

На правах рукописи



Мельничук Александр Владимирович

**РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ РАСЧЕТА ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВОЗДУШНЫХ СУДОВ
НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПЛАНШЕТА ПИЛОТА**

Специальность 05.13.01 — «Системный анализ, управление
и обработка информации»
(авиационная и ракетно-космическая техника)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2020

Работа выполнена на кафедре «Математическая кибернетика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель: **Судаков Владимир Анатольевич**
доктор технических наук, доцент,
Ведущий научный сотрудник отдела "Проблемы
математического моделирования и
высокопроизводительных вычислений"
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Официальные оппоненты: **Шумов Владислав Вячеславович**,
доктор технических наук, доцент, профессор
отделения погранологии Международной
академии информатизации

Волович Константин Иосифович,
кандидат технических наук, начальник управления
информационно-телекоммуникационных систем,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской Академии Наук

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем
управления им. В. А. Трапезникова Российской
академии наук, 117997, ГСП-7, г. Москва,
Профсоюзная, 65**

Защита состоится 15 апреля 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.12, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте института по адресу https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=119283

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.125.12
Доктор технических наук



А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Несмотря на то, что взлет и посадка составляют меньшую часть полета, указанные этапы являются наиболее сложными и имеют критичное значение с точки зрения безопасности полетов. При этом огромное значение для обеспечения безопасного выполнения взлета и посадки имеет расчет взлетно-посадочных характеристик (ВПХ). Основным назначением расчета ВПХ является определение:

- максимальной взлетной и посадочной массы воздушного судна (ВС);
- взлетных и посадочных скоростей (V_1 – скорость принятия решения, представляющая собой максимальную скорость ВС при разбеге на взлетно-посадочной полосе (ВПП), при которой в случае отказа двигателя взлёт может быть как безопасно прекращён, так и безопасно продолжен; V_R – скорость подъема передней опоры шасси; V_2 – безопасная скорость взлета; V_{REF} – скорость захода на посадку).

Значения ВПХ зависят от множества эксплуатационных условий: фактической взлетной массы ВС, температуры окружающего воздуха, давления на аэродроме, характеристик взлетно-посадочной полосы (заявленные длины, уклон, состояние ее поверхности), наличия препятствий по направлению взлета, скорости и направления ветра, а также от управляющих воздействий пилота путем регулирования таких параметров ВС, как тяга двигателя, положение механизации крыла, режим торможения. Также при расчете ВПХ могут учитываться ограничения, определенные наличием допустимых отложенных дефектов и отклонений конфигурации ВС (в соответствии с MEL – перечнем минимального исправного оборудования и CDL – перечнем допустимых повреждений и неисправностей), или определенные политикой эксплуатанта.

В настоящее время для определения ВПХ отечественных ВС используются номограммы и/или таблицы зависимостей взлетно-посадочных характеристик, приведенные в Руководстве летной эксплуатации (РЛЭ) ВС. Выполнение расчета с их помощью вручную – это длительный процесс, требующий повышенного внимания, а использование некорректных результатов расчета может привести к авиационному инциденту или авиакатастрофе.

В последние годы для определения ВПХ зарубежных ВС широкое распространение получили специализированные системы EFB (Electronic Flight Bag – электронные полетные планшеты). EFB – это компьютерная информационная система для летного экипажа, состоящая из оборудования и прикладных программ и позволяющая ему использовать функции EFB по хранению, обновлению, отображению и обработке данных, применяемых при выполнении полета или обязанностей, связанных с полетом.

Существующие системы обладают следующими недостатками:

- EFB для российских гражданских типов ВС не представлены на коммерческом рынке;

- база знаний EFB для импортных ВС «жестко» прописана в программном коде, в связи с чем их модификация требует существенных затрат времени и средств на оплату труда программистов;
- существующие решения не позволяют учитывать при определении ВПХ правила, определяемые политикой компании;
- большинство существующих решений не позволяют обеспечить инвариантность по отношению к типам воздушных судов.

Таким образом, разработка общих принципов создания программного инструмента автоматизированного определения ВПХ для пилотов, применимого для широкого спектра военных и гражданских воздушных судов российского производства и позволяющего за счет применения технологии экспертной системы обеспечить гибкость определения ВПХ путем применения правил, содержащихся в РЛЭ, MEL, CDL или определенных политикой эксплуатанта, является актуальной научно-технической задачей.

Область исследования. Область исследования соответствует пунктам паспорта специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации»:

2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах.

13. Методы получения, анализа и обработки экспертной информации.

Степень разработанности темы исследования. Тема разработки и использования унифицированных систем для определения взлетно-посадочных характеристик воздушных судов остается слабо изученной как в отечественной, так и зарубежной литературе.

Автоматизация расчета взлетно-посадочных характеристик самолета основана на математической модели их зависимостей, представленных в официальном руководстве по летной эксплуатации. В работе К.А. Арепьева, а также М.Р. Алкиной подробно рассмотрены методы перевода представленных в РЛЭ данных к такому математическому виду, который может быть использован для автоматизации расчета.

В работе В.Н. Моисеева рассмотрены методы и прикладные программные средства оцифровки номограмм для автоматизации инженерно-штурманских расчетов, а также представлены способы предварительной подготовки цифровых изображений номограмм и рекомендации по их аппроксимации.

Однако, в вышеуказанных работах уделено недостаточно внимания технологиям разработки специализированных систем определения ВПХ, предназначенных для использования членами летных экипажей при подготовке к полету и его выполнении.

Использование правил в автоматизированном расчете взлетно-посадочных характеристик подробно рассматривается в работе турецких исследователей и разработчиков (Metin Zontul, Uğur Batak, Orkun Polat), в которой предлагается:

- 1) разработать программное обеспечение для EFB на базе ноутбука;
- 2) для реализации расчетов использовать готовые вычислительные модули, предварительно подготовленные и предоставленные компаниями Boeing и Airbus;
- 3) разработать для указанного ПО единую базу данных на базе MS SQL Server, включающую в себя как данные по аэропортам и воздушным судам, так и сами правила.

Однако предложенный авторами подход обладает следующими недостатками.

1. Авиационные власти РФ не выдают эксплуатационного одобрения на применение ноутбуков в качестве устройств EFB. Также эргономика ноутбуков не позволяет обеспечить безопасность их эксплуатации летными экипажами в кабине ВС.

2. Концепция использования готовых вычислительных модулей, разрабатываемых и предоставляемых производителями иностранных воздушных судов, не подходит к российским ВС в связи с отсутствием для них указанных программных компонентов.

3. Предложенная реализация правил на базе реляционной СУБД является громоздкой и трудно масштабируемой. Отсутствует механизм логического вывода, что не позволяет выполнять рассуждения и работать с конфликтными множествами правил.

В последние годы широкое распространение для расчета ВПХ иностранных ВС в автоматизированном режиме получили специализированные программные приложения (например, для ВС производства корпорации Boeing – «Boeing Onboard Performance Tool», для ВС производства Airbus – «FlySmart+»), реализованные на базе электронного планшета летчика (Electronic Flight Bag - EFB), в качестве которого используются планшетные компьютеры. Однако они обладают следующими недостатками:

- «жесткая» привязка к типам ВС;
- не позволяют использовать правила эксплуатанта при выполнении расчетов ВПХ.

Цели и задачи исследования. Целью является формирование методики создания информационных систем определения ВПХ, инвариантных по отношению к типам ВС.

Для достижения выбранной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать информационную систему для расчета ВПХ на базе электронного планшета летчика, в том числе:
 - разработать архитектуру информационной системы, позволяющую обеспечить инвариантность по отношению к типам ВС;
 - разработать онтологию предметной области EFB;

- осуществить оцифровку номограмм зависимостей ВПХ, представленную в руководстве по летной эксплуатации воздушного судна;

2) создать методику выбора аппаратной платформы для EFB на основе нечетких суждений;

3) выполнить реализацию прототипа программного обеспечения EFB.

Объектом исследования являются системы для расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов.

Предметом исследования является информационная система на базе электронного полетного планшета для поддержки принятия решений пилотом при подготовке воздушного судна к взлету и посадке с применением технологии продукционной экспертной системы.

Научная новизна. На основании выполненных исследований получены следующие новые научные результаты:

- предложена оригинальная методика создания информационных систем расчета взлетно-посадочных характеристик на базе электронного полетного планшета, включающая:

- архитектуру информационной системы расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов с применением технологии продукционной экспертной системы;

- онтологию программного обеспечения для расчета ВПХ, позволившую сформировать структуру и атрибуты базы данных;

- алгоритмы расчетов зависимостей ВПХ, по номограммам представленным в РЛЭ воздушного судна;

- разработана методика выбора аппаратной платформы для EFB на основе нечетких суждений с применением нового метода нечетких областей предпочтений, которая позволила формализовать и упростить процедуру выбора планшетных компьютеров;

- доказана перспективность практического применения предложенного подхода к автоматизированному расчету взлетно-посадочных характеристик в производственной деятельности авиакомпаний.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- доказана принципиальная возможность обеспечения инвариантности по отношению к типам воздушных судов в едином программном приложении для EFB и обеспечения гибкости определения взлетно-посадочных характеристик за счет применения технологии продукционной экспертной системы, позволяющей использовать правила производителя ВС и эксплуатанта (авиакомпаний).

- применительно к проблематике диссертации результативно использованы новая методика создания информационных систем определения ВПХ и метод многокритериальной оценки альтернатив на основе предпочтений, заданных в нечетких областях, позволивший формализовать и упростить процедуру выбора планшетных компьютеров;

- изложены принципы построения архитектуры и требования к компонентам программного комплекса, реализующего автоматизированное определение взлетно-посадочных характеристик воздушных судов;

- раскрыты существенные недостатки имеющихся систем определения ВПХ воздушных судов и решена проблема выбора рациональной аппаратной платформы EFB;

- изучены специфические особенности процесса расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов, проведен анализ структуры данных (категории данных, их взаимосвязь и источники) и их сопоставление с возможностями, предоставляемыми средой создания экспертных систем CLIPS;

- проведена модернизация существующих методов разработки программного обеспечения EFB (позволило упростить разработку программного обеспечения), так и автоматизированного определения ВПХ (позволило обеспечить инвариантность по отношению к типам ВС и большую по сравнению с существующими системами гибкость в процессе определения ВПХ за счет использования технологии продукционной экспертной системы).

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- создан программный комплекс информационной системы, реализованной в виде клиент-серверного приложения для электронного планшета летчика (EFB);

- выполнена государственная регистрация программного обеспечения, что подтверждается свидетельством о регистрации №2019660978;

- разработанная информационная система апробирована в производственной деятельности Авиакомпании АО «Авиакомпания «РусДжет», что подтверждается актом от 23.09.2019 г.;

- определены перспективы практического использования разработанной информационной системы для расчета взлетно-посадочных характеристик, позволяющей значительно сократить время, затрачиваемое пилотами при подготовке к полету в части определения взлетно-посадочных характеристик, повысить эффективность летной эксплуатации воздушных судов и безопасность выполняемых полетов;

- представлены: методика выбора аппаратной платформы для электронного планшета пилота на основе нечетких суждений с применением нового метода нечетких областей предпочтений, которая позволила формализовать и упростить процедуру выбора планшетных компьютеров; методические рекомендации по использованию разработанной в ходе диссертационного исследования информационной системы летными экипажами, а также предложения по ее дальнейшему совершенствованию.

Методология и методы исследования основаны на методах системного анализа, онтологического проектирования, экспертных систем, объектно-ориентированного программирования и нечетких множеств.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика создания информационных систем расчета взлетно-посадочных характеристик на базе электронного полётного планшета, включающая:
 - 1.1. архитектуру информационной системы расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов с применением технологии продукционной экспертной системы,
 - 1.2. онтологию информационного обеспечения для расчета взлетно-посадочных характеристик, позволившую сформировать структуру и атрибуты базы данных,
 - 1.3. алгоритмы расчетов зависимостей ВПХ, по номограммам представленным в РЛЭ воздушного судна.
2. Методы и алгоритмы выбора аппаратного обеспечения информационной системы расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов, используемого в кабине лётного экипажа в формате планшетного компьютера.
3. Реализация программного обеспечения информационной системы в виде клиент-серверного приложения для электронного полётного планшета. На примере реализации предложенных методик показана перспективность практического применения данного подхода к автоматизированному расчету взлетно-посадочных характеристик в производственной деятельности авиакомпаний.

Степень достоверности и апробация результатов. Алгоритм функционирования разработанного программного комплекса основан на зависимостях взлетно-посадочных характеристиках ВС, представленных в виде комплекса номограмм в официальном одобренном авиационными властями руководстве по летной эксплуатации и построенных производителем воздушного судна. Достоверность результатов, полученных с применением разработанного программного комплекса, подтверждается практической апробацией программного комплекса летно-инструкторским составом АО «Авиакомпания «РусДжет», что засвидетельствовано соответствующим актом об апробации что от 23.09.2019 г.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ИПУ РАН (Москва, 2019); 12-я международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» ИПУ РАН (Москва, 2019); 11-я международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» ИПУ РАН (Москва, 2018); Международная молодежная научная конференция «XXXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (Казань, 2017); 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2017» (Москва, 2017); XLII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» МАИ (Москва, 2016).

Личный вклад автора состоит в разработке лично автором: онтологической модели предметной области систем EFB, разработке

унифицированной структуры программного комплекса и унифицированной структуры базы данных информационной системы, разработке прототипа клиент-серверного программного обеспечения для автоматизированного определения ВПХ ВС на базе электронного полетного планшета, личном участии в апробации результатов исследования, а также, при участии автора, в разработке алгоритма нечеткого ранжирования альтернатив применительно к задаче выбора модели электронного полетного планшета.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 2 статьи представлены в изданиях, входящих в перечень ВАК, 2 статьи – в изданиях, индексируемых БД Scopus, 10 статей – в других журналах и сборниках конференций, также выдано 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка обозначений и сокращений и списка литературы. Объем диссертации составляет 193 машинописных страницы. Текст диссертации содержит 38 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 91 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, аргументированы ее научная новизна, теоретическая и практическая ценность, а также представлено сжатое изложение содержания глав диссертации.

В первой главе рассмотрено влияние взлетно-посадочных характеристик на безопасность полетов ВС, обоснована целесообразность разработки программного обеспечения для определения ВПХ. Описано влияние основных факторов на параметры взлета и посадки самолета.

Представлен анализ особенностей существующих систем EFB, описаны их классификация и разделение на программные и аппаратные компоненты, приводятся нормативные требования к системам EFB для отечественных авиакомпаний.

Рассмотрены основные понятия и каноническая структура экспертной системы, описан способ представления знаний с помощью продукционных правил. Приведены примеры продукционных правил экспертной системы для определения ВПХ, на их примере показан процесс получения новых фактов в ходе логического вывода.

Для определения ВПХ могут быть использованы правила, представленные в перечне минимального исправного оборудования (MEL), руководстве по лётной эксплуатации ВС (РЛЭ), перечне допустимых повреждений и неисправностей (CDL), а также определяемые политикой авиакомпании. Данные правила могут быть представлены в виде импликаций вида «если А, то В».

Во второй главе рассмотрена разработка информационной системы определения ВПХ.

В разрабатываемой информационной системе предполагается использование архитектуры, показанной на рисунке 1.

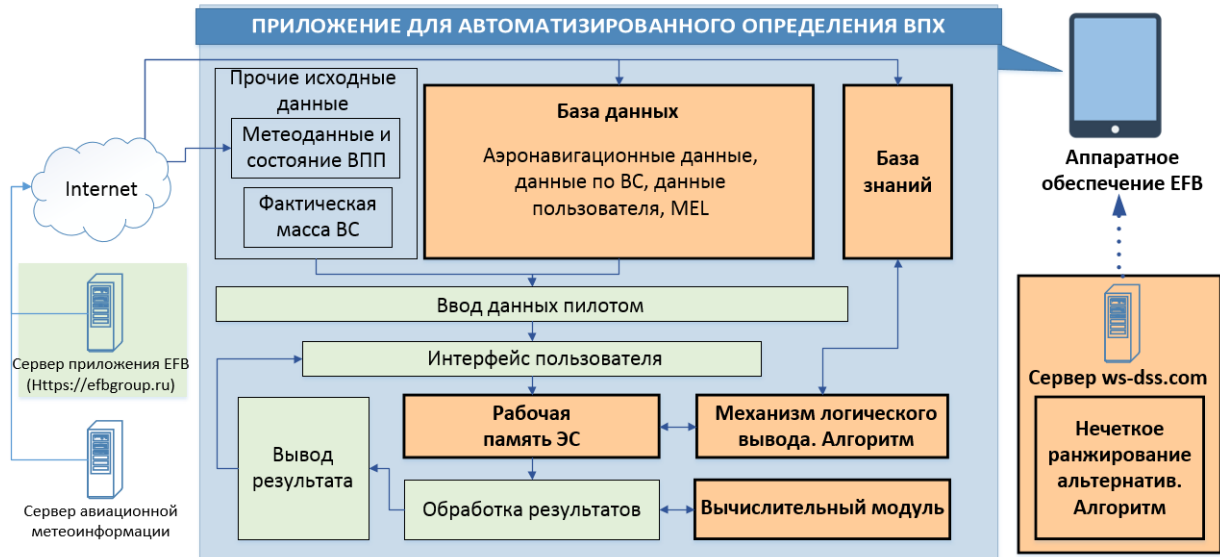


Рисунок 1 – Архитектура информационной системы

Разделение системы на блоки необходимо для обеспечения ее адаптивности и расширяемости, позволяя учитывать специфику различных типов воздушных судов. Основными блоками в разработанной архитектуре ЭС являются: база данных, включающая в себя аэронавигационные данные, данные по ВС, данные пользователя и данные перечня минимально исправного оборудования (MEL); элементы непосредственно экспертной системы (база знаний, рабочая память ЭС, механизм логического вывода), модули обработки результатов, вычислительный модуль; и интерфейс пользователя, используемый для ввода данных пользователем и вывода полученных результатов.

База данных подвержена регулярным обновлениям. Ее актуальность, целостность, точность и качество имеют критическое значение в процессе расчета характеристик взлета и посадки.

Наполнение расчетного модуля производится либо предварительно рассчитанными специфическими для конкретного типа ВС таблицами анализа зависимостей ВПХ, либо электронными данными (оцифрованными номограммами) из руководства по летной эксплуатации.

Наполнение базы знаний экспертной системы производится правилами, описывающими влияющие на взлетно-посадочные характеристики ограничения, установленные производителем ВС и эксплуатантом/авиационными властями.

Для применения правил, используемых для определения ВПХ, предложено использование экспертной системы, включающей в себя базу знаний для хранения правил определения ВПХ, машину логического вывода и рабочую память для хранения фактов.

На рисунке 2 представлен пример продукционных правил разработанной системы и процесс получения новых фактов в процессе логического вывода.

В процессе логического вывода входными данными являются начальный набор фактов и правила базы знаний ЭС, выходными данными являются множество новых фактов и состояние рабочей памяти, перешедшей в новое состояние.

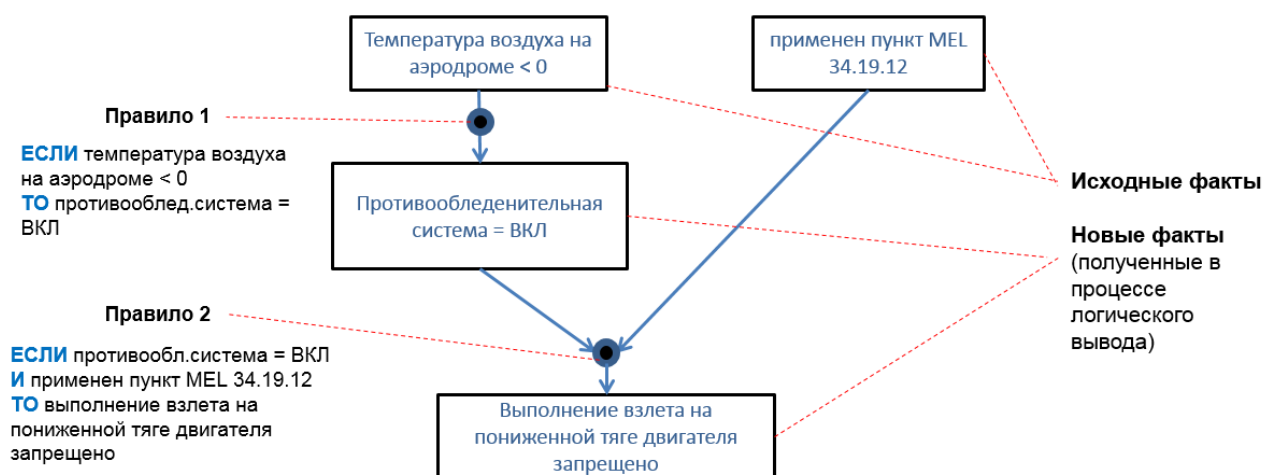


Рисунок 2 – Пример работы продукционных правил ЭС

Для описания алгоритма логического вывода введем следующие обозначения:

WM_0 - начальное известное множество фактов; $f = (v, a)$ - факт (например, атрибут x с номером v принял значение a ($x_v = a$), v - номер атрибута, a - значение атрибута; l - номер правила; p_l - приоритет правила l ; i - номер итерации выполнения алгоритма (шаг алгоритма); C - конфликтное множество правил; CS_i - конфликтное множество правил на шаге i ; l^* - номер активированного правила, имеющего максимальный приоритет; C - конфликтное множество правил; CS_i - конфликтное множество правил на шаге i .

Правило задает отображение множества заданных фактов X_l на множество добавляемых A_l и удаляемых D_l фактов: $r_l: X_l \Rightarrow (A_l, D_l)$, где X_l - множество

фактов антецедентов, A_i - множество добавляемых фактов, D_i - множество удаляемых фактов.

WM_i - рабочая память, содержит начальные факты и факты, полученные путем применения правил на i -м шаге алгоритма.

Тогда алгоритм логического вывода примет следующий вид:

1. $i = 0$
2. $i = i + 1$
3. $CS_i = \{l: (X_i \subseteq WM_{i-1}) \& (\forall k ((0 < k < i) \rightarrow l \notin CS_k))\}$
4. Если $CS_i = \emptyset$, то конец алгоритма.
5. $A = \emptyset$; $D = \emptyset$; $C = CS_i$
6. Пока $C \neq \emptyset$ выполнять цикл:

$$l^* = \arg \max_{l \in C} p_l$$

$$A = A \cup [A_{i^*} \setminus \{f_j: \exists f_k ((f_k \in A) \& (pr_1 f_j = pr_1 f_k))\}]$$

$$D = D \cup [D_{i^*} \setminus \{f_j: \exists f_k ((f_k \in D) \& (pr_1 f_j = pr_1 f_k))\}]$$

$$C = C \setminus \{l^*\}$$

7. $WM_i = WM_{i-1} \cup A \setminus D$

8. Переход к шагу 2.

UML-диаграмма данного алгоритма представлена на рисунке 3.

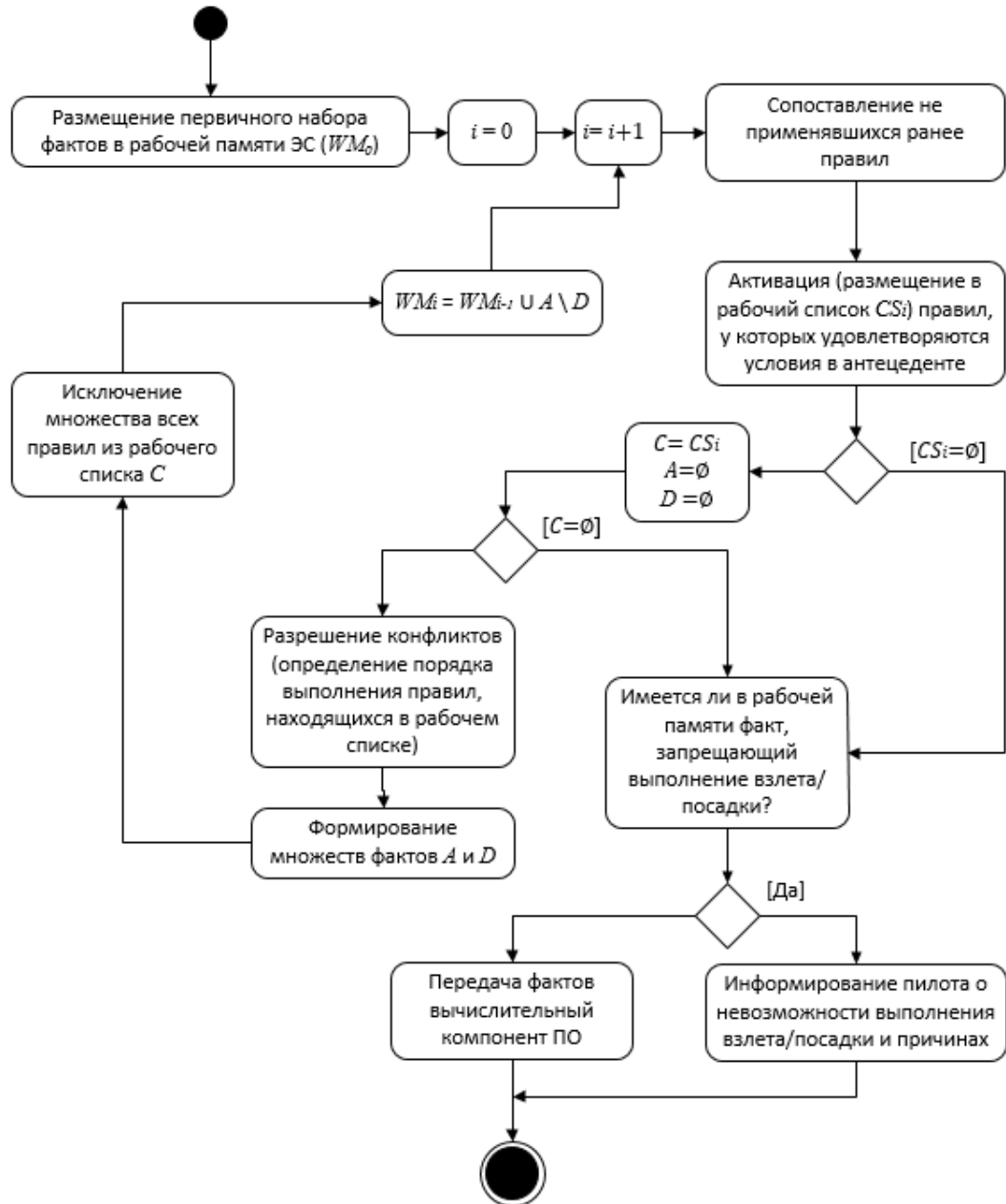


Рисунок 3 – Алгоритм логического вывода

Скорость работы продукционной экспертной системы, особенно при работе с большими количествами правил базы знаний и фактов в рабочей памяти, зависит от механизма логического вывода решения. В данной работе для обеспечения ускорения вывода решения за счет минимизации сопоставлений в рассматриваемой экспертной системе для сопоставления правил используется алгоритм Rete. При своем быстродействии, алгоритм Rete обладает высокими потребностями в оперативной памяти. Однако, поскольку современные аппаратные планшетные компьютеры, используемые в качестве платформ EFB, укомплектованы модулями оперативной памяти большого объема (2 Гб и более), недостаток алгоритма Rete становится крайне незначительным.

На вход алгоритма Rete подаются правила базы знаний экспертной системы. В качестве результата формируется специальный ациклический граф, узлам которого соответствуют части условий правил.

Сеть Rete состоит из альфа- и бета-сетей. Альфа-сеть отвечает за отбор элементов рабочей памяти. Если элемент рабочей памяти успешно сопоставлен с условиями правил, то он передается на следующий узел сети. Бета-сеть осуществляет объединение элементов рабочей памяти и записывает результат в бета-память. При добавлении нового факта, осуществляется его прогонка по сети, при этом отмечаются узлы, условиям которых данный факт соответствует. При выполнении полного условия правила, когда система достигает листа графа, правило активируется (добавляется в конфликтное множество правил).

Для реализации технологии экспертной системы и применения алгоритма Rete необходимо использовать подходящее инструментальное средство. На сегодняшний день существует множество инструментальных средств создания экспертных систем, наиболее распространенными среди которых являются CLIPS, PROLOG, LISP, Drools и Jess.

Для выбора инструментального средства был проведен сравнительный анализ, по результатам которого было выбрано ПО CLIPS, поскольку, наряду с такими преимуществами, как совместимость с операционными системами EFB, свободное распространение с открытым исходным кодом, наличие встроенной машиной прямого логического вывода, изначально предназначалось для разработки экспертных систем для аэрокосмической сферы, в которой безопасность имеет критически важное значение.

Его изначальное предназначение и применение в таких организациях, как NASA, конструкторское бюро «Туполев» и других, позволяет сделать вывод о высокой надежности программной реализации системных библиотек данного инструментального средства.

Экспертная система работает с большим количеством разнородных фактов, для хранения которых требуется создание соответствующей базы данных. Для формализации представления структуры базы данных была построена онтология предметной области EFB.

На рисунке 4 представлен фрагмент онтологического представления и явное указание соответствия одного из классов и атрибутов онтологии таблице базы данных и ее атрибутам соответственно.

База данных ЭС позволяет хранить разнородные факты, а также обеспечивает разграничение доступа для пользователей системы на уровне ролей, которые им назначены в зависимости от требуемого типа ВС (доступ к определенным ВС) и географии полетов (доступ к аэронавигационным данным определенных аэродромов).

Оцифровка номограмм зависимостей ВПХ, представленных в РЛЭ воздушного судна Ту-204-100В выполнена с применением комплекса ПО Wolfram Mathematica и GetData Graph Digitize.

Построение номограмм зависимостей ВПХ осуществляется

производителем ВС на основании результатов проведения комплекса сертификационных летных испытаний.

Построена математическая модель зависимостей ВПХ по оцифрованным номограммам (аппроксимации оцифрованных номограмм с включением элементов логики).

Взлетная масса, ограниченная нормируемым градиентом набора высоты, представляет собой следующую функцию:

$$m_{\text{взл}} = f(T, H_{\text{азр}}),$$

где T – температура воздуха на аэродроме, $H_{\text{азр}}$ – высота аэродрома над уровнем моря.



Рисунок 4 – Фрагмент онтологии предметной области EFB

В зависимости от значений, которые принимают параметры T и $H_{\text{азр}}$, взлетная масса $m_{\text{взл}}$, ограниченная набором высоты, может быть определена 12 разными способами. Например, при $15 \leq T \leq 20$ и $1800 \leq H_{\text{азр}} \leq 2000$:

$$m_{\text{взл}} = (4 - 0,2T) \left((118061 - 8,48485H_{\text{азр}}) - (119430 - 10,596H_{\text{азр}}) \right) + (119430 - 10,596H_{\text{азр}})$$

В третьей главе рассматривается выбор аппаратной платформы для информационной системы.

Согласно классификации ICAO, системы EFB разделяют на встроенные и портативные.

В качестве портативных EFB используются планшетные компьютеры, и они получили широкое распространение в авиации в качестве устройств EFB, поскольку обладают невысокой стоимостью, для них активно разрабатывается и поддерживается специализированное программное обеспечение, реализующее функции EFB, их использование одобрено авиационными властями.

При выборе модели планшета ЛПП необходимо учесть множество факторов, определенных спецификой парка воздушных судов авиакомпании, ее политики в части использования системы EFB.

Это приводит к тому, что перед эксплуатантом на этапе разработки плана внедрения EFB возникает непростая многокритериальная задача выбора подходящей для него модели планшетного компьютера, разнообразие которых непрерывно растет с развитием рынка и нормативной базы, регламентирующей их одобрение и применение в авиации.

Кроме необходимости учета множества практических и нормативных факторов, нерациональный выбор модели планшета EFB может привести к существенным перерасходам (для крупной авиакомпании требуется осуществление закупки планшетов на десятки миллионов рублей). Конкретные модели планшетов обладают определенными характеристиками с конкретными значениями, т.е. исходные критерии – четкие. Однако, поскольку суждения ЛПП имеют нечеткий характер, для выбора аппаратной платформы информационной системы используется теория нечетких множеств.

При формировании исходных критериев и предпочтений использовались следующие соображения:

- эргономика использования в кабине пилотов оценивалась экспертно. Как правило, пространство кабины пилотов ВС очень ограничено, и работа с громоздкими устройствами является проблематичной.
- обеспечение комфортного восприятия информации зависит от размера экрана. Если экран менее 9 дюймов, то возможны затруднения при считывании информации. Средний экран (9-11 дюймов) и большой экран (более 12 дюймов) обеспечивают комфортное восприятие информации.
- учитывалась потребность в 3G/LTE-интернете на устройстве и потребность в встроенном модуле GPS/ГЛОНАСС.
- предпочтения по объему памяти зависят от того, планируется ли в рабочих целях осуществлять фото- и видеосъемку с помощью планшетного компьютера, необходимо ли двух- или трехкратное резервирование библиотеки документов на планшетном компьютере.

В рамках задачи даны:

- критерии и нечеткие шкалы в соответствии с вышеуказанными предпочтениями;
- 20 альтернатив (моделей электронных планшетов).

Для каждого из критериев задана нечеткая шкала – множество возможных значений критерия разбито на отдельные нечеткие градации:

- $S_i = \{t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_{q_i}}\}$ - шкала i -го критерия, где i – номер критерия ($i=1..n$), q_i – число градаций в шкале S_i , j – номер градации критерия ($j=1..q_i$), t_{ij} – нечеткая градация шкалы критерия.
- $\mu_{ij}(x)$ – функция принадлежности четких значений i -го критерия j -й

градации, где x – это значение i -го критерия.

В заданных шкалах можно разбить критериальное пространство на области, определяемые как комбинации значений градации. Множество нечетких областей предпочтений M_k , которое образуется как декартово произведение S_i , будем называть полным множеством нечетких альтернатив:

$$A = \{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1q_1}\} \times \{t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2q_2}\} \times \dots \times \{t_{n1}, t_{n2}, \dots, t_{nq_n}\}.$$

Введем также следующие обозначения:

- k – номер области предпочтений;
- K – число областей, на которых ЛПР задал свои предпочтения;
- $M_k = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ – представляет собой кортеж номеров градаций, участвующих в определении k -й области (предполагаем, что должны быть заданы нечеткие области по всем критериям);
- p_k – нечеткий уровень предпочтений k -й области;
- y – четкое значение предпочтительности альтернативы.
- $\rho_k(y)$ – нечеткая функция принадлежности для k -й области;

Рассмотрим задачу определения предпочтительности альтернативы для заданных значений критериев (x_1, x_2, \dots, x_n) . Определение нечетких областей можно рассматривать как нечеткую импликацию вида: ЕСЛИ нечеткие значения критериев равны нечетким градациям области M_k , ТО предпочтительность альтернативы равна заданному для области нечеткому уровню предпочтений p_k :

$$p_k(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = \min \left(\min_i [\mu_{ipr_i M_k}(x_i)], p_k(y) \right).$$

Объединение всех нечетких значений предпочтений по всем областям даст итоговую нечеткую предпочтительность альтернативы:

$$p(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = \max_k p_k(y, x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Дефаззификация предпочтений выполняется методом центра тяжести:

$$\tilde{y}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\int y p(y, x_1, x_2, \dots, x_n) dy}{\int p(y, x_1, x_2, \dots, x_n) dy},$$

где \tilde{y} - итоговый ранг альтернативы, результат работы системы.

В диссертации приведен результат ранжирования ЕФВ с итоговым рангом альтернативы \tilde{y} .

Предложенный метод позволит эксплуатантам (авиакомпаниям) на этапе разработки плана внедрения ЕФВ решить многокритериальную задачу выбора подходящей модели планшетного компьютера путем ранжирования альтернатив на основе нечетких предпочтений ЛПР, заданных в нечетких областях.

В четвертой главе рассмотрена программная реализация ЭС.

С учетом существующего многообразия электронных планшетов, и, прежде всего, для обеспечения работы программного обеспечения на отечественной элементной базе для минимизации зависимости от зарубежных производителей и снижения санкционных рисков, конечной целью является создание универсальной системы расчета ВПХ, т.е. без привязки к одной определенной аппаратной платформе. Достижение указанной цели возможно как за счет адаптации программно-алгоритмического прототипа разрабатываемой системы под существующие платформы, так и за счет разработки с использованием универсальных систем программирования (React Native, Flutter), обеспечивающих возможность использования системы на всем многообразии существующих устройств. Данные системы распространяются с открытыми исходными текстами, что позволяет самостоятельно дорабатывать системные библиотеки и минимизирует вероятность вредоносных «закладок» в коде.

В целях упрощения тестирования разрабатываемого прототипа и обеспечения возможности быстрой адаптации к другим платформам за счет простоты синтаксиса, его разработка проведена в среде программирования Xcode на языке Swift. Реализация прототипа выполнена на примере ВС Ту-204-100. Интерфейс разработанного ПО представлен на рисунке 5. Для интеграции инструментального средства CLIPS в программное iOS-приложение использовался специализированный фреймворк.

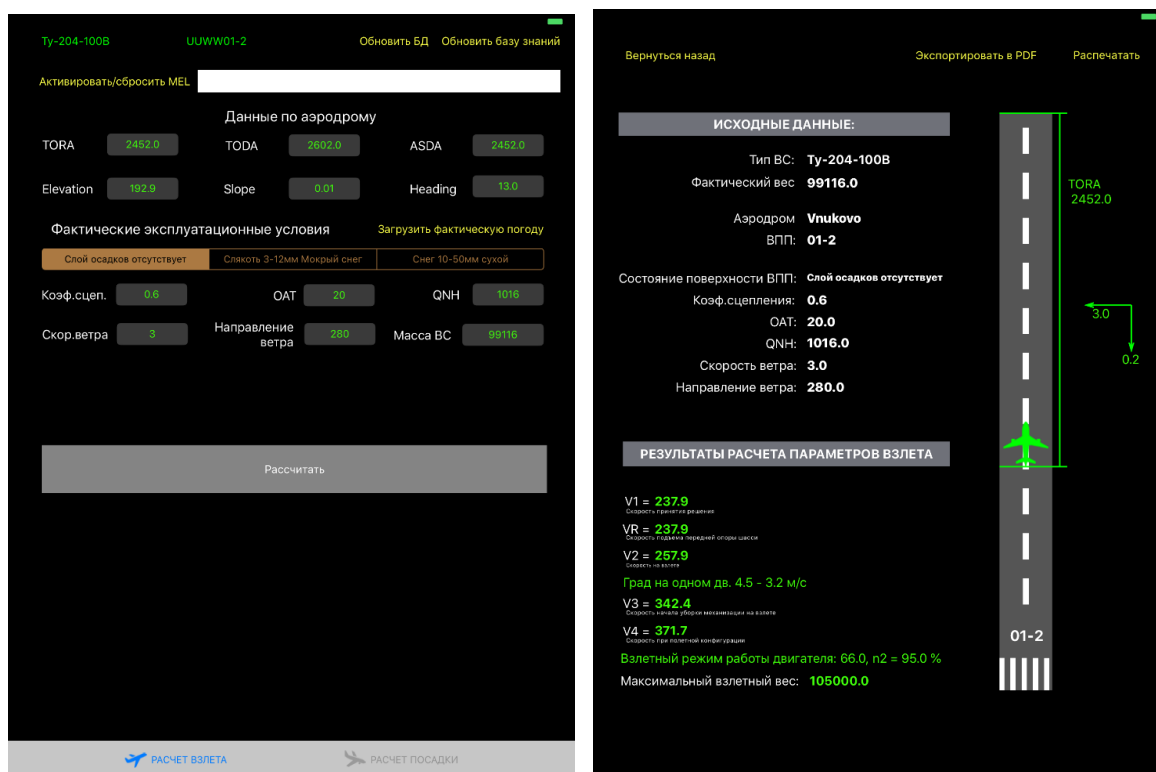


Рисунок 5 – Интерфейс разработанного ПО

Реализован механизм обновления базы данных и базы знаний «по воздуху». Обновление осуществляется путем загрузки соответствующих JSON-файлов на электронный планшет с сервера efbgroup.ru по беспроводному интернет-каналу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным итогом диссертационной работы является разработка и апробация информационной системы для автоматизированного расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов в режиме реального времени, реализованной на базе электронного планшета летчика, а также разработка математического метода и программного обеспечения, предназначенного для рационального выбора аппаратной составляющей разработанной системы, что выразилось в следующих научных и практических результатах:

1. Разработана методика создания информационных систем расчета взлетно-посадочных характеристик на базе электронного полётного планшета, включающая:
 - 1.1. архитектуру информационной системы расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов с применением технологии продукционной экспертной системы,
 - 1.2. онтологию информационного обеспечения электронного полётного планшета, позволившую сформировать структуру и атрибуты базы данных,
 - 1.3. алгоритмы расчетов зависимостей ВПХ, по номограммам представленным в РЛЭ воздушного судна.
2. Разработаны методы и алгоритмы выбора аппаратного обеспечения информационной системы расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов, используемого в кабине лётного экипажа в формате планшетного компьютера.
3. Выполнена реализация программного обеспечения информационной системы в виде клиент-серверного приложения для электронного полётного планшета. На примере реализации предложенных методик показана перспективность практического применения данного подхода к автоматизированному расчету взлетно-посадочных характеристик в производственной деятельности авиакомпаний.
4. Информационная система для расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов апробирована в АО «Авиакомпания «РусДжет», что подтверждается соответствующим актом от 23.09.2019 г.

Предложенный подход позволит повысить эффективность летной эксплуатации воздушных судов и безопасность выполняемых полетов, а также качественно усовершенствовать технологию и сократить время подготовки летных экипажей к планируемому полету на 18%.

В связи с применением в разработанном программном обеспечении базы данных, содержащей информацию об аэродромах и параметрах взлетно-посадочных полос, потребуется обеспечить регулярное поддержание актуальности указанной базы данных на основе аэронавигационной информации из официальных источников (например, сборников аэронавигационной информации Российской Федерации, издаваемых филиалом «ЦАИ» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД»). Также, для минимизации человеческого фактора в процессе ручного ввода исходных данных и в целях совершенствования реализованной информационной системы, дальнейшая разработка темы предполагает интеграцию с системами планирования полетов, используемых в авиакомпаниях, а также со специализированными источниками авиационных метеосводок.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК и систему цитирования Scopus:

1. Мельничук А.В. Разработка производственной экспертной системы для определения взлетно-посадочных характеристик воздушного судна // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 10.
2. A Melnichuk, V Nesterov, V Sudakov and S Kirill, "Development of Electronic Flight Bag Software Based on Expert System for Computing of Optimal Aircraft Performance," 2019 Twelfth International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD), Moscow, Russia, 2019, pp. 1-4.
3. Melnichuk, A.V., Nesterov, V.A., Sudakov, V.A. Development of Software for Computing of Aircraft's Takeoff and Landing Characteristics Using Expert System Technology (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 714 (1), id 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/714/1/012019.
4. Мельничук А.В., Нестеров В.А., Судаков В.А., Сыпало К.И. Разработка приложения для определения рациональных характеристик процессов взлета и посадки воздушных судов с применением экспертной системы // Ежеквартальный научный журнал «Электронные информационные системы». – М.: АО «НТЦ ЭЛИНС», 2019. №1 (20). С.63-72.

Программы, зарегистрированные в реестре программ для ЭВМ

5. Мельничук А.В. Программное приложение для расчета взлетно-посадочных характеристик воздушных судов // Программы для ЭВМ. Свидетельство №2019661963 (05.09.2019).

Публикации по теме диссертации в других изданиях:

6. Мельничук А.В., Судаков В.А. Применение онтологического подхода к процессу разработки и внедрения систем Electronic Flight Bag // Моделирование и анализ данных. 2020. Том 10. № 1. С. 157–165.

7. Мельничук А.В., Судаков В.А. Компьютерная поддержка решений пилота на этапах взлета и посадки // Моделирование и анализ данных. 2019. Том 09. № 4. С. 112–120.
8. Мельничук А.В., Нестеров В.А., Судаков В.А., Сыпало К.И. Разработка программного приложения планшетного компьютера для определения параметров взлета и посадки воздушных судов // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Труды. – Москва: ИПУ РАН, 2019. – С. 940-945.
9. Мельничук А.В., Нестеров В.А., Судаков В.А., Сыпало К.И. Реализация программного приложения для определения взлетно-посадочных характеристик российских воздушных судов с использованием принципов экспертной системы // 12-я международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019): Труды конференции. – Москва: ИПУ РАН, 2019. – С. 738-745.
10. Мельничук А.В., Нестеров В.А., Судаков В.А., Сыпало К.И. Разработка системы определения параметров взлета и посадки воздушных судов на базе электронного полетного планшета // 12-я международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019): Материалы конференции, научное электронное издание – Москва: ИПУ РАН, 2019. – С.756-759.
11. Мельничук А.В., Нестеров В.А., Судаков В.А., Сыпало К.И. Разработка экспертной системы электронного планшета летчика (EFB) для определения рациональных характеристик процессов взлета и посадки воздушных судов // 11-я международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018): Труды конференции, в 3 т. – Москва: ИПУ РАН, 2018. – Т.2. – С.310-316.
12. Мельничук А.В., Нестеров В.А., Судаков В.А., Сыпало К.И. Реализация экспертной системы в программном приложении электронного планшета летчика для определения рациональных характеристик процессов взлета и посадки воздушных судов // 11-я международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018): Материалы конференции, в 2 т. – Москва: ИПУ РАН, 2018. – Т.2. – С.147-149.
13. Мельничук А.В., Марценюк Е.А. Предпосылки создания ЭС для выбора электронного полетного планшета электронной информационной системы EFB для летного экипажа воздушного судна // Международная молодежная научная конференция «XXXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы конференции. Сборник докладов, в 4 т. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2017. – Т.2. – С.781-784.
14. Мельничук А.В., Марценюк Е.А. Предпосылки создания ЭС для определения требуемых характеристик процесса взлета/посадки ВС в зависимости от погодных условий и конкретных параметров взлетно-посадочной полосы // 16-я Международная конференция «Авиация и

- космонавтика - 2017»: Сборник тезисов докладов, Москва: Типография «Люксор», 2017. – С.174-175.
15. Мельничук А.В., Судаков В.А. Предпосылки создания системы автоматизированного расчета взлетно-посадочных характеристик воздушного судна // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: В 4 т. М.: Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), 2016. – С.428-429.
16. Мельничук А.В., Сивакова Т.В., Судаков В.А. Решение задач оптимизации с использованием мультиагентных моделей / Мельничук А.В., Сивакова Т.В., Судаков В.А. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2019. – № 100. – 16 с.