ERMS - C_{oI} = C_{plan} * (0.2 * k_s - p_i) \quad (4)$$

Для ГДП:

$$NFI = C_{plan} * (0.13 - 0.07) = 0.06 * C_{plan}.$$

Вывод: чистая экономия составила 6% от общего бюджета НИОКР.

Эффективность по времени (TPE):

$$TPE = (T_{\text{delay_analog}} - T_{\text{delay_hybrid}}) / T_{\text{plan_analog}} (5) ;$$

где $T_{\text{delay_analog}}$ — средняя задержка аналогов (25%), $T_{\text{delay_hybrid}}$ — задержка в гибридном проекте (5.5% из Табл. 2).

Для ГДП:

$$TPE = (0.25 - 0.055) / 1.0 = 0.195 (19.5\%).$$

Вывод: относительное сокращение задержек ~20%.

Заключение

Предложенная и апробированная гибридная модель Agile-Stage-Gate с формализованным индексом PRI доказала свою эффективность в управлении высокорисковым проектом ГДП 10 МВт.

Основные преимущества, подтверждённые кейсом:

1. Снижение финансовых рисков: Механизм PRI и Agile-спринты позволили трансформировать потенциальные сверхбюджетные расходы (C_{overrun}) в управляемые инвестиции в итерационную проверку (C_{ol}), получив положительный NFI в +6% от бюджета.

2. Контролируемая гибкость: Шлюзы (Gates) предотвратили «расползание» Score, в то время как спринты дали необходимую свободу для инженерного творчества и быстрой коррекции.

3. Повышение предсказуемости: Таблицы 1 и 2 предоставляют руководителям инструмент для реалистичного планирования, учитывающего неизбежные исследовательские итерации.

Ограничения и область применения модели:

1. Модель требует зрелой корпоративной культуры и высококвалифицированных скрам-мастеров с инженерным бэкграундом.

2. Наибольший эффект достигается на ранних фазах проектов (Фазы 0-2), где неопределённость максимальна.

3. Формулы (2)-(5) требуют калибровки коэффициентов (k_s , p_i) под специфику конкретного предприятия.

Модель представляет собой не просто компиляцию двух подходов, а их системный синтез, формализованный через PRI и финансовые метрики (NFI, TPE). Она обеспечивает структурированное, но гибкое управление, превращая технологическую неопределённость из источника риска в управляемый ресурс для инноваций. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку отраслевых стандартов для коэффициентов в формулах (2)-(5) и создание специализированного ПО для поддержки принятия решений на шлюзах.

Литература

1. Cooper R.G., Sommer A.F. Agile-Stage-Gate: New Idea-to-Launch Method for Manufactured New Products is Faster, More Responsive // Industrial Marketing Management. – 2016. – Т. 2016. – Р. 167–180.
2. Козлов А.В., Петров И.С. Управление инновационными проектами в энергетике: от идеи к серийному образцу. – М.: Энергоатомиздат, 2020. – 256 с.
3. Тарасов Е.Н. Высокотемпературные сверхпроводники в электрических машинах большой мощности // Вестник РАН. Энергетика. – 2021. – № 4. – С. 45–56.
4. Project Management Institute. The Standard for Project Management and a Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). – 7th ed. – PMI, 2021. PMI, 2021.
5. ISO 21502:2020. Guidance on project management. – Международная организация по стандартизации, 2020. Международная организация по стандартизации, 2020.
6. Karlström D., Runeson P. Combining Agile Methods with Stage-Gate Project Management // IEEE Software. – 2005. – № 3. – Р. 43–49.