

На правах рукописи



УДК: 681.518.3 + 629.7.058.74 + 004.932.2

Дяченко Сергей Александрович

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗАЦИИ ВЕРИФИКАЦИИ
ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ИНДИКАЦИИ
ГРАЖДАНСКИХ САМОЛЕТОВ В ЧАСТИ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

г. Москва, 2023 г.

Работа выполнена на кафедре 703 «Системное проектирование авиакомплексов» Института №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель **Неретин Евгений Сергеевич**
кандидат технических наук, доцент, филиал публичного акционерного общества «Яковлев» – Центр комплексирования, начальник отдела систем самолётовождения; федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой 703 «Системное проектирование авиакомплексов», начальник НИО-703

Официальные оппоненты **Киселев Сергей Константинович**
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Измерительно-вычислительные комплексы», директор департамента информационных технологий

Сорокин Михаил Юрьевич

кандидат технических наук, акционерное общество «Аэроприбор-Восход», начальник отдела по науке и инновационному развитию

Ведущая организация Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», 125167, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7

Защита диссертации состоится 21 декабря 2023 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=176786.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2023 г.

Отзывы на автореферат диссертации, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Отдел Ученого и диссертационных советов МАИ.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.2.327.03, д. т. н., доцент



А. В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. По статистике авиационных происшествий организаций, устанавливающих нормы и предопределяющих пути развития гражданской авиации, а также ведущих мировых авиапроизводителей, потеря управляемости в полёте (LOC-I) является лидирующей причиной катастроф по количеству жертв. По данным международной организации воздушного транспорта несмотря на то, что по причине LOC-I произошло только 8% происшествий с 2015 по 2019 гг., количество жертв в этих катастрофах составляет 51% от общего числа зарегистрированных случаев за указанные 5 лет. При этом в 2019 г. в авариях, вызванных LOC-I, погибли 80% всех пострадавших.

В соответствии с принятой терминологией к LOC-I относятся причины, по которым экипаж не смог сохранить управление в полёте, что привело к непоправимому отклонению от предполагаемой траектории, в т. ч.:

- сбой или неисправность системы / компонента самолёта;
- ухудшенные метеорологические условия;
- действия пилотов, связанные с низкой видимостью;
- события, вызванные обледенением элементов борта и др.

Большинство из них описывают сложные метеоусловия или некорректные действия экипажа, т. е. служат практически непредсказуемыми обстоятельствами. Однако неисправность функционального узла может быть вызвана ошибкой, допущенной при проектировании и не выявленной своевременно.

Для обеспечения безопасности разрабатываемых комплексов предусмотрены меры различного рода. Среди них – необходимость выполнения жёстких требований, наложенных на процессы создания бортовых систем, регламентированные нормативной базой по разработке гражданской авиационной техники. Помимо их строгого соблюдения компании-разработчики бортового оборудования стремятся к сокращению влияния человеческого фактора при его создании, что достигается за счёт средств автоматизации.

На текущий момент имеется множество инструментов для большинства процессов жизненного цикла. Однако, в силу вышеописанного, одним из наиболее ответственных из них является именно верификация, поскольку по её результатам устанавливается соответствие разработанного изделия требованиям и подтверждается корректность реализации предусмотренных функций.

Как показывает анализ рынка, современные средства в части верификации бортовых систем предоставляют широкие возможности. Однако в состав

комплекса авионики входят компоненты, для проверки которых функционала подобных инструментов недостаточно. К ним относятся системы человеко-машинного интерфейса (ЧМИ), а именно системы электронной индикации (СЭИ) и сигнализации в кабине. Их основная задача – обеспечивать экипаж необходимыми для пилотирования данными и своевременно оповещать о возникновении нештатных ситуаций. Формируемая информация выдаётся в виде изображений, индицируемых на дисплеях, а также звуковых, световых, тактильных сигналов соответственно.

Учитывая, что системы информирования экипажа высоко критичны с точки зрения безопасности (их отказ может привести к катастрофической или аварийной ситуации), при их верификации обязательно участие человека. При этом средства автоматизации, способные фиксировать и обрабатывать органолептическую информацию, на настоящий момент отсутствуют.

Основным компонентом СЭИ, обеспечивающим выдачу большей части информации, необходимой для пилотирования, служит широкоформатный жидкокристаллический многофункциональный индикатор, расположенный на приборной панели в кабине. При этом наиболее критичные данные часто отображаются в текстовом виде (например, сообщения о нештатном функционировании оборудования от системы сигнализации). Они различаются следующими характеристиками: текст, цвет, размер шрифта и расположение.

Таким образом, разработка комплексов, позволяющих автоматизировать верификацию текстовой информации ЧМИ СЭИ, является весьма актуальной.

Степень разработанности темы исследования. В развитие комплексов бортового оборудования и средств автоматизации процессов их жизненного цикла существенный вклад внесли труды В. Annighoefer, С. В. Watkins, Е. Blasch, Е. Feron, I. Moir, А. Seabridge, М. R. Blackburn, Г. И. Джанджгавы, А. Г. Кузнецова, А. В. Воробьева, Е. А. Федосова, В. В. Косьянчука, Н. И. Сельвесюка, А. В. Хорошилова, А. К. Петренко, Р. Л. Смелянского, С. В. Черкашина и др. Применению методов компьютерной обработки изображений в авиационной отрасли посвящены работы L. J. Kramer, R. E. Bailey, L. J. Prinzel, J. S. Del Rio, A. Mouton, T. P. Breckon, J. N. Sanders-Reed, B. J. Schachter, M. Prollefeys, С. Ю. Желтова, Ю. В. Визильтера, Н. В. Кима, Б. А. Алпатова, А. В. Бондаренко и др.

Цель работы – повышение надёжности СЭИ гражданских самолётов за счёт автоматизации процесса верификации ЧМИ в части текстовой информации.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены **задачи**:

1) анализа требований нормативной документации, предъявляемых к ЧМИ СЭИ;

- 2) анализа современных средств автоматизации верификации бортовых систем;
- 3) разработки архитектуры комплекса автоматизации верификации текстовой информации ЧМИ СЭИ (далее – комплекс);
- 4) формирования требований к комплексу;
- 5) разработки методики проведения испытаний ЧМИ СЭИ с применением комплекса;
- 6) разработки и тестирования программно-алгоритмического обеспечения комплекса.

Объект исследования – СЭИ гражданского самолёта.

Предмет исследования – комплекс автоматизации верификации текстовой информации ЧМИ СЭИ.

Методология исследования базируется на использовании совокупности методов цифровой обработки изображений, экспериментальных исследований, системного анализа, численные методы математического анализа и компьютерного моделирования. Разработка программного обеспечения (ПО) осуществлена в среде Eclipse на языке Python.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- 1) разработан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий автоматизацию верификации текстовой информации ЧМИ СЭИ с заданными показателями качества; анализ предметной области позволяет утверждать, что в настоящее время подобные решения отсутствуют;
- 2) в рамках созданного программно-аппаратного комплекса автоматизации верификации текстовой информации ЧМИ СЭИ выполнена интеграция алгоритмического обеспечения, реализующего калибровку камеры, выделение зоны с текстом на фотографии формата индикации и разбиение её на строки, определение верифицируемых параметров для каждой их них, проверку начальных условий, обучение нейронной сети Tesseract OCR и формирование отчёта об испытаниях;
- 3) для конкретного типа гражданского воздушного судна сформирована база данных тестовых примеров отображаемых текстовых сообщений, охватывающая их полное разнообразие;
- 4) проведены стендовые испытания комплекса, по итогам которых подтверждена достоверность распознавания надписей на уровне 98,1% для текста, 99,5% для цвета, 98,8% для размера шрифта, 97,6% для расположения.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) созданный программно-аппаратный комплекс, не имеющий аналогов и обеспечивающий решение научно-технической проблемы автоматизации верификации текстовой информации ЧМИ СЭИ;

2) сформулированные требования к верифицируемым параметрам текстовой информации ЧМИ СЭИ, обеспечивающие валидацию математических моделей на основе натуральных экспериментов и позволяющие сделать вывод о корректности реализации комплекса;

3) разработанная методика проведения испытаний применительно к созданному программно-аппаратному комплексу автоматизации верификации текстовой информации ЧМИ СЭИ;

4) разработанное алгоритмическое обеспечение программно-аппаратного комплекса автоматизации верификации текстовой информации ЧМИ СЭИ, включающее численные и аналитические методы, алгоритмы исследования математических моделей и реализованное в виде совокупности проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов;

5) полученные результаты экспериментальной отработки программно-аппаратного комплекса автоматизации верификации текстовой информации ЧМИ СЭИ, подтверждающие достоверность теоретических выводов и эффективность комплекса в смысле точности определения верифицируемых параметров и времени проведения тестирования.

Практическая значимость. Применение результатов диссертационной работы позволяет повысить надёжность СЭИ за счёт снижения влияния человеческого фактора при верификации ЧМИ, а также сократить временные и финансовые ресурсы, затрачиваемые на данный процесс.

Поскольку методы компьютерного зрения, лежащие в основе работы, универсальны, возможна их адаптация для задачи автоматизации верификации любых технических систем ЧМИ (в т. ч. не только для авиационной отрасли).

Достоверность результатов подтверждается корректным применением математического аппарата и их экспериментальной проверкой.

Внедрение результатов. Основные полученные результаты внедрены в работу филиала ПАО «Яковлев» – Центр комплексирования по проекту «Разработка комплекса бортового радиоэлектронного оборудования самолёта МС-21» и в учебный процесс на кафедре 703 «Системное проектирование авиакомплексов» Института №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» МАИ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Апробация работы. Основные положения работы апробированы на следующих конференциях: 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019» (Россия, г. Москва, 2019 г.), XII Всероссийская научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов её эксплуатации – 2019» (Россия, г. Иркутск, 2019 г.), Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е. В. Арменского (Россия, г. Москва,

2020 г.), LXX Открытая международная студенческая научная конференция «СНК-2020» (Россия, г. Москва, 2020 г.), VII Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки – АВИАТОР» (Россия, г. Воронеж, 2020 г.), 6th «Internet Plus» Innovation and Entrepreneurship Award (КНР, г. Гуанчжоу, 2020 г.), IX Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации» (Россия, г. Иркутск, 2020 г.), 6th EAI International Conference «IoT as a Service 2020» (КНР, г. Сиань, 2020 г.), V Конкурс научно-технических работ ПАО «Корпорация «Иркут» «Подари идею крыльям» (Россия, г. Москва, 2020 г.), XI Международная научно-техническая конференция «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» (Россия, г. Москва, 2020 г.), X Конкурс «Авиастроитель года» (Россия, г. Москва, 2020 г.), IV Международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, 2021 г.), XLVII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» (Россия, г. Москва, 2021 г.), XIII Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (Россия, г. Москва, 2021 г.).

Также ключевые результаты работы опубликованы в виде:

- 4 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации;
- 2 тезисов докладов в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus;
- 1 статьи и 8 тезисов в изданиях, индексируемых в Российском индексе научного цитирования;
- 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя. Все представленные в диссертации положения получены и изложены лично автором, включая теоретические выводы, практические решения, программно-алгоритмическое обеспечение и результаты тестирования.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх основных разделов, заключения, списка литературы, списка сокращений и условных обозначений, которые в общей сложности занимают 120 страниц, включая 50 рисунков, 12 таблиц, 19 формул. Список использованных источников содержит 57 позиций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цель и задачи диссертации, определены объект, предмет, и методы исследования. Также указаны сведения о внедрении и апробации полученных результатов, изложены структура и содержание работы по главам.

В первой главе проведены обзор СЭИ современных гражданских самолётов (назначение, функции, состав) и анализ указаний нормативной документации в части их ЧМИ. Отмечено, что указания руководства Р-25-11А по проектированию СЭИ в части общих характеристик индикаторов, представления текстовых данных и используемых цветов в большинстве имеют качественный вид.

Кроме того, в данном разделе выполнен анализ средств автоматизации, имеющихся на рынке, для различных методов верификации, предусмотренных руководством Р-4754А. Ниже изложены его основные итоги.

1. Рассмотрения и анализы зачастую выполняются вручную путём оформления соответствующей документации, что требует значительных временных ресурсов.

2. Моделирование с применением формальных методов позволяет на раннем этапе проверить взаимное соответствие моделей системы и требований на целой области входных данных. Тем не менее, подобные доказательства выполняются для небольшого круга простых теорий. Кроме того, результаты существенно зависят от адекватности моделей, при этом не предполагается учёт специфики работы на целевой платформе.

3. Тестирование – основной применяемый метод – позволяет оценить корректность функционирования посредством контроля потоков данных в кодовых линиях связи. Также обеспечивается автоматизация их обработки и генерация отчётов о проведённых испытаниях. Ключевой недостаток представленных инструментов состоит в невозможности автоматизированно проверить реализацию ЧМИ для соответствующих систем.

4. Интегральные решения, обеспечивающие верификацию сразу несколькими методами – мощные инструменты, сосредотачивающие преимущества вышеотмеченных подходов. Однако по-прежнему не охватывается тестирование ЧМИ.

В связи с этим сделан вывод о недостаточной функциональности существующих средств. Перспективным направлением их развития является автоматизация тестирования органолептической информации, формируемой системами ЧМИ и, в частности, СЭИ как основного источника полётных данных.

Создание подобных инструментов возможно с помощью компьютерной обработки изображений и звука, получивших широкое распространение в сфере информационных технологий, медицине, видеонаблюдении и др. областях. В гражданской авиации эти подходы применяются в аэропортах при распознавании лиц пассажиров и содержимого багажа с целью выявления злоумышленников и запрещённых к перевозке предметов, для обнаружения препятствий на территории взлётно-посадочной полосы.

В диссертации акцент сделан на текстовой информации, поскольку наиболее критичные данные часто отображаются СЭИ в именно в этом виде. Комплекс должен автоматизировать проверку индицируемых надписей на предмет корректности текста, цвета, размера шрифта и расположения.

Во второй главе разработана архитектура комплекса (рис. 1), определены его функции, предъявлены соответствующие требования в части точности и времени определения верифицируемых параметров, позволяющие проводить тестирование автоматизированно и качественно не хуже человека (табл. 1), а также приняты ограничения и допущения на базе принципов проектирования ЧМИ СЭИ современных гражданских самолётов и Р-25-11А (табл. 2).

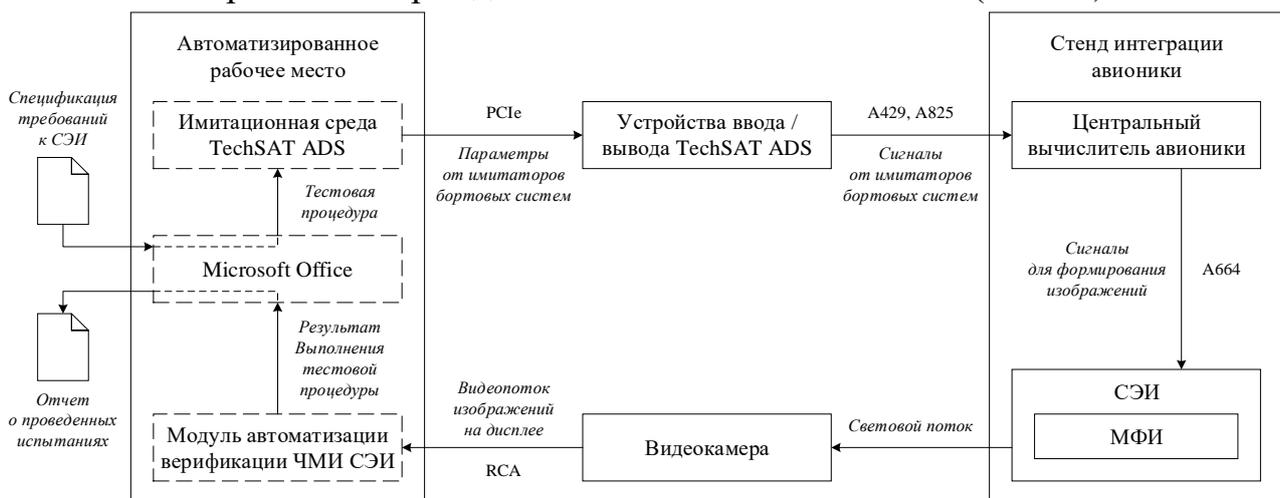


Рисунок 1 – Архитектура комплекса автоматизации верификации текстовой информации ЧМИ СЭИ гражданского самолёта

В состав аппаратного обеспечения комплекса входят автоматизированное рабочее место оператора (персональный компьютер), устройства ввода / вывода TechSAT ADS (для преобразования интерфейсов), стенд интеграции авионики и видеокамера. Основные компоненты стенда – центральный вычислитель авионики и СЭИ, включающая многофункциональный индикатор (МФИ).

Программная часть состоит из имитационной среды TechSAT ADS для задания сигналов, формирующих изображение на дисплее, разработанного модуля автоматизации верификации ЧМИ СЭИ и пакета Microsoft Office для подготовки тестовых процедур и генерации результатов испытаний.

Таблица 1 – Требования, предъявленные к комплексу

Критерий	Требование	Источник
Время выполнения теста	Время проверки 1 надписи из 22 символов – не более 5 с	Эмпирическая оценка при ручном тестировании
Текст	Точность распознавания текста – не менее 97%	Когнитивные характеристики человека: средняя частота ошибки при чтении информации на цифровом индикаторе – 3%
Цвет	Точность распознавания цвета – не менее 98%	Когнитивные характеристики человека: средняя частота ошибки при определении цвета на цифровом индикаторе – 2%
Размер шрифта	Угловая точность определения расположения – не менее 0,582 мрад (2,7 пикселя из расчётного положения глаз пилота)	Оптические характеристики глаза: человек способен различать объекты, угловое расстояние между которыми не меньше 2'
Расположение	Угловая точность определения расположения – не менее 0,582 мрад (2,7 пикселя из расчётного положения глаз пилота)	Оптические характеристики глаза: человек способен различать объекты, угловое расстояние между которыми не меньше 2'

Таблица 2 – Принятые ограничения и допущения в части работы комплекса

Критерий	Ограничение, допущение
Текст	Все надписи выполнены на английском языке заглавными буквами
	Текст может содержать буквы латинского алфавита (A-Z) и цифры (0-9)
Цвет	Предусмотрен следующий набор цветов кодирования текстовой информации: красный, янтарный, зелёный, белый
	Фоновым цветом индикации является чёрный
Расположение	Данные на форматах группируются в зоны, которые могут выделяться рамками белого цвета
	В ходе испытаний тестируемые надписи не накладываются друг на друга и на другие элементы

Таблица 2 (продолжение) – Принятые ограничения и допущения в части работы комплекса

Критерий	Ограничение, допущение
Расположение	В ходе испытаний тестируемые надписи имеют горизонтальную ориентацию на формате
Шрифт	Для всех надписей используется единый моноширинный шрифт без засечек
	Возможны следующие угловые размеры шрифта: – 6 мрад (высокоприоритетные данные) – 4 мрад (среднеприоритетные данные) – 3 мрад (низкоприоритетные данные)
	Применяется обычное начертание шрифта (полужирный, курсивный и комбинированный варианты отсутствуют)
	Все надписи имеют единую толщину линий шрифта

Перед началом тестирования оператор устанавливает камеру напротив МФИ и выполняет её калибровку. Далее для каждой тестовой процедуры:

- составляется матрица ожидаемых результатов в табличном виде (текст, цвет, размер шрифта и расположение надписей);
- задаются значения параметров, формирующие соответствующую индикацию на МФИ.

После сигналы из имитационной среды по интерфейсу PCIe транслируются в устройства ввода / вывода TechSAT ADS, где преобразуются в формат авиационных кодовых линий связи (ARINC 429, ARINC 825), моделируя реальное оборудование. Проходя через центральный вычислитель, исполняющий роль маршрутизатора, они поступают в СЭИ и участвуют в логике формирования проверяемых надписей. В итоге на дисплее появляется соответствующий текст.

Затем видеопоток от камеры, направленной на экран, кадрируется. Полученные фотографии поочередно подаются на вход программного модуля автоматизации верификации ЧМИ СЭИ по протоколу RCA, который выполняет распознавание текстовой информации на снимке и устанавливает её цвет, размер шрифта и расположение. В конечном счёте формируется заключение о прохождении теста путём сравнения ожидаемых и полученных результатов, генерируется отчёт о проведённых испытаниях.

При этом к функциям разработанного ПО автоматизации верификации ЧМИ СЭИ относятся:

- проверка выполнения необходимых условий для начала тестирования;
- калибровка камеры;
- выделение зоны с текстом;

- разделение данной зоны на строки;
- определение верифицируемых параметров для каждой строки;
- формирование отчёта об испытаниях;
- выдача уведомлений пользователю в случае ошибок.

Также в данном разделе диссертационной работы приведена методика проведения испытаний с применением предложенного комплекса, включающая:

- 1) настройку оборудования (установку и калибровку камеры);
- 2) задание ожидаемых результатов тестовой процедуры;
- 3) настройку конфигурации разработанного ПО (при необходимости);
- 4) ввод значений сигналов, участвующих в логике, для формирования соответствующей индикации на МФИ;
- 5) запуск модуля автоматизации верификации ЧМИ СЭИ;
- 6) проверку результатов тестирования.

В третьей главе описано разработанное программно-алгоритмическое обеспечение модуля автоматизации верификации ЧМИ СЭИ. Обобщённый алгоритм его работы представлен на рис. 2.

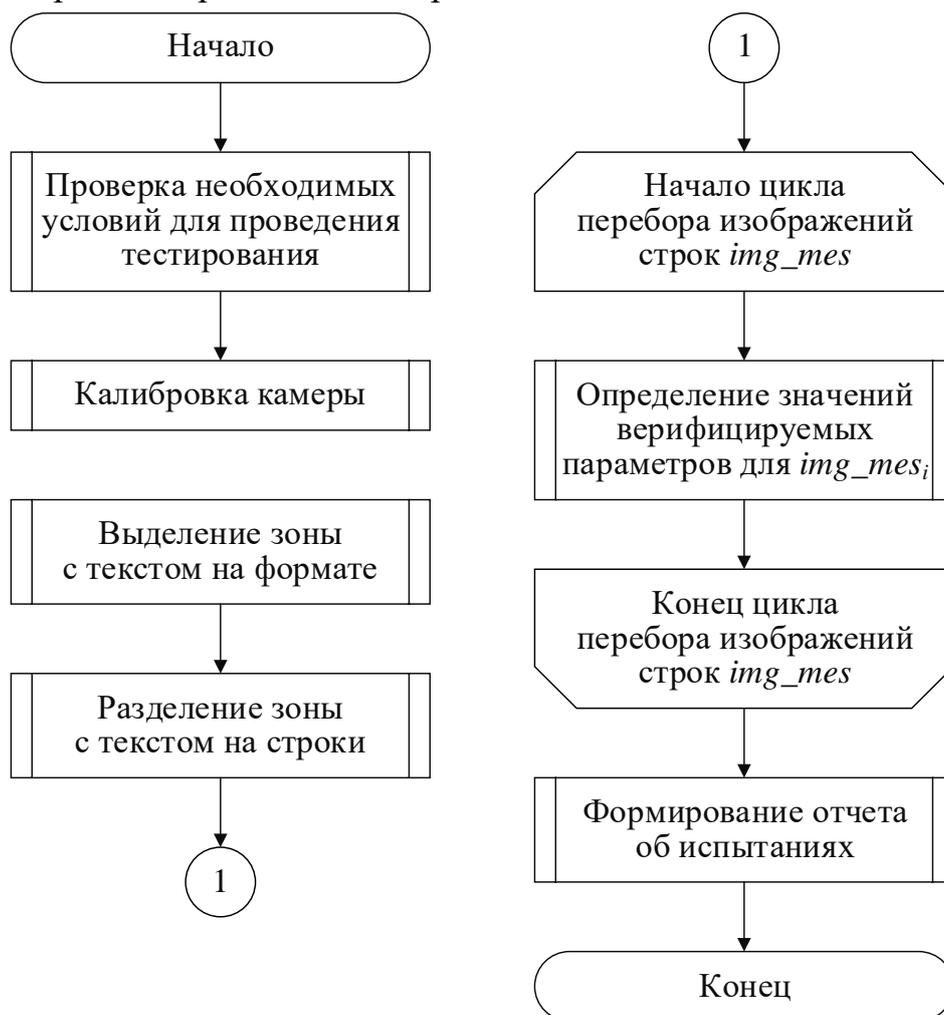


Рисунок 2 – Обобщённый алгоритм работы модуля автоматизации верификации ЧМИ СЭИ

Изначально обеспечивается автоматическая проверка условий, которые требуется выполнить перед началом тестирования (указание директорий файлов с ожидаемыми и полученными результатами, наличие обученной модели распознавания символов и пр.). После установки камеры оператором производится её калибровка (пока положение зафиксировано, её повторное проведение не требуется). Далее запускается тест, и при появлении соответствующей индикации на полученной фотографии выделяется искомая область с текстом. В дальнейшем она разбивается на строки, для каждой из которых определяются значения верифицируемых параметров. Затем они сравниваются с ожидаемыми результатами и сохраняются в виде отчёта о проведённых испытаниях.

В рамках калибровки принята модель камеры с точечной диафрагмой, дополненная с учётом коррекции радиальной и тангенциальной дисторсий объектива. Вычисление её внешних и внутренних параметров осуществляется с помощью «гибкого» метода Чжана (использует фотографии шахматной доски в различных положениях для расчёта преобразования координат узловых точек).

Выделение зоны с текстом обеспечивается посредством следующих операций:

- перевод изображения в градации серого;
- шумовая фильтрация методом нелокального усреднения:

$$\begin{cases} den(x, y) = \frac{1}{\sum w} \sum_{(\xi, \eta) \in Q} w(x, y, \xi, \eta) gray(x + \xi, y + \eta) \\ w(x, y, \xi, \eta) = e^{-\frac{\|v(x, y) - v(x + \xi, y + \eta)\|_2^2}{h^2}} \end{cases},$$

где den , $gray$ – шумоподавленное и полутоновое изображения соответственно, $w(x, \xi, y, \eta)$ – вес, определяющий схожесть областей $v(x, y)$ и $v(x + \xi, y + \eta)$ вокруг пикселя (x, y) , Q – квадратное окно;

- гауссово размытие:

$$blur(x, y) = \sum_{i=-hw_x}^{hw_x} \sum_{j=-hw_y}^{hw_y} den(x + i, y + j) \omega(x + i, y + j),$$

где $blur$ – размытое изображение, hw_x , hw_y – полуширина и полувысота окна фильтрации соответственно, ω – гауссова маска размером 5x5;

- адаптивная бинаризация:

$$bin(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } blur(x, y) > t(x, y) \\ 255, & \text{если } blur(x, y) \leq t(x, y) \end{cases}'$$

где bin – бинаризованное изображение; $t(x, y)$ – порог бинаризации, представляющий взвешенную сумму (взаимную корреляцию с гауссовым окном) окрестности размером 5×5 пикселя (x, y) ;

- выделение контуров методом Сузуки – Абе.

После нахождения области интереса реализованы её обрезка и коррекция перспективы (рис. 3).



Рисунок 3 – Выделение зоны с текстом на примере области сообщений

Разделение полученной области (рис. 4) выполняется путём:

- вычисления проекций интенсивности пикселей перпендикулярно оси Y для каждой строки x бинаризованного изображения зоны:

$$proj_y(x) = \sum_{x=0}^{b-1} bin(x', y'),$$

где b – ширина изображения;

- поиска точек перепада яркости по условию:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{up} = x - c, \text{ если } sign(x) < 0 \text{ и } delta(x) < 0 \\ x_{down} = x + c, \text{ если } sign(x) > 0 \text{ и } delta(x) > 0 \\ sign(x) = (proj_y(x) - avg_{proj})(proj_y(x+1) - avg_{proj}) \\ delta(x) = proj_y(x) - proj_y(x+1) \end{array} \right. ,$$

$$avg_{proj} = \frac{1}{h} \sum_{x=0}^{h-1} proj_y(x)$$

Где x_{up} , x_{down} – строки верхней и нижней границ надписи соответственно, c – дополнительный вертикальный отступ, $sign$ – признак перепада яркости,

δ – разность проекций текущей и следующей строк; $avg(proj)$ – среднее арифметическое всех проекций, h – высота изображения.

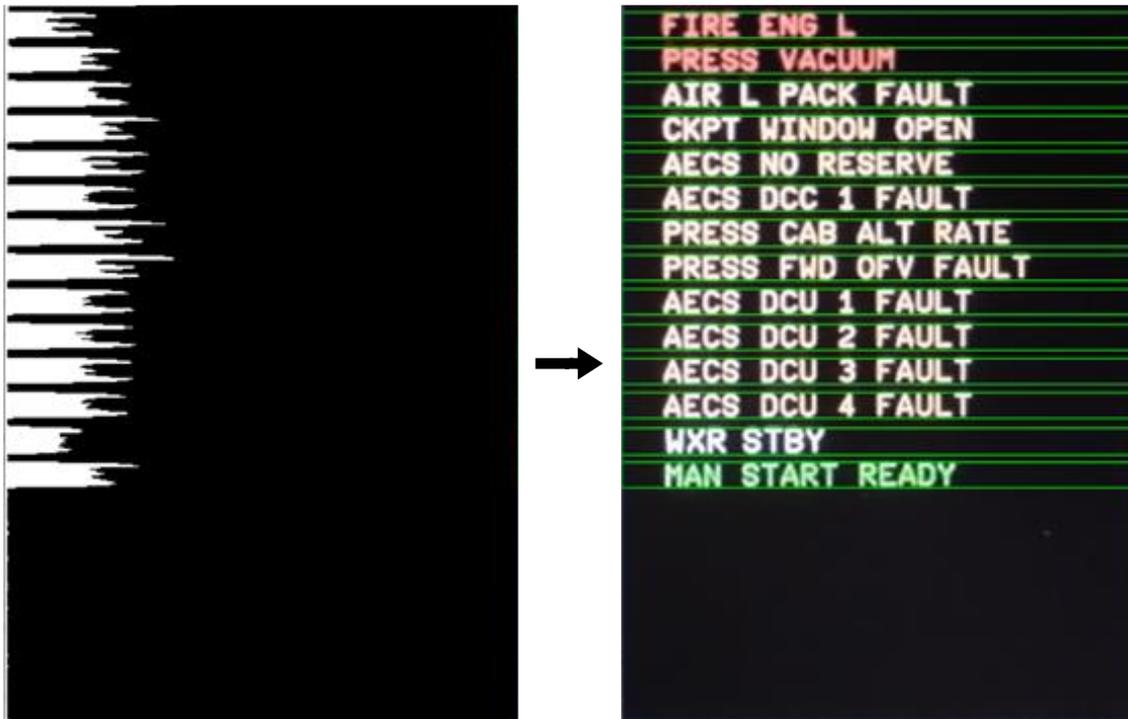


Рисунок 4 – Выделение строк на примере области текстовых сообщений

Распознавание текста реализуется посредством нейронной сети Tesseract OCR, предварительно обученной на шрифтах, используемых в конкретной СЭИ. Её выбор обусловлен главным образом высокой точностью и возможностью дообучения любому шрифту.

Цвет устанавливается путём нахождения преобладающих RGB-координат для каждой отдельно взятой строки методом k -средних и дальнейшей классификации переднепланового цвета.

Размер шрифта определяется за счёт выделения контуров символов методом Сузуки – Абе и замера сторон прямоугольников, которые описывают каждый из них (рис. 5). Расположение текста (отступы по осям X , Y , зазор между надписями) также рассчитывается по найденным контурам. Полученные размер шрифта и расположение могут быть выражены в пикселях или пересчитаны в радианы и мм соответственно.

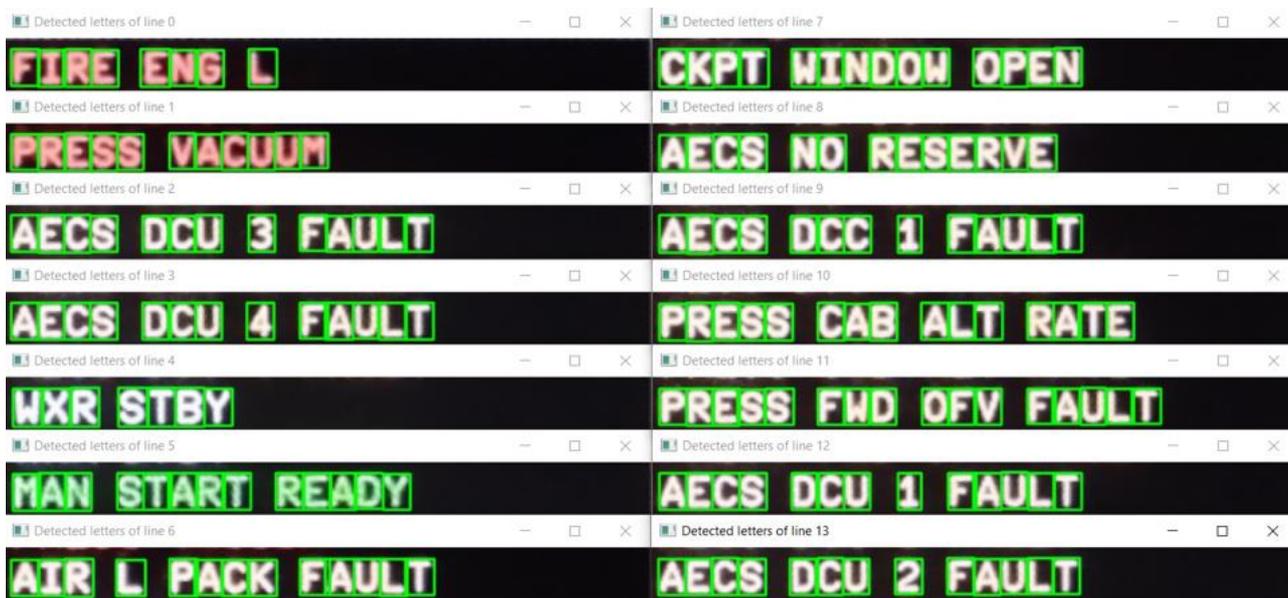


Рисунок 5 – Выделение контуров символов на примере текстовых сообщений

В результате формируется отчёт о проведённом тестировании (рис. 6). Дополнительно, если в ходе распознавания получены ошибки, предусмотрена выдача соответствующих предупреждений пользователю.

1. Общие сведения

Дата и время проведения тестирования: 2023-08-28 09:12:56.310374

2. Результаты тестирования

Тест №2

Продолжительность: 00:00:26.988583

Ожидаемый результат				Полученный результат				Результат
Текст	Цвет	Размер шрифта	Расположение, dx, dy	Текст	Цвет	Размер шрифта	Расположение, dx, dy	
FIRE ENG L	Красный	6 мрад	du = 40, dv = 8	FIRE ENG L	Красный	6 мрад	du = 41, dv = 7	OK
PRESS VACUUM	Красный	6 мрад	du = 40, ds = 11	PRESS VACUUM	Красный	6 мрад	du = 41, ds = 10	OK
AIR L PACK FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	AIR L PACK FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	OK
CKPT WINDOW OPEN	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	CKPT WINDOW OPEN	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	OK
AECS NO RESERVE	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	AECS NO RESERVE	Янтарный	6 мрад	du = 41, ds = 10	OK
AECS DCC 1 FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	AECS DCC 1 FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 41, ds = 11	OK
PRESS CAB ALT RATE	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	PRESS CAB ALT RATE	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	OK
PRESS FWD OFV FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	PRESS FWD OFV FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	OK
AECS DCU 1 FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	AECS DCU 1 FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 41, ds = 11	OK
AECS DCU 2 FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	AECS DCU 2 FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 41, ds = 11	OK
AECS DCU 3 FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	AECS DCU 3 FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 41, ds = 11	OK
AECS DCU 4 FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 40, ds = 11	AECS DCU 4 FAULT	Янтарный	6 мрад	du = 41, ds = 11	OK
WXR STBY	Белый	6 мрад	du = 40, ds = 11	WXR STBY	Белый	6 мрад	du = 39, ds = 10	OK
MAN START READY	Зеленый	6 мрад	du = 40, ds = 11	MAN START READY	Зеленый	6 мрад	du = 40, ds = 11	OK

Рисунок 6 – Пример сгенерированного отчёта о проведённых испытаниях

Разработанное ПО имеет модульную структуру (табл. 3), в которой каждый блок реализует одну из ранее рассмотренных функций.

Таблица 3 – Описание подмодулей разработанного ПО

Подмодуль	Описание
main	Основной подмодуль
config_checking	Проверяет выполнение необходимых условий для проведения тестирования
camera_calibration	Обеспечивает исходную калибровку камеры
zone_detection	Выполняет выделение текстовой зоны
rows_splitting	Отвечает за разделение области текста на строки
recognition	Обеспечивает определение значений верифицируемых параметров
results_generation	Сравнивает ожидаемые и полученные результаты, формирует отчёт об испытаниях
ui	Отвечает за выдачу уведомлений пользователю

В четвертой главе представлены результаты тестирования разработанного комплекса на примере текстовых сообщений предупреждения экипажа, индицируемых СЭИ гражданского лайнера МС-21. Для подтверждения работоспособности были проведены 4 серии (по 35 экспериментов), в каждой из которых проверено 560 сообщений (по 14-21 в одном тесте). В итоге получены следующие показатели точности определения:

- текста – 98,1%;
- цвета – 99,5%;
- размера шрифта – 98,8%;
- расположения – 97,6%.

При этом среднее время проверки 1 надписи из 22 символов (без учёта калибровки) – 1,73 с (примерно 0,078 с на 1 символ).

Успешным считался результат, при котором полученные значения удовлетворяли ожидаемым по всем рассматриваемым критериям. Если текст сообщения не был распознан / отличался от требований хотя бы на 1 символ или было обнаружено несоответствие цвета / размера шрифта / расположения (с учётом принятых допусков), то это интерпретировалось в качестве ошибки.

В ходе экспериментов выявлено, что результаты существенно зависят от внешней освещённости, наличия оптических засветок и положения камеры. Соответственно, определены ожидаемые условия эксплуатации комплекса в части отмеченных факторов:

- внешняя освещённость – 0...700 лк;
- засветки дисплея – отсутствуют;
- углы установки камеры относительно плоскости матрицы МФИ:
 - крен – -15...15°;

- тангаж – $-15...15^\circ$;
- рыскание – $-10...10^\circ$;
- расстояние от камеры до дисплея – $0,1...0,2$ м.

Несмотря на не 100% точность, полученные значения довольно высоки и удовлетворяют ранее предъявленным требованиям. Неудачные распознавания текста обусловлены невозможностью его обнаружения или ошибкой второго рода (ложноположительных случаев не было) по причинам расфокусировки камеры, разделения зоны на строки с обрезкой верхней / нижней части надписи, наличия крупнозернистого шума на исходных изображениях.

Тем не менее, результаты тестирования обязательно должны контролироваться со стороны оператором по причине использования не детерминированных алгоритмов (нейронной сети).

Дополнительно применение разработанного комплекса в сравнении с испытаниями текстовых сообщений вручную позволило сократить:

- совокупное время верификации более чем в 4 раза;
- количество неавтоматизированных проверок в 50 раз.

Следует учитывать, что при проведении испытаний вручную имеют место психофизиологические факторы человека-оператора, негативно влияющие на точность и время определения верифицируемых параметров (накопительная ошибка, связанная с усталостью при долгой работе, стресс), а также возможные нарушения зрения (низкая острота, проблемы цветовосприятия). Т. к. комплекс лишён подобных особенностей, его использование позволит ещё значительно улучшить качество тестирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие ключевые выводы и результаты.

1. Проведён обзор СЭИ современных гражданских самолётов, рассмотрены их назначение, функции, состав;
2. Проанализированы требования нормативной документации (в частности, руководства Р-25-11А), предъявляемые к ЧМИ СЭИ.
3. Проведён анализ современных средств автоматизации верификации бортовых систем, представленных на рынке. Установлено, что их функционал недостаточен, т. к. не позволяет автоматизировать тестирование органолептической информации, формируемой системами ЧМИ (в частности, СЭИ).
4. Разработана архитектура комплекса автоматизации верификации текстовой информации ЧМИ СЭИ, описаны его функции, принцип работы, аппаратная и программная части.

5. Сформированы требования к комплексу по критериям времени проведения теста и точности распознавания текста, цвета, размера шрифта, расположения надписей.

6. Разработана методика проведения испытаний ЧМИ СЭИ с применением комплекса.

7. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение комплекса.

8. Проведено тестирование комплекса на примере текстовых сообщений предупреждения экипажа, индицируемых СЭИ лайнера МС-21, которое подтвердило его работоспособность и адекватность.

9. Основные результаты диссертации внедрены в работу филиала ПАО «Яковлев» – Центр комплексирования по проекту «Разработка комплекса бортового радиоэлектронного оборудования самолёта МС-21», а также в учебный процесс на кафедре 703 «Системное проектирование авиакомплексов» Института №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» МАИ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*В рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих
в Перечень Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации*

1. **Дяченко, С. А.** Комплекс автоматизации верификации систем индикации перспективных гражданских самолётов [Электронный ресурс] // Электронный журнал «Труды МАИ». – М.: МАИ, 2023. – № 131. – Режим доступа: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175924>, свободный.

2. **Дяченко, С. А.** Анализ автоматизированных средств верификации систем авионики, применяемых при разработке современных гражданских самолётов [Электронный ресурс] / Савельев А. С. // Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык». – М.: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2021. – №1 (28). – Режим доступа: <http://if-mstuca.ru/CE/index.php/050000/aviatech/avionics/s11739>, свободный.

3. Савельев, А. С. Метод определения подхода отказобезопасности критического оборудования на этапе системного проектирования [Электронный ресурс] / Неретин Е. С., Берсуцкая О. Д., **Дяченко С. А.** [и др.] // Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык». – М.: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2020. – №4. – Режим доступа: <http://if-mstuca.ru/CE/index.php/050000/aviatech/avionics/mopokonesa>, свободный.

4. Поляков, В. Б. Архитектура перспективных комплексов управления бортовым оборудованием [Электронный ресурс] / Неретин Е. С., Будков А. С., Дяченко С. А. [и др.] // Электронный журнал «Труды МАИ». – М.: МАИ, 2018. – № 100. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93459>, свободный.

В научных изданиях, включённых в международные системы цитирования Scopus, Web of Science

5. Neretin, E. Overview of Automation Tools for Avionics Verification [Text] / **Dyachenko S.**, Ilyashenko D. // XI International Scientific & Technical Conference on Robotic and Intelligent Aircraft Systems Improving Challenges / IOP Journal of Physics: Conference Series. – The UK: Bristol, 2021. – №1958. – pp 1-7. – DOI: 10.1088/1742-6596/1958/1/012012.

6. **Dyachenko, S.** The Automation Tool Development for Aircraft Cockpit Display Systems Verification in Part of Text Data [Text] / Neretin E., Ilyashenko D. // 6th EAI International Conference IoT as a Service 2020 / Springer International Publishing. – Switzerland: Cham, 2021. – Vol. 346. – pp. 329-335. DOI: 10.1007/978-3-030-67514-1_26.

В других изданиях

7. **Дяченко, С. А.** Обзор средств автоматизации верификации бортовых систем гражданских самолётов [Текст] / Ильяшенко Д. М. // Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов: сб. докл. XI Международной юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов». – М.: Эдитус, 2021. – с. 105-108.

8. **Дяченко, С. А.** Программное обеспечение для автоматизированного тестирования систем электронной индикации современных гражданских самолётов [Текст] / Савельев А. С. // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению». – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – с. 33-37.

9. **Дяченко, С. А.** Программное средство автоматизации тестирования звуковых предупреждений в рамках верификации систем сигнализации гражданских самолётов [Текст] / Кордонский И. Т. // Сборник тезисов работ международной молодёжной научной конференции XLVII Гагаринские чтения 2021. – М.: Издательство «Перо», 2021. – с. 725-726.

10. **Дяченко, С. А.** Средства автоматизации верификации программного обеспечения бортовых систем гражданских самолётов [Текст] // XIII Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ

и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Сборник аннотаций конкурсных работ. – М.: Издательство «Перо», 2021. – с. 143-144.

11. Неретин, Е. С. Автоматизация верификации систем электронной индикации современных и перспективных объектов гражданской авиационной техники [Электронный ресурс] / Дяченко С. А., Мамкин Е. М., Крыцин А. В. [и др.] // Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык». – М: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2020. – №1 (24). – Режим доступа: <http://if-mstuca.ru/CE/index.php/050000/aviatech/avionics/avseispbgat>, свободный.

12. Дяченко, С. А. Программное обеспечение для автоматизированного тестирования систем электронной индикации современных гражданских самолётов [Текст] / Мамкин Е. М., Крыцин А. В., Ильяшенко Д. М. // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е. В. Арменского. Материалы конференции. – М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2020. – с. 70-72.

13. Дяченко, С. А. Программное средство автоматизации тестирования систем электронной индикации гражданских самолётов в части текстовой информации [Текст] / Неретин Е. С., Ильяшенко Д. М. // Материалы Юбилейной LXX открытой международной студенческой научной конференции Московского Политеха «СНК-2020». – М.: Московский Политех, 2020. – с. 146-150.

14. Дяченко, С. А. Программно-аппаратный комплекс автоматизированной верификации систем сигнализации для современных и перспективных гражданских самолётов [Текст] / Мамкин Е. М., Крыцин А. В., Ильяшенко Д. М. // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сб. тезисов докл. VII Международной научно-практической конференции «АВИАТОР». – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2020. – с. 123-125.

15. Дяченко, С. А. Автоматизация верификации систем индикации перспективных гражданских самолётов [Текст] / Мамкин Е. М., Крыцин А. В., Ильяшенко Д. М. // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». Тезисы. – М.: Типография «Логотип», 2019. – С. 465.