

Труды МАИ. 2023. № 131
Trudy MAI, 2023, no. 131

Обзорная статья
УДК 681.518.3
DOI: [10.34759/trd-2023-131-18](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-18)

КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗАЦИИ ВЕРИФИКАЦИИ СИСТЕМ ИНДИКАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГРАЖДАНСКИХ САМОЛЕТОВ

Сергей Александрович Дяченко

Московский авиационный институт, (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

dyachenkosergey33@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрены методы верификации авиационных бортовых систем и средства автоматизации данного процесса, имеющиеся на рынке. Установлено, что перспективным направлением развития является автоматизация проверки графической и звуковой информации для систем человеко-машинного взаимодействия. Предложены архитектура и программно-алгоритмическое обеспечение подобного комплекса для систем индикации гражданских самолетов в части текстовой информации, а также проведено тестирование описанного средства, подтвердившее его эффективность. При этом лежащие в основе алгоритмы компьютерной обработки изображений универсальны, что позволяет адаптировать представленный инструмент под любые технические системы с ЧМИ (в т. ч. для других отраслей промышленности).

Ключевые слова: гражданский самолет, авионика, автоматизация, верификация, безопасность полета, человеко-машинный интерфейс, распознавание изображений

Для цитирования: Дяченко С.А. Комплекс автоматизации верификации систем индикации перспективных гражданских самолетов // Труды МАИ. 2023. № 131. DOI: [10.34759/trd-2023-131-18](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-18)

Review article

AUTOMATED VERIFICATION COMPLEX FOR COCKPIT DISPLAY SYSTEMS OF NEXT-GENERATION CIVIL AIRCRAFT

Sergey A. Dyachenko

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

dyachenkosergey33@yandex.ru

Abstract. According to accident statistics provided by international aviation authorities and leading airplane manufacturers, loss of control in-flight stands as the primary cause of air crashes in terms of the number of victims. One of the contributing factors to loss of control in-flight is the failure or malfunction of aircraft systems, which may result from undetected errors during the design phase. To address this issue, reducing the influence of the human factor in the development of on-board systems is crucial, and this can be achieved through the implementation of automation instruments.

The article encompasses an analysis of verification automation tools for civil aircraft on-board systems currently available on the market, including formal verification and system testing instruments, as well as complex solutions. Moreover, the research highlights

that the growth potential of these tools lies in graphic and aural information testing. This aspect becomes relevant when assessing the human-machine interface within cockpit displays and flight warning systems verification.

Additionally, the article proposes the architecture, algorithms, and software of such a complex providing text information recognition for cockpit display systems. The conducted tool testing confirmed its high effectiveness. While the complete exclusion of an operator from the verification process is deemed unacceptable due to safety concerns, the aforementioned type of tools can potentially enhance the human-machine interface systems' reliability by mitigating the influence of the human factor, and it can also lead to savings in time and financial resources.

Concurrently, the underlying methods of computer image processing are universal, enabling the developed complex to be adapted to diverse technical systems featuring human-machine interfaces (including industries beyond aviation).

Keywords: civil aircraft, avionics, automation, verification, flight safety, human-machine interface, image recognition

For citation: Dyachenko S.A. Automated verification complex for cockpit display systems of next-generation civil aircraft. *Trudy MAI*, 2023, no. 131. DOI: [10.34759/trd-2023-131-18](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-18)

Введение

По статистике авиационных происшествий организаций, устанавливающих нормы и предопределяющих пути развития гражданской авиации, а также ведущих

мировых авиапроизводителей, потеря управляемости в полете (англ. loss of control in-flight, далее – 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 пострадавших за указанные 5 лет. При этом в 2019 г. в авариях, вызванных LOC-I, погибли 80% всех жертв [1]. Вышеуказанные показания подтверждает статистика компании Boeing, согласно которой смертельные случаи, зафиксированные с 2009 по 2018 гг. в авиакрушениях по причине LOC-I, более чем в два раза превышают количество пострадавших от второго по величине фактора – столкновения борта с землей в управляемом полете – и составляет 1183 против 568 (общее число погибших в указанный период – 2532) [2].

В соответствии с принятой терминологией к LOC-I относятся причины, по которым экипаж не смог сохранить управление воздушным судном в полете, что привело к непоправимому отклонению от предполагаемой траектории. Среди них выделяются:

- сбой или неисправность системы / компонента самолета;
- ухудшенные метеорологические условия;
- действия экипажа, связанные с низкой видимостью;
- некорректная конфигурация самолета (например, несоответствующее текущему этапу полета положение закрылков или предкрылков);

– события, вызванные обледенением элементов борта и др.

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

Для обеспечения безопасности разрабатываемых комплексов предусмотрены меры различного рода. К их числу относится необходимость выполнения жестких требований, наложенных на процессы создания бортовых систем и программного обеспечения (ПО), которые регламентированы действующей нормативной базой по разработке гражданской авиационной техники. Соответствующие стандарты Р-4754 и КТ-178С полностью описывают этапы планирования, разработки (определение требований, проектирование, кодирование, интеграцию) и интегральные процессы (валидацию требований, верификацию реализации, управление конфигурацией, гарантию качества, взаимодействие с сертифицирующими органами).

Помимо строгого соблюдения правил в части жизненного цикла (ЖЦ) для повышения безопасности компании-разработчики бортового оборудования стремятся к сокращению влияния человеческого фактора при его создании. Указанные цели достигаются за счет средств автоматизации, использование которых также снижает временные и экономические затраты.

На текущий момент на рынке широко представлены решения для автоматизации большинства процессов ЖЦ. Однако, в силу вышеописанного, одним

из ключевых и наиболее ответственных из них является именно верификация, поскольку по результатам ее выполнения устанавливается соответствие продукта предъявленным требованиям и подтверждается корректность реализации предусмотренных функций.

Таким образом, к целям данной работы относятся:

- проведение анализа средств автоматизации верификации бортовых систем гражданских самолетов, представленных на рынке;
- разработка комплекса автоматизации верификации систем индикации (далее – комплекс) в части человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) в рамках перспективных направлений развития упомянутых инструментов.

Анализ средств автоматизации верификации бортовых систем

В руководстве Р-4754 предусмотрены различные методы верификации вновь разрабатываемых бортовых систем, среди которых: рассмотрение, анализ, моделирование, тестирование. Также в стандарте описан подход подтверждения опытной эксплуатацией, т. е. получение верификационного зачета для изделия, полностью совпадающего или схожего с тем, которое установлено и успешно функционирует на другом воздушном судне. В настоящей статье инструментальные решения для указанного метода не рассматриваются.

Рассмотрение и анализ

Рассмотрение проводится для формирования согласованного мнения о соответствии продукта предъявленным требованиям. Для данного метода характерны следующие типичные операции:

- осмотр, свидетельствующий о соответствии изделия необходимой физической реализации и должному качеству исполнения;
- экспертиза проекта, показывающая, каким образом система будет функционировать в нормальных и ненормальных условиях;
- экспертиза испытаний, устанавливающая их приемлемость для проверки заданных требований.

Анализы обеспечивают очевидность соответствия изделия требованиям путем детального рассмотрения ее заявленных функциональных возможностей и характеристик. Примером служит анализ покрытия требований, при котором формируется матрица трассируемости с целью контроля полноты их охвата в процессе проектирования и верификации.

Рассмотрения и анализы зачастую выполняются вручную путем заполнения перечня контрольных проверок (англ. checklist), подготовки отчета или аналогичных документов. Также для их проведения используют ресурсы сторонних компаний (аутсорсинг) для независимости проверки.

Моделирование

Наиболее широко применимый способ верификации – тестирование – позволяет обнаружить ошибки на некотором конечном наборе входных данных или при определенном поведении системы. Однако нельзя исключить возможность их появления в целом. Для решения этой задачи на ранних этапах проектирования выполняется моделирование с использованием формальных методов.

В общем случае формальная верификация заключается в доказательстве соответствия предмета проверки некоторому описанию. Т. е. формируются математические модели технического объекта и предъявляемых к нему требований с последующим логическим анализом их согласованности. Применимость подхода определяется степенью адекватности моделей (в частности, уровнем их соответствия реальному изделию и требованиям).

В настоящее время распространённым формальным методом является model checking, при котором модель системы, выраженная конечным числом состояний на языке темпоральной логики, совместно с логическими формулами поступают на вход программы-верификатора, осуществляющего автоматическую проверку истинности данных формул. Ниже рассмотрен ряд средств, реализующих описанный подход.

T-VEC (T-VEC Technologies, США)

T-VEC – одно из первых апробированных на практике решений по внедрению формальной верификации. Данная программная среда применяется при проектировании высоко критичных для безопасности систем реального времени с 1989 г. В частности, продукт T-VEC использовался при разработке систем предупреждения столкновения самолетов в воздухе и электроснабжения для McDonnell Douglas MD90. Относительно ранних версий продукт был существенно переработан и расширен согласно растущим запросам рынка.

Структура среды T-VEC [3] представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структура среды T-VEC

Набор формализованных требований хранится в виде проектных спецификаций. Графические редакторы используются для обращения к спецификациям и получения на их основе необходимых свойств (атрибутов). Компилятор выполняет синтаксическую и семантическую оценку упомянутых требований. Генератор тестовых последовательностей формирует наборы тестов на основе знаний о системе. Анализатор покрытия проверяет каждую проектную спецификацию как минимум одним набором тестовых процедур. Среда также автоматически генерирует документацию по результатам работы, обеспечивает управление конфигурацией спецификаций.

Таким образом, T-VEC создает тестовые последовательности, осуществляет их запуск, автоматическую выгрузку документации и сбор покрытия. Дополнительно представление требований в виде машинных моделей позволяет провести их валидацию, т. е. проверку непротиворечивости, полноты, атомарности.

MASIW (ИСП РАН & ФГУП «ГосНИИАС», Россия)

Институт системного программирования Российской академии наук совместно с ФГУП «ГосНИИАС» разработали отечественное инструментальное средство

MASIW (англ. Modular Avionics System Integrator Workplace) для поддержки проектирования систем на базе интегрированной модульной авионики – популярной на сегодняшний день концепции создания авиационных комплексов бортового оборудования. При данном подходе необходимые функции выполняют программные приложения под управлением операционной системы реального времени на общей аппаратной платформе.

Среда MASIW охватывает различные процессы ЖЦ (определение и анализ требований, предварительная оценка архитектурных решений и пр.). Программный продукт поддерживает выгрузку отчета, содержащего перечень проверяемых условий и компонентов модели, результат тестирования по каждому из них, а также в случае обнаружения нарушений – их причины [4].

Тестирование

Тестирование подразумевает подтверждение соответствия ожидаемого и фактического поведения объекта на выделенном конечном наборе тестов. Данный метод является основным и повсеместно используемым не только в авиастроении, но и в других отраслях промышленности.

Для тестирования бортовых систем с реальным оборудованием в контуре широко применяются специализированные контрольно-диагностические комплексы (КДК). Типовой КДК представляет программно-аппаратное средство, позволяющее регистрировать выходные данные, сформированные по результатам обработки

полученных входных данных. К основным функциям относятся информационный обмен с объектом испытаний по различным интерфейсам и обработка результатов.

На рынке существует множество КДК, отличающихся функционалом, гибкостью настройки, количеством поддерживаемых интерфейсов обмена. Большинство из них – специализированные инструменты для работы с определенным типом интерфейса (например, анализаторы шин ARINC 429, ARINC 664, ARINC 825) или с отдельными системами (в частности, продукция компании VIAVI для испытаний навигационного и связного оборудования IFR4000, ALT-8000, APM-424(V)4, ATC-5000NG, GPSG-1000). Однако также встречаются решения с широкими исходными возможностями и легкостью адаптации под различные производственные нужды. Ниже приведен обзор лишь некоторых подобных средств.

«ФРЕГАТ» (АО «УКБП», Россия)

Предприятие АО «УКБП» разработало инструмент диагностики комплектующих изделий «ФРЕГАТ», выполняющий:

- имитацию информационных сигналов, транслируемых по различным авиационным интерфейсам (разовые команды, ARINC 429, ARINC 708, ARINC 717, МКИО и др.);
- контроль устройств ввода / вывода;
- отображение, документирование, сохранение результатов диагностирования и сведений об объекте контроля.

Посредством «ФРЕГАТ» имитируется «окружение» – сигналы от сопряженных систем. Набор входных параметров объединяется в тестовую процедуру, по итогам выполнения которой считываются выходные данные тестируемого блока и оценивается корректность его работы в целом и встраиваемого ПО в частности.

«ФРЕГАТ» используется на этапах отладки, приемосдаточных испытаний, регламентных работ систем электронной индикации (СЭИ) и сигнализации и наземных автоматизированных станций контроля. С его применением разработаны самолеты Superjet 100, Ту-204, Ту-214, Ан-148 и пр. [5]. На текущий момент «ФРЕГАТ» эксплуатируется в рамках проекта отечественного лайнера МС-21.

Средства на базе программной среды моделирования «ДИАНА» (Россия)

Среда «ДИАНА» была разработана в конце 1990-х гг. и предназначалась для создания математических моделей систем и реализации комплексного подхода к их моделированию (применение количественных и качественных методов анализа). В дальнейшем в 2000-е гг. на ее базе были спроектированы стенды полунатурного моделирования для использования при разработке встроенных бортовых вычислителей реального времени [6]. Аналогичные комплексы, модернизированные в обеспечение современных требований международной нормативной документации, эксплуатируются авиационными предприятиями на текущий момент.

Решения на базе «ДИАНА» имеют широкий функционал, во многом схожий с ранее описанным продуктом «ФРЕГАТ», и позволяют:

- создавать имитационные модели самолетных систем;

- организовывать их интерфейсное взаимодействие с имеющимся бортовым электронным оборудованием в реальном времени;
- управлять процессом моделирования в диалоговом режиме или выполнять тесты автономно без участия оператора;
- регистрировать и обрабатывать полученные результаты (в т. ч. отображать в графическом, табличном виде).

Для реализации описанных возможностей рабочее место оператора с установленной средой «ДИАНА» подключается к объекту испытаний по кодовым линиям связи. Передаваемые в шинах данные регистрируются специальными средствами анализа трафика (например, ПО «Wireshark» для протокола ARINC 664 или «Y-SIM 429» для ARINC 429).

На сегодняшний день стенд полунатурного моделирования на базе «ДИАНА» используется ПАО «Яковлев» с целью проверки работы брандмауэра, сервера данных и информационной системы самолета МС-21.

Интегральные решения

С развитием информационных технологий производители отдельных решений специализированного назначения перешли к разработке интегральных средств широкого функционала для проведения автоматизированной верификации различными способами (формальные методы, тестирование с целевой платформой в контуре и пр.).

Тенденция к комплексированию самостоятельных программных пакетов в единое семейство крайне актуальна и касается не только инструментов верификации. Если среда предназначена для использования в рамках конкретного процесса / этапа проектирования, разработчики стремятся обеспечить ее взаимодействие с другими популярными продуктами для смежных процессов / этапов. Таким образом, применение комплексных решений позволяет достичь высокого уровня автоматизации на всем ЖЦ изделия. При этом среди проблем, которые могут возникнуть при их внедрении, выделяются сложность квалификации и кастомизации под специфические нужды.

Ниже рассмотрены наиболее распространенные интегральные продукты, апробированные в ходе реальных проектов.

Avionics Development System (TechSAT, Германия)

Универсальный комплекс «Avionics Development System» (ADS) от немецкой компании TechSAT представляет среду для прототипирования, проектирования, интеграции и верификации авионики. ADS объединяет программную имитационную среду и аппаратную платформу, в совокупности предоставляющие возможность создания имитаторов бортовых систем, реализации обмена моделями с реальным оборудованием по интерфейсам в соответствии с ARINC 429, ARINC 664, ARINC 825, ARINC 717 и др., визуализацию данных, запись трасс, написание и выполнение тестов. При этом обеспечены масштабируемость, гибкая настройка конфигурации и

модульная реализация комплекса. Обобщенная архитектура стенда испытаний на базе ADS представлена на рисунке 2.

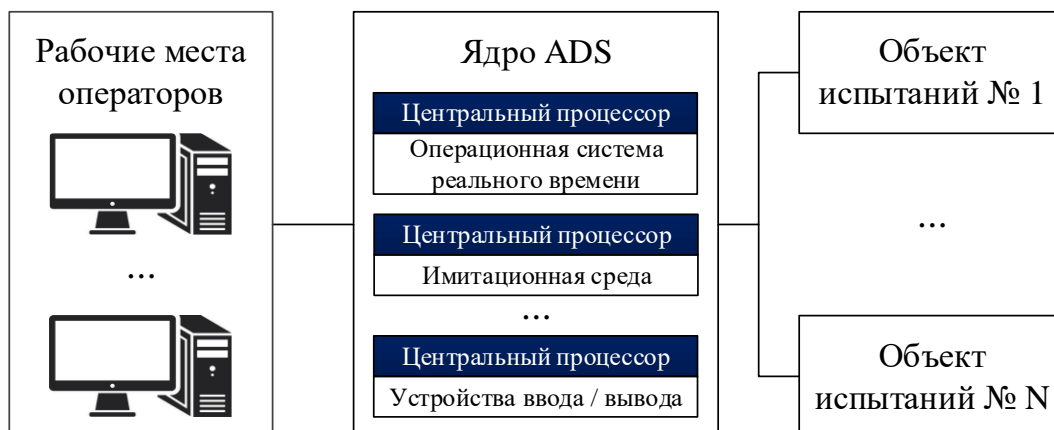


Рисунок 2 – Обобщенная архитектура стенда испытаний на базе ADS

Существенное преимущество ADS – сопряжение с популярными инструментами автоматизированного проектирования (MATLAB & Simulink, ANSYS SCADE, LabVIEW, IBM Rational Rhapsody, IBM Rational DOORS и пр.), а также возможность интеграции с пользовательскими скриптами, написанными на языке Python.

К числу проектов, на которых применялся ADS, относятся кабина экипажа Airbus A350, СЭИ COMAC C919, комплекс авионики MC-21, удаленный концентратор данных Boeing B787, контроллер маршевой силовой установки Eurofighter Typhoon и др. [7].

ANSYS SCADE (ANSYS, США)

Семейство продуктов ANSYS SCADE включает решения для модельно-ориентированного проектирования критического с точки зрения безопасности

встроенных систем, поддерживающие весь процесс разработки от определения требований до тестирования и внедрения.

К числу программных пакетов ANSYS SCADE относятся:

- SCADE Architect для создания архитектуры системы (в т. ч. анализа требований, определения информационных потоков);
- SCADE Suite для разработки алгоритмов управления и логики работы;
- SCADE Display для создания ЧМИ;
- SCADE Test для разработки и выполнения тестовых сценариев с целью верификации и валидации;
- SCADE Solutions for ARINC 661 Compliant Systems для автоматизации разработки СЭИ по стандарту ARINC 661;
- ANSYS SCADE Suite Design Verifier для проведения формальной верификации;
- SCADE LifeCycle для управления ЖЦ.

Ключевое преимущество ANSYS SCADE состоит в наличии квалифицированного генератора кода на основе созданных моделей, что заменяет ручное кодирование разработкой ПО на интуитивно понятном графическом языке. Кодогенератор ANSYS SCADE может быть квалифицирован в соответствии с Р-330, в т. ч. для уровня гарантии разработки А, что позволяет использовать продукт при проектировании наиболее критичных по безопасности систем. Кроме того, пакеты из состава ANSYS SCADE поддерживают автоматическую генерацию технической

документации, что сокращает время и исключает влияние человеческого фактора при ее подготовке.

Среди самолетов, разработанных с использованием ANSYS SCADE, выделяются MC-21, Superjet 100, Airbus A380, A400M, Boeing B787, COMAC ARJ21, C919, Bombardier CRJ-1000 и др. [8].

MATLAB & Simulink (MathWorks, США)

MATLAB & Simulink также реализует модельно-ориентированный подход. При этом достигаются ранние валидация решений, автоматизированное трассирование созданных моделей на требования, автогенерация кода и отчетов с соблюдением положений отраслевых стандартов (в частности, P4754A, KT-178C).

В составе инструментов MATLAB & Simulink для авиационных нужд:

- System Composer для определения архитектуры систем и ПО;
- Simulink Requirements для трассирования моделей на требования;
- Simulink и Stateflow для разработки алгоритмов и управляющей логики;
- Simulink Check для проверки соответствия принятым в рамках конкретного проекта стандартам моделирования;
- Simulink Design Verifier для проведения формальной верификации с целью выявления скрытых ошибок (переполнение целых чисел, блоки «мертвой» логики, нарушения доступа к массивам, деление на ноль);
- Simulink Test для создания, управления и выполнения тестовых процедур на моделях, сгенерированном коде и реальном оборудовании;

- Simulink Coverage для оценки полноты тестирования;
- Simulink Report Generator для автоматизированной генерации документации.

К примерам авиационного применения MATLAB & Simulink относятся системы подачи топлива гражданского самолета Airbus A380 [9], управления полетом бизнес-джета Gulfstream G500, истребителя военного назначения F-35 и учебно-тренировочного борта M-346 производства Alenia Aermacchi [10], спутниковой связи компании BAE Systems [11].

Итоги обзора

Рассмотрения и анализы зачастую выполняется вручную путем оформления соответствующей документации, что требует значительных временных ресурсов (при этом велико влияние человеческого фактора). В качестве альтернативы, а также для обеспечения независимости проверки используются аутсорсинг.

Формальные методы позволяют на раннем этапе доказать соответствие модели системы определенным свойствам на целой области входных значений в отличие от классического тестирования на точечном наборе данных. Тем не менее, подобные доказательства выполняются для небольшого круга простых теорий. Кроме того, результаты существенно зависят от адекватности моделей системы и требований. Этот тип верификации подразумевает разработку сложного математического доказательства формальной модели, что крайне затратно экономически, и не предполагает учет специфики работы на целевой платформе.

Тестирование с помощью КДК позволяет оценить корректность функционирования посредством контроля потоков данных в кодовых линиях связи. Также обеспечивается автоматизация их обработки и формирование отчетов по результатам испытаний. Ключевой недостаток состоит в невозможности полностью проверить предусмотренный функционал и корректность работы всего бортового оборудования. Например, для систем ЧМИ необходимо выполнение органолептической (визуальной, звуковой, световой, тактильной) оценки информации. В силу сложности ее автоматизации тестирование проводится вручную, что приводит к существенному росту временных и финансовых затрат, при этом повышает вероятность человеческой ошибки.

Интегральные решения – мощные инструменты для верификации сразу несколькими методами на уровнях ПО и системы. Они сосредотачивают преимущества вышеотмеченных подходов. При их сопряжении с другими комплексными продуктами достигается высокая степень автоматизации на всем ЖЦ изделия, однако могут возникнуть трудности настройки под нужды конкретного проекта. Кроме того, интегральные программные среды весьма дороги (в части приобретения лицензии, технической поддержки и квалификации), а также по-прежнему не охватывается тестирование ЧМИ.

Следует отметить, что ограничение использования различных инструментов связано с необходимостью их квалификации согласно Р-330. Т. е. требуется подтвердить, что выбранное средство доказанно не вызывает ошибок, негативно влияющих на безопасность разрабатываемого изделия. Этот процесс трудозатратен и

часто экономически невыгоден, поэтому многие конструкторские бюро предпочитают не автоматизировать некоторые ресурсоемкие аспекты верификации.

Направления развития

В целом рассмотренные выше инструменты обладают широкими возможностями и в совокупности позволяют проводить разносторонние проверки. Однако, как отмечено ранее, в состав комплекса бортового оборудования входят системы ЧМИ, для автоматизации верификации которых имеющихся функций недостаточно. Например, системы электронной индикации и предупреждения в кабине, основная задача которых – обеспечивать экипаж необходимыми для пилотирования данными и своевременно оповещать о возникновении нештатных ситуаций. При этом формируемая информация выдается в виде изображений, индицируемых на дисплеях, звуковых, световых и тактильных сигналов.

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. Средства автоматизации их тестирования, способные фиксировать и обрабатывать органолептическую информацию, на настоящий момент отсутствуют на рынке. Таким образом, их разработка является весьма актуальной.

Создание описанных комплексов возможно на основе методов компьютерной обработки изображений и звука, получивших широкое распространение в IT-сфере (для аутентификации личности и голосового управления в различных сервисах) [12],

[13], медицине (с целью раннего обнаружения и диагностирования заболеваний) [14], видеонаблюдении (для трекинга автомобилей и людей в городах, выявления повреждений на зданиях и прочих объектах) [15], [16] и других областях. В гражданской авиации эти подходы применяются в аэропортах для распознавания лиц пассажиров [17] и содержимого багажа с целью выявления злоумышленников и запрещенных к перевозке предметов [18], для обнаружения препятствий на территории взлетно-посадочной полосы [19].

Разработка комплекса автоматизации верификации систем индикации

На сегодняшний день выдача большей части информации, необходимой для пилотирования, обеспечивается посредством широкоформатных жидкокристаллических многофункциональных индикаторов (МФИ), расположенных на приборной панели в кабине.

На МФИ отображается множество форматов, среди которых пилотажный, навигационный, комплексный формат маршевой силовой установки и предупреждений экипажа (EWD), отдельные кадры по системам (топливной, гидравлической, электроснабжения и др.).

Особое внимание акцентируется на EWD как на одном из главных форматов, содержащем основные показатели работы двигателей и других бортовых систем, а также сообщения об отказах (пример для самолета Superjet 100 см. на рисунке 3). Последний блок данных исключительно важен, поскольку он предназначен для информирования экипажа о нештатном функционировании оборудования, которое

может сказаться на безопасности полета. Помимо самого текста, предупреждения различаются цветом в зависимости от критичности (в порядке убывания): «WARNING» (аварийный), «CAUTION» (предупреждающий), «ADVISORY» (уведомляющий), «MEMO» (информирующий) [20].



Рисунок 3 – Вид EWD самолета Superjet 100

Совокупное количество предусмотренных текстовых сообщений на воздушном судне составляет в среднем 400-600. При этом число параметров, участвующих в логике формирования каждого из них, варьируется от 1 до нескольких десятков. Соответственно, количество условий (комбинаций значений входных сигналов) для проверки выдачи всех предупреждений имеет порядок $10^3 - 10^4$. Проведение тестирования в подобных объемах вручную крайне трудоемко.

Таким образом, ниже представлен разработанный комплекс, направленный на автоматизацию верификации ЧМИ СЭИ в части текстовой информации на примере сообщений формата EWD.

Архитектура комплекса

Верхнеуровневая архитектура разработанного программно-аппаратного комплекса приведена на рисунке 4.

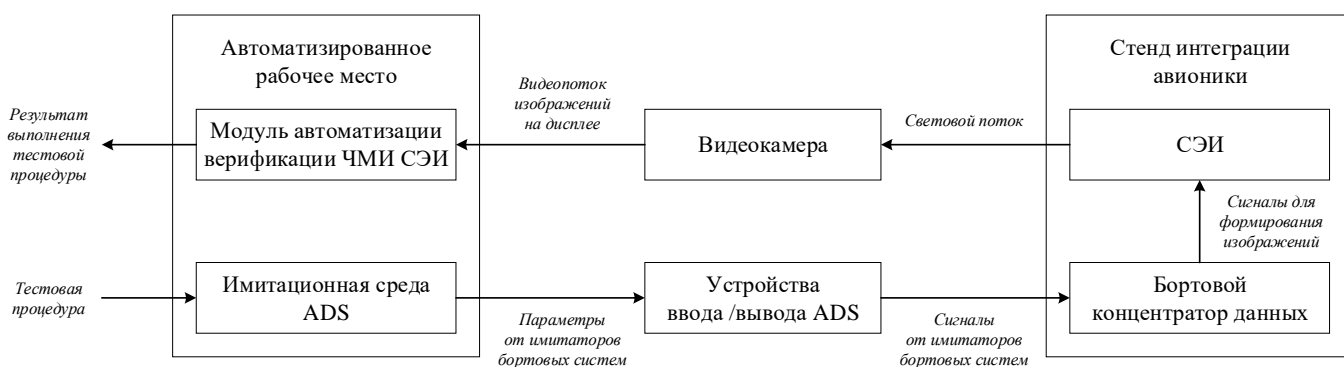


Рисунок 4 - Архитектура программно-аппаратного комплекса автоматизации верификации систем индикации

В состав его аппаратного обеспечения входят автоматизированное рабочее место оператора (персональный компьютер), устройства ввода / вывода ADS (для преобразования интерфейсов), стенд интеграции авионики и видеокамера. Основными компонентами стенда являются бортовой концентратор данных и СЭИ, соединенные кабельной сетью.

Программная часть включает имитационную среду ADS для задания сигналов, формирующих изображение на дисплее, разработанный модуль автоматизации верификации ЧМИ СЭИ и пакет Microsoft Office для подготовки тестовых процедур и генерации результатов испытаний.

Перед началом тестирования камера устанавливается оператором напротив МФИ таким образом, чтобы ее оптическая ось была перпендикулярна матрице дисплея для минимизации искажающих эффектов. Далее для каждой тестовой процедуры вручную:

- составляются матрицы ожидаемых результатов, включающие цвет, текст и размер сообщений, в табличном виде (см. рисунок 5);
- значения параметров для формирования соответствующей индикации.

Ожидаемый результат		
Текст	Цвет	Размер шрифта, мрад
BRK PLT PEDALS FAULT	Красный	6
FCS SLATS JAM	Янтарный	6
ENG L OIL PRESS LOW	Янтарный	6
HYD 2 ELEC PUMP ON	Зеленый	6
BEACON LIGHTS DIM	Белый	6
ADS3 CAPT	Белый	6

Рисунок 5 – Пример матрицы ожидаемых результатов тестовой процедуры

После параметры из имитационной среды транслируются в устройства ввода / вывода, где преобразуются в сигналы кодовых линий связи (разовые команды, ARINC 429, ARINC 825), моделируя реальное оборудование. Проходя через бортовой концентратор данных, выступающий в роли маршрутизатора, они поступают в систему индикации и участвуют в логике формирования рассматриваемого предупреждения. В итоге на EWD появляется / отсутствует проверяемое сообщение.

Затем камера, направленная на экран с EWD, формирует видеопоток, который в дальнейшем кадрируется (см. рисунок 6). Полученные кадры поочередно подаются на вход программного модуля автоматизации верификации ЧМИ СЭИ, который выполняет распознавание текстовой информации на снимке и устанавливает ее цвет

и размер. В конечном счете формируется заключение о прохождении теста путем сравнения ожидаемых и полученных результатов.



Рисунок 6 – Стенд интеграции авионики и камера, расположенная на нем

Программно-алгоритмическое обеспечение комплекса

Разработанный модуль автоматизации верификации ЧМИ СЭИ содержит функции:

- предобработки входного изображения;
- распознавания;
- формирования выходных данных.

Предобработка входного изображения необходима для подготовки интересующего фрагмента формата с текстовыми предупреждениями для дальнейшего распознавания и включает:

- выделение зоны сообщений EWD;
- разделение этой области на строки (см. рисунок 7);

– выполнение базовых операций над каждой из них: перевод в градации серого, фильтрация методом нелокального усреднения, гауссово размытие и адаптивная бинаризация гауссовым окном (см. рисунок 8).

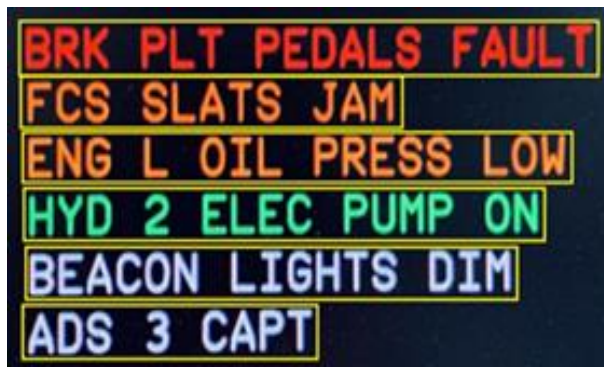


Рисунок 7 – Пример выделенной зоны сообщений EWD с разделением на строки

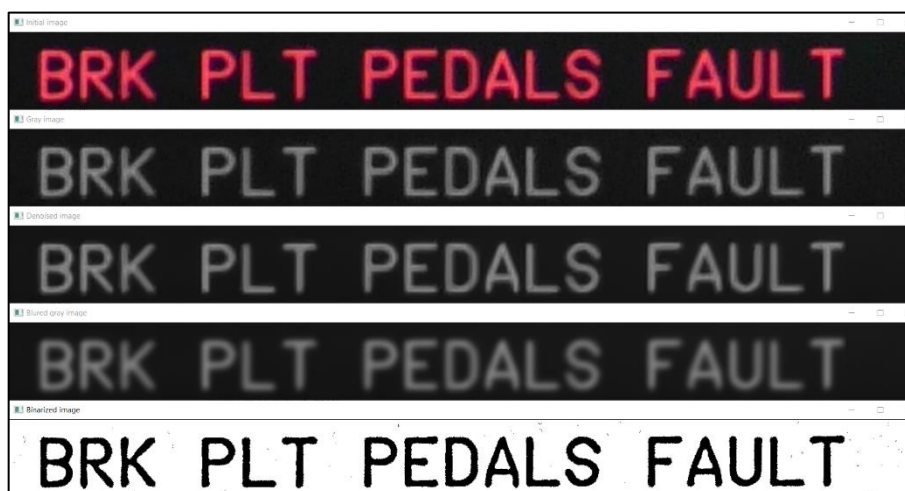


Рисунок 8 – Пример поэтапного преобразования изображения сообщения (исходное цветное, в градациях серого, отфильтрованное, размытое, бинаризованное)

Далее исходное цветное и преобразованное бинаризованное изображения каждой строки передаются в модуль распознавания для определения текста, цвета, размера сообщений. Распознавание текста обеспечивается с помощью нейросети Tesseract OCR, предварительно обученной на шрифтах, используемых в конкретной СЭИ. Цвет надписей устанавливается путем проверки принадлежности HSV-

координат пикселей соответствующим эмпирически подобранным диапазонам. Корректность размера шрифта оценивается через вычисление высоты букв и ее пересчет в миллирадианы относительно точки положения камеры.

После функция формирования выходных данных сравнивает ожидаемые и фактические результаты и генерирует отчет об испытаниях, содержащий вывод о прохождении теста (см. рисунок 9).

1. Общие сведения

Дата и время проведения тестирования: 2023-07-26 09:19:20.522899

2. Результаты тестирования

Тест №1

Продолжительность: 00:00:10.593523

Ожидаемый результат			Полученный результат			Результат
Текст	Цвет	Размер шрифта, мрад	Текст	Цвет	Размер шрифта, мрад	
BRK PLT PEDALS FAULT	Красный	6	BRK PLT PEDALS FAULT	Красный	6	ОК
FCS SLATS JAM	Янтарный	6	FCS SLATS JAM	Янтарный	6	ОК
ENG L OIL PRESS LOW	Янтарный	6	ENG L OIL PRESS LOW	Янтарный	6	ОК
HYD 2 ELEC PUMP ON	Зелёный	6	HYD 2 ELEC PUMP ON	Зелёный	6	ОК
BEACON LIGHTS DIM	Белый	6	BEACON LIGHTS DIM	Белый	6	ОК
ADS 3 CAPT	Белый	6	ADS 3 CAPT	Белый	6	ОК

Рисунок 9 – Пример сгенерированного по результатам испытаний отчета

Тестирование комплекса

Разработанный комплекс апробирован в рамках тестирования индикации предупреждений формата EWD для отечественного гражданского лайнера МС-21. В целях подтверждения его работоспособности были проведены 4 серии (по 35 экспериментов), в каждой из которых проверено 560 сообщений (по 14-21 в одном тесте). В результате получены следующие показатели точности распознавания:

- текстовой информации – 98,13%;
- цвета – 99,5%;

- размера шрифта – 98,8.

При этом среднее время выполнения теста из 21 строки – 36,3 с.

Несмотря на не 100% точность, полученные значения довольно велики. Неудачные случаи обусловлены невозможностью обнаружения (неправильных распознаваний не было). В подобных ситуациях необходимо вручную повторить испытания отдельно взятых предупреждений.

Дополнительно в сравнении с полностью ручным тестированием:

- количество неавтоматизированных проверок уменьшено в 50 раз;
- время сокращено более чем в 4 раза.

Заключение

На рынке имеется множество инструментов автоматизации верификации бортовых систем гражданских самолетов. Данные средства обладают широким функционалом и в совокупности позволяют проводить разносторонние проверки. Однако, продукты для систем ЧМИ, автоматизированно фиксирующие и обрабатывающие органолептическую информацию, на текущий момент не представлены. Их реализация возможна на основе методов компьютерной обработки изображений и звука, что продемонстрировано в настоящей статье.

В частности, разработана архитектура и программно-алгоритмическое обеспечение комплекса автоматизации верификации СЭИ. Его тестирование проведено на примере текстовых сообщений, индицируемых на формате EWD лайнера МС-21, по результатам которого подтверждена эффективность решения.

Основная сложность описанного комплекса связана с использованием не детерминированных алгоритмов, что не гарантирует воспроизводимость результатов. Тем не менее, данный недостаток нивелируется необходимостью их контроля со стороны человека-оператора в ходе тестирования.

Использование предложенного средства позволяет существенно сократить временные и финансовые затраты на верификацию СЭИ, хотя, как отмечено ранее, полное исключение оператора из процесса недопустимо. Глобально его применение позволит повысить безопасность полетов, уменьшить сроки производства самолетов и их сертификации.

Поскольку отмеченные методы универсальны, возможна их адаптация под любые технические системы человеко-машинного взаимодействия, в т. ч. в других областях промышленности (космическая отрасль, судостроение, автомобилестроение). Кастомизация под различные объекты зависит от требований соответствующей нормативной документации и конкретных проектных решений по выдаче органолептической информации.

Список источников

1. Safety Report 2019. 56th Edition. IATA, 2020, 262 p.
2. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959–2018. 50th Edition. Boeing, 2018, 15 p.

3. Blackburn M.R., Busser R.D. T-VEC: A Tool for Developing Critical Systems // Proceedings of the 11th Annual Conference on Computer Assurance «COMPASS '96», 1996, pp. 237-249. DOI: [10.1109/COMPASS.1996.507891](https://doi.org/10.1109/COMPASS.1996.507891)
4. Буздалов Д.В., Зеленев С.В., Корныхин Е.В., Петренко А.К., Страх А.В., Угненко А.А., Хорошилов А.В. Инструментальные средства проектирования систем интегрированной модульной авионики // Труды Института системного программирования РАН. 2014. Т. 26. № 1. С. 201-230. DOI: [10.15514/ISPRAS-2014-26\(1\)-6](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2014-26(1)-6)
5. Черкашин С.В., Шишкин В.В., Долбня Н.А. Универсальная система диагностирования бортового радиоэлектронного оборудования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 3. С. 392-397.
6. Балашов В., Бахмуров А., Волканов Д., Смелянский Р., Чистилинов М., Ющенко Н. Стенд полунатурного моделирования для разработки встроенных вычислительных систем реального времени // Труды IV всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». – СПб.: ОАО «ЦТСС», 2009. Т. 1. С. 215-219.
7. ADS2 Use Cases. TechSAT, 2020. URL: https://techsat.com/wp-content/uploads/2020/01/TechSAT_PRS-ADS2-UseCases_20200117.pdf.
8. ANSYS SCADE Model-Based Development Solutions for Aerospace & Defense. ANSYS, 2015. URL: <https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/public-leapaust/resources/SCADE-Solutions-for-Aerospace-Defense.pdf>.

9. Model Based Design for Airbus A380 Fuel System Development. Airbus, 2010. URL: https://it.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/solutions/aerospace-defense/files/2010/Airbus_MBDC_2010.pdf.
10. Alenia Aermacchi Develops Autopilot Software for DO-178B Level A Certification. MathWorks, 2006. URL: https://www.mathworks.com/company/user_stories/alenia-aermacchi-develops-autopilot-software-for-do-178b-level-a-certification.html.
11. BAE Systems Proves the Advantages of Model-Based Design. MathWorks, 2006. URL: <https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/bae-systems-proves-the-advantages-of-model-based-design.html>.
12. Bhattacharyya D., Ranjan R., Alisherov F., Minkyu C. Biometric Authentication: A Review // International Journal of u- and e- Service, Science and Technology, 2009, vol. 2, no. 3, pp. 13-28.
13. Волков С.С. Подход к решению задачи идентификации личности с помощью метода газоразрядной визуализации // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102198>
14. Gao J., Yang Y., Lin P., Park D.S. Computer Vision in Healthcare Applications // Journal of Healthcare Engineering, 2018, vol. 2018, 4 p. DOI: [10.1155/2018/5157020](https://doi.org/10.1155/2018/5157020)
15. Buch N.A., Velastin S.A., Orwell J. Review of Computer Vision Techniques for the Analysis of Urban Traffic // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, vol. 12, no. 3, pp. 920-939. DOI: [10.1109/TITS.2011.2119372](https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2119372)
16. Алексеев В.В., Лакомов Д.В. Аналитическая модель обработки графических изображений в системах жизнеобеспечения города для выявления повреждений

объектов // Труды МАИ. 2018. № 103. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=100810>

17. Del Rio J.S., Moctezuma D., Conde C., de Diego I.M., Cabello E. Automated Border Control e-Gates and Facial Recognition Systems // *Computers & Security*, 2016, vol. 62, pp. 49-72. DOI: [10.1016/j.cose.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.cose.2016.07.001)

18. Mouton A.A., Breckon T.P. Review of Automated Image Understanding Within 3D Baggage Computed Tomography Security Screening // *Journal of X-Ray Science and Technology*, 2015, vol. 23, pp. 531-555. DOI: [10.3233/XST-150508](https://doi.org/10.3233/XST-150508)

19. Князь В.В., Бусурин В.И. Автоматическое обнаружение препятствий на взлетно-посадочной полосе средствами технического зрения // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=57839>

20. AC 25.1322-1 Flightcrew Alerting. FAA, 2010, 42 p.

References

1. *Safety Report 2019*. 56th Edition. IATA, 2020, 262 p.
2. *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959–2018*. 50th Edition. Boeing, 2018, 15 p.
3. Blackburn M.R., Busser R.D. T-VEC: A Tool for Developing Critical Systems, *Proceedings of the 11th Annual Conference on Computer Assurance «COMPASS '96»*, 1996, pp. 237-249. DOI: [10.1109/COMPASS.1996.507891](https://doi.org/10.1109/COMPASS.1996.507891)

4. Buzdalov D.V., Zelenov S.V., Kornukhin E.V., Petrenko A.K., Strakh A.V., Ugnenko A.A., Khoroshilov A.V. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN*, 2014, vol. 26, no. 1, pp. 201-230. DOI: [10.15514/ISPRAS-2014-26\(1\)-6](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2014-26(1)-6)
5. Cherkashin S.V., Shishkin V.V., Dolbnya N.A. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 392-397.
6. Balashov V., Bakhmurov A., Volkanov D., Smelyanskii R., Chistolinov M., Yushchenko N. *Trudy IV vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika»*, Saint Petersburg, OAO «TsTSS», 2009, vol. 1, pp. 215-219.
7. *ADS2 Use Cases*. TechSAT, 2020. URL: https://techsat.com/wp-content/uploads/2020/01/TechSAT_PRS-ADS2-UseCases_20200117.pdf.
8. *ANSYS SCADE Model-Based Development Solutions for Aerospace & Defense*. ANSYS, 2015. URL: <https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/public-leapaust/resources/SCADE-Solutions-for-Aerospace-Defense.pdf>.
9. *Model Based Design for Airbus A380 Fuel System Development*. Airbus, 2010. URL: https://it.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/solutions/aerospace-defense/files/2010/Airbus_MBDC_2010.pdf.
10. *Alenia Aermacchi Develops Autopilot Software for DO-178B Level A Certification*. MathWorks, 2006. URL: https://www.mathworks.com/company/user_stories/alenia-aermacchi-develops-autopilot-software-for-do-178b-level-a-certification.html.

11. *BAE Systems Proves the Advantages of Model-Based Design*. MathWorks, 2006. URL: <https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/bae-systems-proves-the-advantages-of-model-based-design.html>.
12. Bhattacharyya D., Ranjan R., Alisherov F., Minkyu C. Biometric Authentication: A Review, *International Journal of u- and e- Service, Science and Technology*, 2009, vol. 2, no. 3, pp. 13-28.
13. Volkov S.S. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102198>
14. Gao J., Yang Y., Lin P., Park D.S. Computer Vision in Healthcare Applications, *Journal of Healthcare Engineering*, 2018, vol. 2018, 4 p. DOI: [10.1155/2018/5157020](https://doi.org/10.1155/2018/5157020)
15. Buch N.A., Velastin S.A., Orwell J. Review of Computer Vision Techniques for the Analysis of Urban Traffic, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, vol. 12, no. 3, pp. 920-939. DOI: [10.1109/TITS.2011.2119372](https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2119372)
16. Alekseev V.V., Lakomov D.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100810>
17. Del Rio J.S., Moctezuma D., Conde C., de Diego I.M., Cabello E. Automated Border Control e-Gates and Facial Recognition Systems, *Computers & Security*, 2016, vol. 62, pp. 49-72. DOI: [10.1016/j.cose.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.cose.2016.07.001)
18. Mouton A.A., Breckon T.P. Review of Automated Image Understanding Within 3D Baggage Computed Tomography Security Screening, *Journal of X-Ray Science and Technology*, 2015, vol. 23, pp. 531-555. DOI: [10.3233/XST-150508](https://doi.org/10.3233/XST-150508)

19. Knyaz' V.V., Busurin V.I. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL:
<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57839>

20. *AC 25.1322-1 Flightcrew Alerting*. FAA, 2010, 42 p.

Статья поступила в редакцию 08.08.2023

Одобрена после рецензирования 16.08.2023

Принята к публикации 28.08.2023

The article was submitted on 08.08.2023; approved after reviewing on 16.08.2023; accepted for publication on 28.08.2023