

Научная статья | Original paper

УДК 656.7.08:004.942

Современные подходы к моделированию деятельности пилотов гражданского воздушного судна

И.А. Махортов

Московский государственный психолого-педагогический университет
г. Москва, Российская Федерация
Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем
г. Москва, Российская Федерация
✉ inok546@yandex.ru

Резюме

Статья посвящена обзору современных математических подходов к моделированию деятельности пилота гражданского воздушного судна, направленных на повышение безопасности полётов, эффективности подготовки экипажей и обоснование проектных решений в области человеко-машинного интерфейса кабины. Рассматриваются три взаимодополняющие модели: модель целевой деятельности, описывающая непрерывные управляющие воздействия пилота; модель сопутствующей деятельности, представляющая структуру действий в виде марковских процессов с применением квантового спектрального анализа; а также модель деятельности пилота согласно предписаниям Руководства по лётной эксплуатации, ориентированная на процедурные сценарии и анализ ошибок. Показано, что совместное использование данных моделей позволяет формализовать действия пилота на различных этапах полёта, диагностировать уровень подготовки и психофизиологическое состояние, а также создавать виртуальных пилотов и интеллектуальные системы поддержки экипажа.

Ключевые слова: человеческий фактор, виртуальный пилот, синтез управления, моделирование деятельности пилота, безопасность полётов, человеко-машинный интерфейс, марковские модели

Для цитирования: Махортов, И.А. (2026). Современные подходы к моделированию деятельности пилотов гражданского воздушного судна. *Моделирование и анализ данных*, 16(1), 141—156. <https://doi.org/10.17759/mda.2026160109>



Modern approaches to modeling the activities of civil aircraft pilots

I.A. Makhortov

Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russian Federation
State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russian Federation

✉ inok546@yandex.ru

Abstract

The paper presents an overview of modern mathematical approaches to modeling pilot activity in civil aircraft, aimed at improving flight safety, crew training efficiency, and the design of cockpit human–machine interfaces. Three complementary models are considered: a goal-oriented activity model describing continuous control inputs of the pilot; a supporting activity model representing the structure of actions as Markov processes with the use of quantum spectral analysis; and a pilot activity model based on Flight Manual procedures, focused on procedural scenarios and error analysis. It is shown that the combined use of these models enables formalization of pilot behavior at different flight phases, diagnosis of training level and psychophysiological state, and the development of virtual pilots and intelligent crew-support systems.

Keywords: human factors, virtual pilot, control synthesis, pilot activity modeling, flight safety, human-machine interface, Markov models

For citation: Makhortov, I.A., (2026). Modern approaches to modeling the activities of civil aircraft pilots. *Modelling and Data Analysis*, 16(1), 141—156. (In Russ.). <https://doi.org/10.17759/mda.2026160109>

Введение

Исследования в области моделирования деятельности пилота гражданского самолета играют ключевую роль в повышении безопасности и эффективности управления воздушными судами. Современные технологии требуют точных моделей, которые отражают деятельность пилота в различных условиях полета.

Основные методы моделирования деятельности оператора в отечественной авиационной школе включают в себя:

1. аналитические методы, такие как алгоритмический и структурный анализ деятельности (Зинченко, Мунипов, 1979), направленные на построение формализованных моделей-нормативов;
2. обобщенный структурный метод Губинского, представляющий деятельность в виде универсальных функционально-логических схем взаимодействия оператора с информационной моделью и органами управления (Ломов, 1966);



3. экспериментальные методы на тренажерах и летающих лабораториях для изучения навыков и функциональных состояний в условиях, близких к реальным (Медведев, 1982).

Представленные качественные и структурные методы, включая мощный аппарат схем Губинского, закладывают необходимую теоретическую и методологическую основу. Однако для получения количественных прогнозов, оценки точных временных и вероятностных характеристик надежности системы, а также для анализа динамики сложных, нелинейных процессов в деятельности экипажа требуется переход на более высокий уровень формализации. Для достижения более точного и верифицируемого результата необходимо применение математического имитационного моделирования, позволяющего интегрировать эргономические и психофизиологические знания, в том числе представленные в структурных схемах, в динамические компьютерные модели. Принципам, подходам и конкретным примерам построения таких имитационных моделей будет посвящена следующая статья.

Современные технологии требуют точных моделей, которые отражают деятельность пилота в различных условиях полета.

Несмотря на автоматизацию, значительная часть авиационных происшествий происходит при ручном управлении самолетом. Исследования показывают, что на каждый час полета приходится всего пять минут ручного пилотирования, во время которых происходит 67% аварий и инцидентов (Механтьева, Масальтин, Лизнев, 2017). Это подчеркивает необходимость моделей, способных предсказать и предотвратить ошибки пилотов в критических ситуациях.

Современные симуляторы и тренажеры, основанные на математических моделях, эффективно обучают пилотов, имитируя различные сценарии полетов. Такие тренировки улучшают навыки принятия решений в стрессовых и нестандартных ситуациях, что повышает общий уровень безопасности и профессиональной подготовки.

Анализ взаимодействия пилотов с бортовыми системами позволяет выявить наиболее эффективные конфигурации человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) (Грешников и др., 2024; Куравский и др., 2025). Это способствует улучшению эргономики кабины, снижению нагрузки на пилотов и повышению эффективности их работы.

Математические модели деятельности пилота служат основой для создания «виртуальных пилотов» и интеллектуальных помощников, которые выполняют задачи пилотирования в автоматическом режиме или помогают пилоту в управлении самолетом (Грешников и др., 2024; Куравский и др., 2024)

Постоянное усложнение воздушных судов и появление новых типов авиационных миссий требуют гибких и адаптивных моделей, способных учитывать изменения в эксплуатации и интеграцию новых технологий.

Исследования в области моделирования действий пилота направлены на снижение рисков, повышение безопасности и эффективности полетов, а также на улучшение подготовки и работы пилотов. Внедрение таких моделей в авиационную практику способствует созданию более надежной и безопасной авиационной индустрии.



Цель данной статьи заключается в предоставлении обзора трех основных подходов к математическому моделированию действий пилота гражданского самолета. Рассматриваются следующие модели:

- **Математическая модель целевой деятельности пилота:** Эта модель учитывает конкретное содержание непрерывных воздействий пилотов на органы управления, обеспечивая воздействие на управляющие поверхности и двигатель.
- **Математическая модель сопутствующей деятельности:** Модель представляет деятельность пилота через матрицы вероятностей переходов между элементарными операциями, включая использование квантовых представлений для анализа и диагностики.
- **Математическая модель деятельности пилота согласно предписаниям Руководства по лётной эксплуатации (РЛЭ):** Эта модель учитывает дискретные управляющие воздействия на бортовые системы и индикацию, моделируя поведение пилота в соответствии с инструкциями РЛЭ.
Основными задачами статьи являются:
- **Описание основных характеристик каждой модели:** Рассмотрение ключевых особенностей моделей, их структурных компонентов и применяемых математических методов.
- **Анализ применения моделей в практике:** Примеры использования каждой модели для решения конкретных задач, таких как исследование особенностей пилотирования, профессиональная подготовка экипажа, оценка взаимодействия с бортовыми системами и диагностика психофизиологических состояний.
- **Сравнительный анализ моделей:** Оценка преимуществ и недостатков каждой модели по критериям точности, адаптивности, вычислительной сложности и применимости в реальных условиях эксплуатации.
- **Рекомендации по выбору модели:** Предоставление рекомендаций по выбору наиболее подходящей модели в зависимости от специфики решаемой задачи, таких как обучение пилотов, разработка ЧМИ, обеспечение безопасности полетов и создание автоматизированных систем управления.

Математическая модель целевой деятельности пилота

Назначение и общая идея модели

Математическая модель целевой деятельности пилота предназначена для анализа и исследования действий, непосредственно связанных с управлением воздушным судном (ВС) (Kuravsky et al., 2023), то есть непрерывных управляющих воздействий на органы управления, приводящих к изменению состояния ВС. В отличие от моделей, описывающих сопутствующую или процедурную деятельность, здесь в центре внимания находятся именно динамика «состояние–управление» и то, как пилот формирует управляющие воздействия для достижения заданной цели полёта или выполнения конкретного манёвра.



Модель представляет собой многомерную нестационарную матричную модель движения и управления с дискретным временем, построенную по данным, собранным в реальных условиях полёта и/или на тренажёрах (Kuravsky et al., 2023). Нестационарность позволяет учитывать изменение динамических свойств системы и стратегий управления во времени, а многомерность — работать с расширенными векторами состояния и управления, включающими как кинематические и динамические параметры, так и положения органов управления.

Основное назначение модели:

- формализовать целевую деятельность пилота при выполнении манёвров (в том числе в сложных и нештатных режимах);
- обеспечить основу для идентификации паттернов управления (траекторий «состояние–управление») пилотов различной квалификации;
- служить ядром для задач синтеза управления по эталонным паттернам, включая построение виртуального пилота и элементов автоматизации.

Идентификация параметров модели

Идентификация параметров модели осуществляется на основе массивов эмпирических данных, полученных при выполнении типовых и специальных манёвров опытными пилотами на стендах и тренажёрах. Для каждого типа манёвра формируются выборки фрагментов полёта, включающие как участки с практически свободным движением при малых или известных управляющих воздействиях, так и участки активного пилотирования. На участках с минимальным управлением восстанавливаются матричные операторы, описывающие собственную динамику воздушного судна, тогда как на участках активного управления уточняются операторы, отвечающие за влияние управляющих воздействий пилота. Переопределённость задач идентификации, когда число наблюдений существенно превосходит число оцениваемых параметров, используется для повышения устойчивости и надёжности получаемых оценок. Особое внимание уделяется детальному представлению непрерывных воздействий пилота: регистрация отклонений рулей высоты, направления, элеронов и других управляющих поверхностей, а также изменения режимов работы двигателя позволяет явно учитывать реальное содержание действий экипажа и связывать их с наблюдаемой динамикой состояния воздушного судна.

Синтез управления по образцу

На базе идентифицированной модели реализуется механизм синтеза управления по образцу (по паттерну), в рамках которого эталонные траектории движения и соответствующие им управляющие воздействия, полученные от опытных экипажей, используются как целевые образцы поведения. Для каждого рассматриваемого манёвра формируется библиотека эталонных паттернов, представляющих корректное выполнение задания в различных условиях. Инструментальные средства анализа типа ISFA обеспечивают распознавание текущего манёвра по параметрам полёта и выбор одного или нескольких релевантных паттернов из специализированной базы данных. Далее программное средство синтеза, например ISFS, опираясь



на идентифицированную модель динамики и выбранный паттерн, вычисляет последовательность корректирующих управляющих воздействий, переводящих реальное состояние воздушного судна в окрестность эталонной траектории и обеспечивающих последующее следование ей. В постановку синтеза включаются технические ограничения на диапазоны и скорости изменения отклонений органов управления, режимы работы двигателей и допустимые области изменения параметров полёта, таких как перегрузки, углы атаки, скорости и высоты. В результате модель целевой деятельности может рассматриваться как математическое ядро для построения автопилотов нового поколения и систем интеллектуальной поддержки пилота, реализующих управление по образцу квалифицированного экипажа.

Примеры практического применения

Практические области применения модели целевой деятельности охватывают несколько взаимосвязанных классов задач. В задачах вывода воздушного судна из сложных пространственных положений модель используется как ядро виртуального пилота: на основе эталонных паттернов вывода из СПП и текущего измеренного состояния формируются управляющие команды, возвращающие воздушное судно в безопасную область параметров полёта при соблюдении эксплуатационных ограничений. Это позволяет отрабатывать и количественно оценивать алгоритмы поддержки пилота в критических режимах, в том числе в составе комплексных демонстраторов технологий «виртуального второго пилота», ориентированных на автоматизированное или полуавтоматизированное выполнение манёвров вывода (Куравский и др., 2024).

На базе модели целевой деятельности строятся виртуальные пилоты и программные прототипы, имитирующие действия человека по управлению воздушным судном в различных условиях и сценариях. Такие виртуальные пилоты используются при разработке и тестировании программно-технических средств, систем автоматизации полёта и интеллектуальных помощников экипажа, позволяя проводить воспроизводимые эксперименты с заданными уровнями квалификации и стратегиями пилотирования. Модель также применяется при анализе аварий и инцидентов: по зарегистрированным данным о траектории полёта и управляющих воздействиях выполняется реконструкция действий пилота в предаварийной и аварийной фазах, сопоставление этих действий с эталонными паттернами и выявление ключевых отклонений, способствовавших развитию события. На основе таких реконструкций формируются обоснованные рекомендации по корректировке процедур, совершенствованию подготовки экипажей и развитию алгоритмов автоматизации.

Ещё одним направлением применения модели является оптимизация человеко-машинного интерфейса и информационно-управляющего поля кабины. Сопоставляя паттерны управления и динамику полёта при различных вариантах индикации и размещения органов управления, можно количественно оценивать влияние конфигурации ИУП на характер управляющих воздействий, нагрузку на пилота и устойчивость к ошибкам. Это создаёт формализованную основу для принятия решений



по эргономике и функциональной структуре кабины. В совокупности модель целевой деятельности выступает связующим звеном между реальной динамикой управления, эталонным поведением опытных пилотов и алгоритмами автоматизированного и адаптивного управления, что делает её ключевым элементом при построении виртуальных пилотов и систем интеллектуальной поддержки экипажа.

Математическая модель сопутствующей деятельности

Протоколы, дескрипторы и марковская модель

Математическая модель сопутствующей деятельности пилота представляет деятельность как марковский процесс с дискретным временем, заданный матрицей вероятностей переходов между элементарными операциями. Модель ориентирована на анализ ситуаций, где конкретные значения управляющих воздействий не критичны, а важны общий контекст и последовательность действий во времени. (Куравский, Козырев, Грешников, 2024; Орищенко, Грешников, 2024).

Работа пилота описывается через дескрипторы элементарных операций, выделяемые по данным бортовых и внешних средств регистрации: видеоокулография (попадания взгляда в зоны интереса на приборной доске), аудиозаписи (голосовые команды), регистрация воздействий на органы управления (РУС, РУД, педали) и др. Каждое действие декомпозируется на последовательность таких операций, которые далее кодируются как конечное множество состояний марковской цепи.

На основе наблюдаемых последовательностей формируется матрица вероятностей переходов между типами элементарных операций, а также оценивается стационарное распределение. Это позволяет формально анализировать деятельность пилота как марковский процесс: изучать частоты посещения отдельных состояний и их комбинаций, выявлять устойчивые шаблоны поведения и потенциально опасные траектории в пространстве состояний. Получающиеся матрицы служат основой для дальнейшей квантовой обработки и диагностики. (Куравский, Козырев, Грешников, 2024; Куравский, Баранов, Юрьев, 2010).

Квантовые представления, спектральная метрика и квантовая фильтрация

Для повышения информативности анализа матрица переходов и производные от неё характеристики отображаются в квантовые представления. На первом шаге состояния марковской цепи группируются в кластеры (по содержанию или по статистическим признакам), а полученные кластеры интерпретируются как «кубиты» с биполярными измерениями. Эволюция системы задаётся оператором, описывающим переходы между кластерами; тем самым формируется квантовая модель, допускающая применение квантового спектрального анализа.

Квантовый спектральный анализ позволяет проводить количественное сопоставление периодичности и интенсивности выполнения типовых элементарных операций, выявлять скрытые периодичности обхода кластеров и специфические паттерны



последовательностей действий. Это даёт более подробное и содержательное представление о структуре деятельности по сравнению с прямым анализом матриц переходов. На спектре строится спектральная метрика, по которой сравниваются траектории различных пилотов и различные варианты информационно-управляющего поля кабины.

Введена процедура квантовой фильтрации, уменьшающая влияние шума и малых объёмов данных: вместо отдельных реализаций, рассматриваются согласованные траектории в пространстве квантовых представлений, что повышает устойчивость последующей классификации и разделения групп.

Диагностика, оценка ИУП и области применения

Статистические испытания показали, что квантовые представления и спектральная метрика обеспечивают надёжное разделение групп пилотов по характеристикам сопутствующей деятельности. На данных упражнений с 11 курсантами (включая операции по взгляду и манипуляциям органами управления) после квантовой фильтрации получены значимые F-статистики, тогда как альтернативный подход на основе взаимных правдоподобий не обеспечил сопоставимой отделимости групп. Это подтверждает диагностическую ценность предлагаемого аппарата при ограниченных объёмах протоколов.

Модель сопутствующей деятельности имеет несколько ключевых направлений применения:

- Сравнительная оценка ИУП кабины и бортовых систем. По матрицам переходов и спектральным характеристикам оценивается, насколько разные компоновки и логика индикации/управления влияют на структуру деятельности пилота, позволяют ли они уменьшить количество лишних операций и потенциально опасных паттернов. (Грешников и др., 2024, Куравский и др., 2025; Куравский, Козырев, Грешников, 2024).
- Оценка профессиональной подготовки и склонности к ошибкам. Анализ вероятностей переходов и посещаемости кластеров позволяет выявлять стратегии действий, связанные с повышенным риском ошибок или нештатных действий, и использовать эти выводы в учебном процессе и сертификации. (Куравский, Козырев, Грешников, 2024; Орищенко, Грешников, 2024).
- Поддержка адаптивных систем управления. На основе наблюдаемых паттернов сопутствующей деятельности возможна настройка адаптивных алгоритмов, которые учитывают текущие особенности поведения пилота (перегруженность, неуверенность, тенденцию к ошибочным циклам действий) при выборе подсказок или уровней автоматизации. (Куравский и др., 2024).
- Анализ аварий и инцидентов. Модель применяется для реконструкции последовательности действий пилота перед событием, выявления критических участков протокола и формулирования рекомендаций по изменению ИУП или процедур. (Куравский, Козырев, Грешников, 2024; Механтьева, Масальтин, Лизнев, 2017; Натальин, 2009).
- Создание виртуальных пилотов и тренажёрных сценариев. Статистически типичные паттерны сопутствующей деятельности используются для построения



моделей «виртуального пилота» и генерации реалистичных сценариев взаимодействия с ИУП в тренажёрах, что повышает реалистичность подготовки.

Математическая модель деятельности пилота согласно предписаниям Руководства по лётной эксплуатации (РЛЭ)

Марковская модель процедур по РЛЭ

Математическая модель деятельности пилота согласно предписаниям Руководства по лётной эксплуатации (РЛЭ) описывает выполнение процедур как марковский процесс с дискретными состояниями и дискретным временем. В качестве состояний рассматриваются шаги инструкций РЛЭ и связанные с ними возможные варианты развития событий, а дискретная временная шкала отражает высокий темп появления событий в кабине и необходимость оперативной реакции на них в режиме реального времени. (Орищенко, Грешников, 2024).

Полёт воздушного судна делится на этапы, для каждого из которых в РЛЭ задаются сценарии выполнения (штатные и внештатные). Для каждого такого сценария заранее формируется абстрактная марковская цепь, структура которой строго подстраивается под конкретную процедуру из РЛЭ: отдельным состояниям соответствуют шаги инструкции («установить режим двигателя», «проверить индикацию», «выполнить переключение» и т. п.). Благодаря этому, модель не воспроизводит непрерывную динамику полёта, а фокусируется на последовательности регламентированных действий.

Структура состояний: нормальные шаги, ошибки и конечные исходы

Каждое состояние марковского процесса, связанное с «нормальной» траекторией, соответствует корректному выполнению конкретного шага РЛЭ. Состояния включают как непосредственные действия пилота (настройка параметров полёта, управление бортовыми системами), так и контрольные операции (проверка индикации, подтверждение условий, взаимодействие с наземными службами).

Параллельно с этим в модель вводятся состояния ошибок, отражающие ситуации, когда соответствующий шаг инструкции не выполнен или выполнен неверно. Предполагается, что ошибка может возникнуть на любом шаге процедуры; это реализуется тем, что для каждого шага предусмотрены переходы как в состояние корректного выполнения, так и в состояние ошибки, с вероятностями, зависящими от параметров пилота и сценария. Поскольку многие ошибки могут быть обнаружены и исправлены самим пилотом, между ошибочными состояниями и «правильной» веткой выполнения предусмотрены переходы, моделирующие возврат к корректной процедуре.

Отдельно выделяются конечные положительные и отрицательные состояния. Положительные терминальные состояния соответствуют успешному завершению сценария в соответствии с РЛЭ, отрицательные — ситуациям, когда из-за накопления или характера ошибок сценарий не может быть завершён благополучно в рамках данного набора действий (например, пропущены критические шаги, нарушены условия безопасности).



Виртуальные пилоты, «коэффициент опытности» и области применения

На основе марковской модели по РЛЭ строятся «виртуальные пилоты», воспроизводящие предписанные процедуры в виде последовательностей состояний (Орищенко, Грешников, 2024), (Грешников и др., 2024). Эти виртуальные пилоты используются для:

- Имитации действий реальных пилотов в различных штатных и внештатных сценариях, что позволяет проверять и отрабатывать процедуры управления ВС;
- Обучения и тренажёрной подготовки, где виртуальный пилот задаёт эталонную траекторию выполнения процедуры, а действия обучаемого сравниваются с ней по последовательности состояний и ошибкам. (Куравский, Козырев, Грешников, 2024; Орищенко, Грешников, 2024).

Для учёта индивидуальных различий в подготовке вводится дополнительный параметр — «коэффициент опытности». Этот коэффициент вычисляется как функция от характеристик пилота; в текущей реализации в качестве входных данных используются возраст и суммарный налёт. Полученное значение коэффициента влияет на элементы матрицы переходов: при более высоком уровне опытности снижается вероятность переходов в ошибочные состояния и/или увеличивается вероятность успешного возвращения с траектории ошибок на корректную процедуру.

Модель по РЛЭ применяется также для оценки эффективности взаимодействия пилота с различными вариантами информационно-управляющего поля (ИУП). Изменяя конфигурацию индикации и органов управления и наблюдая, как меняются вероятности ошибок на отдельных шагах и вероятности достижения терминальных состояний, можно сравнивать альтернативные проектные решения и выбирать конфигурации, более устойчивые к человеческим ошибкам.

Ещё одно направление применения — анализ деятельности пилотов и экипажей с различными уровнями подготовки и психофизиологическими состояниями. Параметризуя матрицу переходов по коэффициенту опытности и другим факторам, можно исследовать, как меняется распределение ошибок по шагам процедуры, какие части РЛЭ наиболее уязвимы к снижению внимания или перегрузке, и какие изменения в обучении или интерфейсе способны уменьшить риск.

В практических задачах модель по РЛЭ используется и как основа для алгоритмов автоматизированного управления, интегрируемых в системы автоматизации и автопилоты. В этом случае марковская модель задаёт целевую последовательность действий, а автоматизация частично или полностью берёт на себя выполнение шагов, требующих высокой точности и повторяемости. Кроме того, модель применяется при анализе аварий и инцидентов: реконструкция цепочки состояний по РЛЭ на основе данных бортовых регистраторов позволяет восстановить, какие шаги были пропущены или выполнены с ошибками, и сформировать рекомендации по корректировке процедур и улучшению ИУП для повышения безопасности. (Механтьева, Масальгин, Лизнев, 2017; Натальин, 2009).

Практические выводы для применения моделей на разных этапах полёта

Совместное использование трёх математических моделей деятельности пилота позволяет связать динамическое управление, процедурные действия и поведение



пилота с этапами всего цикла полёта — от предполётной подготовки до завершения посадки и разрешения нештатных ситуаций. Модель целевой деятельности описывает непрерывные управляющие воздействия на органы управления ВС, модель сопутствующей деятельности — структуру действий и распределение внимания по элементарным операциям, а модель деятельности по РЛЭ — выполнение регламентированных процедур в форме марковских сценариев полёта.

В контексте предполётной подготовки модель по РЛЭ даёт возможность имитационно отрабатывать сценарии штатных и аварийных процедур до выхода на реальный полёт. Представление предписаний РЛЭ в виде марковской цепи со штатными, ошибочными и конечными состояниями позволяет количественно оценивать вероятность корректного завершения сценариев для пилотов с различным уровнем подготовки и психофизиологическим состоянием, а также калибровать тренировочные программы и допуск к полётам, включая моделирование типовых сценариев отказов и решений экипажа.

На этапах взлёта, активного набора высоты, захода на посадку и посадки доминирует модель целевой деятельности, так как именно в эти периоды основную роль играет непрерывное управление динамикой ВС. Каноническая многомерная нестационарная матричная модель движения и управления с дискретным временем, идентифицируемая по данным опытных экипажей, позволяет формировать эталонные паттерны выполнения манёвров и сравнивать с ними траектории управления пилотов иной квалификации. На основе этих паттернов реализуется адаптивный синтез управления по образцу, показавший в экспериментах по выводу из сложного пространственного положения приемлемое согласование синтезированных и наблюдаемых траекторий, что служит основой для функций «виртуального второго пилота» и коррекции действий пилота средней квалификации в критических режимах.

На участках полёта, где преобладают задачи мониторинга и переработки информации — в устойчивом наборе, крейсере и значительной части снижения, а также при анализе эффективности кабины экипажа — ключевую роль играет модель сопутствующей деятельности. Представляя деятельность пилота в виде матрицы вероятностей переходов между элементарными операциями (переводы взгляда между зонами интереса, обращения к органам управления, голосовые команды) и используя квантовый спектральный анализ этих матриц, модель обеспечивает количественную оценку структуры внимания, когнитивной нагрузки и эффективности различных вариантов информационно-управляющего поля кабины. На эмпирических данных продемонстрирована возможность устойчиво различать группы пилотов по уровню подготовленности и стрессу, а также выбирать компоновки ИУП, обеспечивающие более согласованный баланс внимания в соответствии с требованиями конкретных манёвров.

В результате модель по РЛЭ охватывает процедурное измерение деятельности пилота во всём цикле — от предполётной подготовки до выполнения аварийных и штатных чек-листов; модель целевой деятельности обеспечивает анализ и синтез непрерывного управления в динамически сложных и критических режимах; модель сопутствующей деятельности описывает поведение и взаимодействие пилота с ИУП с точки зрения вероятностной структуры элементарных операций и связанных с ней



состояний. Их согласованное применение даёт целостный инструмент для проектирования кабины, разработки тренажёров и построения интеллектуальных систем поддержки экипажа, адаптированных к специфике разных этапов полёта.

Заключение

Представлен систематический обзор и сопоставление подходов к моделированию деятельности пилота гражданского воздушного судна с позиции их дальнейшего использования в системах интеллектуальной поддержки, включая концепцию «виртуального второго пилота». При этом были решены несколько конкретных задач:

- выделены и формализованы три ключевые линии моделирования — модель целевой деятельности, модель сопутствующей деятельности и модель по РЛЭ;
- для каждой линии указаны исходные предпосылки, математический аппарат и требования к данным;
- показаны типовые области применения (синтез управления, диагностика, обучение, анализ ошибок);
- проведён сравнительный анализ сильных и слабых сторон подходов;
- очерчено место этих моделей в общей архитектуре интеллектуальной поддержки экипажа и виртуального второго пилота.

Совместное применение трёх моделей в единой методологической рамке обеспечивает охват ключевых аспектов деятельности пилота: непрерывного управления, сопутствующих действий и процедурной составляющей. Это, с одной стороны, позволяет выстраивать сквозные сценарии анализа и поддержки — от диагностики текущей деятельности до синтеза управляющих воздействий на сложных режимах, — а с другой стороны, даёт количественный аппарат для решения практических задач: разработки и тестирования алгоритмов виртуального второго пилота, совершенствования тренажёрных программ и объективной оценки подготовки лётного состава, реконструкции аварий и инцидентов, оптимизации компоновки и функциональности информационно-управляющего поля кабины.

Принципиально важно, что данные модели не являются универсальными в смысле одной «общей» модели на все случаи, а должны детерминироваться по назначению и этапу полёта. Разнотипность решаемых задач — от вывода из СПП и предупреждения аномального пилотирования до оценки взаимодействия с ИУП и имитации процедур по РЛЭ — приводит к различным требованиям к временным масштабам, составу переменных, детализации управляющих воздействий и допустимой аппроксимации динамики. Взлёт и посадка характеризуются высокой насыщенностью непрерывных управляющих действий и жёсткими временными ограничениями; для этих этапов наиболее информативна модель целевой деятельности. В крейсерском полёте и при решении задач оценки стратегии взаимодействия с кабиной доминируют сопутствующие операции и распределение внимания, что делает более адекватной модель сопутствующей деятельности. Процедурные сценарии отказов



и нестандартных ситуаций естественным образом описываются моделью по РЛЭ. Следовательно, для повышения точности, интерпретируемости и практической ценности выводов необходимо строить и применять специализированные модели, жёстко привязанные к своим предметным областям и этапам полёта, а не пытаться описать все аспекты деятельности пилота в рамках одной укрупнённой схемы. Такой подход соответствует исходной постановке, ориентированной на создание комплекса специализированных моделей для разных приложений и уровней подготовки экипажа.

Показано, что использование специализированных моделей деятельности пилота, опирающихся на эмпирические данные и современные методы анализа (включая квантовые представления марковских процессов), позволяет существенно повысить информативность и точность выводов по сравнению с традиционными подходами. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются интеграция описанных моделей в бортовые и стендовые комплексы нового поколения, расширение библиотек эталонных паттернов за счёт данных реальной эксплуатации, а также создание адаптивных систем интеллектуальной поддержки, способных в реальном времени выбирать и комбинировать модели в зависимости от этапа полёта, сценария, технического состояния воздушного судна и состояния экипажа.

Список источников / References

1. Адаменко, А.Н., Ашеров, А.Т., Бердников, И.Л., и др.; Губинский, А.И., Евграфов, В.Г. (общ. ред.). (1993). Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания: справочник. Москва: Машиностроение. (527 с.). ISBN 5-217-02011-3.
Adamenko, A.N., Asherov, A.T., Berdnikov, I.L., et al. (1993). Information-controlling human-machine systems: research, design, testing (handbook). Moscow: Mashinostroenie. (In Russian).
2. Грешников, И.И., Куравский, Л.С., Логачев, С.Д., Махортов, И.А. (2024). Модель пилота как средство валидации перспективной кабины и бортового оборудования воздушного судна. *International Journal of Open Information Technologies*, 12(4), 100—107.
Greshnikov, I.I., Kuravsky, L. S., Logachev, S.D., & Makhortov, I.A. (2024). Pilot model as a means of validation of advanced crew cockpit and on-board equipment set. *International Journal of Open Information Technologies*, 12(4), 100—107.
3. Зараковский, Г.М. (1966). Психофизиологический анализ трудовой деятельности. Москва: Наука. (114 с.).
Zarakovsky, G.M. (1966). Psychophysiological analysis of work activity. Moscow: Nauka. (In Russian).
4. Зинченко, В.П., Мунипов, В.М. (1979). Основы эргономики. Москва: Изд-во МГУ. (344 с.).
Zinchenko, V.P., & Munipov, V.M. (1979). Fundamentals of ergonomics. Moscow: Moscow State University Press. (In Russian).
5. Козырев, А.Д., Грешников, И.И. (2024). Концепция удалённого пилота в контексте обеспечения посадки пассажирского самолёта. В: XIV Всероссийское совещание по проблемам



- управления (Москва, 17—20 июня 2024 г.): сборник научных трудов (с. 1273—1277). Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.
- Kozyrev, A.D., & Greshnikov, I.I. (2024). The concept of a remote pilot in the context of ensuring the landing of a passenger aircraft. In *Proceedings of the 14th All-Russian Meeting on Control Problems (Moscow, Russia, June 17—20, 2024)* (pp. 1273—1277). Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences.
6. Куравский, Л.С. Квантовые представления и их применение в диагностике. — М.: Де Либри, 2024. — 128 с.
Kuravsky, L.S. *Quantum Representations and Their Applications in Diagnostics*. — М.: De Libri, 2024. — 128 p.
 7. Куравский, Л.С., Баранов, С.Н., Юрьев, Г.А. (2010). Синтез и идентификация скрытых марковских моделей для диагностики усталостного разрушения. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, (12), 20—36.
Kuravsky, L.S., Baranov, S.N., & Yuryev, G.A. (2010). Synthesis and identification of hidden Markov models for fatigue damage diagnosis. *Neurocomputers: Design and Applications*, (12), 20—36. (In Russian).
 8. Куравский, Л.С., Грешников, И.И., Глухова, Э.Д., Юрьев, Г.А., Юрьева, Н.Е., Поляков, Б.Ю., Соколов, А.В., Махортов, И.А., Кислицын, Е.Д. (2025). Комплексная оценка информационно-управляющего поля кабины экипажа гражданского воздушного судна: исследуемые показатели и методы их анализа. *Экспериментальная психология*, 18(2), 236—260. (<https://doi.org/10.17759/exppsy.2025180214>).
Kuravsky, L.S., Greshnikov, I.I., Glukhova, E.D., et al. (2025). Comprehensive assessment of the information and control field of the cockpit of a civil aircraft: indicators and methods of their analysis. *Experimental Psychology*, 18(2), 236—260. (<https://doi.org/10.17759/exppsy.2025180214>).
 9. Куравский, Л.С., Грешников, И.И., Махортов, И.А., Бондаренко, Н.В. (2024). Интеллектуальная поддержка экипажа при выводе гражданского воздушного судна из сложного пространственного положения. *Моделирование и анализ данных*, 14(2), 124—139. (<https://doi.org/10.17759/mda.2024140208>).
Kuravsky, L.S., Greshnikov, I.I., Makhortov, I.A., & Bondarenko, N.V. (2024). Intelligent Crew Support when Recovering a Civil Aircraft from a Difficult Spatial Position. *Modelling and Data Analysis*, 14(2), 124—139. (<https://doi.org/10.17759/mda.2024140208>).
 10. Куравский, Л.С., Козырев, А.Д., Грешников, И.И. (2024). Математическая модель сопутствующей деятельности пилота и ее применение для объективной оценки его состояния и профессиональной подготовки. *Экспериментальная психология*, 17(1), 161—180. (<https://doi.org/10.17759/exppsy.2024170111>).
Kuravsky, L.S., Kozyrev, A.D., & Greshnikov, I.I. (2024). Mathematical Model of the Pilot Associated Activities and Its Application for Objective Professional Training and Condition Assessment. *Experimental Psychology*, 17(1), 161—180. (<https://doi.org/10.17759/exppsy.2024170111>).
 11. Ломов, Б.Ф. (1966). *Человек и техника: Очерки инженерной психологии*. Москва: Советское радио. (464 с.).



- Lomov, B.F. (1966). *Man and Technology: Essays in Engineering Psychology*. Moscow: Sovetskoye Radio. (In Russian). (https://books.google.com/books/about/Man_and_Technology.html?id=QtoEYVAX6FoC).
12. Медведев, В.И. (1982). Устойчивость физиологических и психологических функций человека при действии экстремальных факторов. Ленинград: Наука. (104 с.).
Medvedev, V.I. (1982). Stability of physiological and psychological functions under the influence of extreme factors. Leningrad: Nauka. (In Russian).
13. Механтьева, Л.Е., Масалытин, А.В., Лизнев, А.Н. (2017). Анализ крупнейших авиакатастроф пассажирских самолётов начала XXI века. Прикладные информационные аспекты медицины, 20(3), 183—186.
Mekhantyeva, L.E., Masalytin, A.V., & Liznev, A.N. (2017). Analysis of the largest passenger aircraft accidents of the early 21st century. *Applied Information Aspects of Medicine*, 20(3), 183—186. (In Russian).
14. Натальин, В.М. (2009). Моделирование управляющих действий пилота в условиях особых ситуаций. Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации, (138), 205—209.
Natalyin, V.M. (2009). Modeling of pilot control actions in abnormal situations. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, (138), 205—209. (In Russian).
15. Орищенко, В.А., Грешников, И.И. (2024). Моделирование деятельности экипажей при пилотировании воздушных судов. Моделирование и анализ данных, 14(1), 89—102. (<https://doi.org/10.17759/mda.2024140106>).
Orishchenko, V.A., & Greshnikov, I. I. (2024). Modelling of Pilot Activities when Piloting Aircraft. *Modelling and Data Analysis*, 14(1), 89—102. (<https://doi.org/10.17759/mda.2024140106>).
16. Kuravsky, L.S., Greshnikov, I.I., Yuryev, G.A., Zlatozrezhev, V.I. (2023). Synthesis of Civil Aircraft Control Using Empirical Data and Quantum Filtering. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 44(6), 2079—2100. (<https://doi.org/10.1134/S1995080223060276>).

Информация об авторах

Махортов Иннокентий Александрович, аспирант, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация; Инженер 2-й категории, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ФАУ ГосНИИАС), г. Москва, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6919-9419>, e-mail: inok546@yandex.ru

Information about the authors

Innokenty A. Makhortov, Graduate Student, Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE), Moscow, Russia; Engineer, Category II, State Research Institute of Aviation Systems (GosNIAS), Moscow, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6919-9419>, e-mail: inok546@yandex.ru



Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 15.01.2026

Поступила после рецензирования 23.01.2026

Принята к публикации 27.01.2026

Опубликована 31.03.2026

Received 2026.01.15

Revised 2026.01.23

Accepted 2026.01.27

Published 2026.03.31