

УДК 681.51

*Губин Матвей Юрьевич, студент факультета летной эксплуатации
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова»*

Россия, Санкт-Петербург

*Соколов Олег Аркадьевич, Заведующий кафедрой № 13, к.т.н., доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова»*

Россия, Санкт-Петербург

**АРХИТЕКТУРА СОВРЕМЕННЫХ БОРТОВЫХ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ
(AFCS): КОМПОНЕНТЫ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И
ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ.**

Аннотация

В данной статье рассматривается архитектура современных бортовых автоматизированных систем управления полетом (AFCS), их состав, принципы взаимодействия компонентов и механизмы обеспечения отказоустойчивости. Показано, что развитие AFCS связано с переходом от автономных аналоговых устройств к цифровым интегрированным комплексам с модульной авионикой и сетевыми каналами обмена данными. Особое внимание уделено резервированию, диагностированию и детерминированной передаче данных как ключевым условиям безопасности полета.

Annotation

This article discusses the architecture of modern onboard automated flight control systems (AFCS), their composition, the principles of component interaction, and the mechanisms for ensuring fault tolerance. It shows that the development of AFCS is associated with the transition from standalone analog devices to digital integrated systems with modular avionics and network data exchange channels. Special attention is given to redundancy, diagnostics, and deterministic data transmission as key conditions for flight safety.

Ключевые слова: САУ, бортовые системы управления, авионика, интегрированная модульная авионика, отказоустойчивость, резервирование, AFDX, ARINC 664.

Keywords: AFCS, onboard control systems, avionics, integrated modular avionics, fault tolerance, redundancy, AFDX, ARINC 664.

Введение

Автоматизированные системы управления полетом занимают центральное место в современной авионике, поскольку они обеспечивают стабилизацию, наведение, сопровождение траектории и поддержку экипажа на всех этапах полета. В условиях роста требований к безопасности, точности и функциональной интеграции AFCS перестали быть автономными автопилотами и превратились в составную часть комплексной бортовой архитектуры. Это обусловило переход к цифровым вычислительным платформам, сетевым интерфейсам и модульной организации функций управления.

Целью данной работы является проанализировать архитектуру современных бортовых автоматизированных систем управления полетом (AFCS), выявить состав их основных компонентов, принципы взаимодействия между ними и ключевые методы обеспечения отказоустойчивости в контексте современных требований к безопасности и сертификации авиационной техники.

1. Архитектурные основы AFCS.

Современная бортовая автоматизированная система управления полетом (AFCS) представляет собой интегрированный комплекс, предназначенный для автоматического или полуавтоматического поддержания и изменения траекторных и режимных параметров воздушного судна. В отличие от ранних автопилотных устройств, работавших как сравнительно независимые контуры по крену, тангажу или курсу, современные AFCS включают несколько взаимосвязанных режимов, объединенных общей вычислительной и коммуникационной инфраструктурой. Такое развитие связано с ростом требований к точности управления, снижению нагрузки на экипаж, повышению безопасности и интеграции с другими подсистемами авионики.

Структурно AFCS можно представить как систему замкнутого управления, где сигналы обратной связи поступают от измерительных средств, далее обрабатываются вычислительным ядром, после чего формируются команды исполнительным механизмам. В состав входного информационного контура входят датчики угловых скоростей, ускорений, воздушных параметров, высоты, положения органов управления и навигационные источники, формирующие данные о пространственном положении самолета. Вычислительная часть анализирует состояние объекта управления, сравнивает его с заданными уставками и генерирует сигналы коррекции, обеспечивающие требуемый режим полета. Исполнительный

контур включает сервоприводы рулевых поверхностей, приводы триммирования и, при необходимости, каналы управления тягой двигателей.

2. Состав и функции компонентов.

Типовая AFCS включает несколько функциональных групп оборудования. Первая группа — сенсорная — обеспечивает первичное измерение параметров движения и состояния самолета. В современных комплексах данные поступают от инерциальных измерительных блоков, воздушных приемников, радионавигационных средств, спутниковых навигационных систем и датчиков положения исполнительных органов. Наличие нескольких источников одной и той же информации позволяет не только повышать точность, но и формировать основу для контроля достоверности данных.

Вторая группа — вычислительная — реализует законы управления, маршрутизацию данных и контроль работоспособности. На уровне вычислителей производится фильтрация шумов, оценка параметров движения, выработка управляющих сигналов и логика переключения режимов. В современных самолетах эта функция часто распределена между несколькими вычислительными модулями, объединенными в единую архитектуру авионики. Такой подход позволяет отделять критически важные функции управления от вспомогательных и организовывать строгую временную детерминированность выполнения алгоритмов.

Третья группа — исполнительная — преобразует управляющие команды в физическое перемещение органов управления. Для этого используются гидравлические, электромеханические или электродистанционные приводы, которые должны обеспечивать высокую точность, достаточную скорость реакции и устойчивую работу при частичных отказах. От качества исполнительного звена зависит не только точность стабилизации, но и способность системы безопасно завершить полет при ухудшении состояния отдельных каналов.

Четвертая группа — интерфейсная — обеспечивает обмен с экипажем и другими бортовыми системами. К ней относятся органы ввода режимов, панели управления, средства отображения режима автопилота и каналы сопряжения с индикацией, системой предупреждения и бортовыми вычислительными комплексами. Именно эта группа обеспечивает интеграцию AFCS в более широкую архитектуру самолета и делает управление прозрачным для экипажа.

3. Принципы взаимодействия.

Взаимодействие компонентов AFCS строится на обмене данными между сенсорным, вычислительным и исполнительным уровнями. При этом каждый контур управления работает не изолированно, а в составе более сложной бортовой информационной среды, где данные поступают по стандартизированным интерфейсам и проходят этапы валидации. Это особенно важно в цифровых системах, где ошибка в одном источнике может распространиться на несколько вычислителей одновременно, если не предусмотрены механизмы контроля согласованности.

В типовом режиме AFCS вычислитель получает данные о текущем положении самолета, параметрах полета и заданных режимах, после чего определяет отклонение от желаемого состояния. Далее система формирует корректирующие воздействия на рулевые поверхности, удерживая траекторию или изменяя ее в соответствии с командой экипажа либо программой полета. При этом обратная связь позволяет системе непрерывно уточнять свои действия и компенсировать возмущения, связанные с турбулентностью, изменением массы, обледенением или изменением аэродинамических характеристик.

Современные AFCS тесно связаны с пилотажно-навигационными комплексами, системами автоматического управления тягой и электронными средствами индикации. Например, при заходе на посадку AFCS использует навигационные данные, информацию о высоте и скорости снижения, а также

сигналы от радиотехнических средств, чтобы удерживать самолет на траектории глиссады. Такая комплексность требует согласования временных задержек, синхронизации данных и строгого разделения функций между подсистемами. Именно поэтому развитие AFCS неразрывно связано с эволюцией архитектуры всей авионики.

4. Сетевая архитектура авионики.

Одной из ключевых тенденций в развитии AFCS является переход к сетевой архитектуре передачи данных. Вместо множества разрозненных проводных соединений применяются цифровые магистрали, обеспечивающие обмен информацией между вычислителями, датчиками и индикацией. Наиболее известным решением в этой области стал AFDX/ARINC 664, разработанный как детерминированная авионическая сеть с гарантированными характеристиками времени доставки и полосы пропускания. Для систем управления полетом это имеет принципиальное значение, поскольку даже небольшая неопределенность задержек может ухудшить качество регулирования.

AFDX использует виртуальные каналы и коммутируемую топологию, что позволяет изолировать трафик различных подсистем и предотвращать взаимное влияние потоков данных. Такая организация снижает вероятность перегрузки сети и помогает сохранять устойчивость при локальных отказах. Кроме того, сетевой принцип упрощает масштабирование системы: новые функции можно добавлять без полной переделки аппаратной части самолета. Однако сетевизация повышает требования к конфигурированию, контролю целостности данных и сертификации всей коммуникационной среды.

5. Отказоустойчивость и резервирование.

Отказоустойчивость является одним из главных требований к AFCS, поскольку отказ системы управления полетом способен привести к тяжелым последствиям. Поэтому современные комплексы проектируются с учетом

избыточности, диагностирования и восстановления работоспособности. На практике это означает наличие нескольких независимых каналов управления, нескольких источников данных и механизмов голосования или выбора достоверного решения. Такой подход позволяет сохранять работоспособность при единичном отказе и переходить в безопасную конфигурацию при развитии неисправности.

Резервирование в AFCS может быть аппаратным, функциональным и информационным. Аппаратное резервирование предполагает дублирование или тройное резервирование вычислителей, датчиков и приводов. Функциональное резервирование означает, что одна и та же функция может быть реализована разными средствами или по разным алгоритмам. Информационное резервирование опирается на сравнение данных от нескольких независимых источников и выявление расхождений, указывающих на возможную неисправность.

Особую роль играет аналитическое резервирование, при котором правильность измерений проверяется не только аппаратным дублированием, но и математической связью между параметрами полета. Если измеренное значение расходится с ожидаемым с точки зрения модели динамики полета, система может распознать аномалию и исключить неисправный канал из управления. Такой метод особенно полезен там, где добавление физического резервного датчика связано с излишней массой, стоимостью или ограничениями компоновки.

6. Диагностика и безопасные режимы.

Для обеспечения безопасной эксплуатации AFCS широко применяются встроенные средства контроля и диагностики. Они анализируют состояние датчиков, вычислителей, линий связи и приводов, выявляя несоответствия, обрывы, дрейф параметров и отказ отдельных модулей. Важно, что современная диагностика не ограничивается фиксацией полной неисправности: она должна улавливать деградацию характеристик до того, как

она станет опасной для полета. Это особенно важно для систем, где даже кратковременное ухудшение точности может вызвать нежелательные колебания траектории.

Если система обнаруживает отказ, AFCS переходит в заранее предусмотренный деградированный режим. Например, автоматическое управление может сохранять стабилизацию по части каналов, но ограничить некоторые режимы, требующие более высокой надежности данных. Экипаж при этом получает индикацию о состоянии системы и может продолжать полет вручную либо с ограниченной автоматизацией. Такой механизм снижает вероятность внезапной потери управления и обеспечивает управляемое завершение полета даже при частичной потере функциональности.

7. Перспективы развития.

Перспективы развития AFCS связаны с дальнейшей интеграцией функций управления, ростом вычислительной мощности и расширением роли программно реализуемых алгоритмов. На практике это означает увеличение доли модульных платформ, где одна и та же аппаратная база используется для нескольких самолетных функций при строгом логическом разделении ресурсов. Такой подход позволяет снижать массу, сокращать объем кабельных связей и повышать гибкость модернизации.

Одновременно возрастают требования к киберустойчивости, целостности данных и устойчивости к системным ошибкам конфигурации. Чем глубже интеграция, тем выше вероятность того, что ошибка в одном модуле или интерфейсе повлияет на несколько функций сразу. Поэтому будущие AFCS будут развиваться не только в направлении повышения точности управления, но и в сторону более строгого разделения критических функций, интеллектуальной диагностики и расширенной верификации. Это делает тему AFCS особенно актуальной для современной авиационной инженерии.

Вывод

Современные AFCS представляют собой интегрированные цифровые комплексы, в которых управление полетом реализуется через взаимодействие датчиков, вычислителей, исполнительных механизмов и сетевых интерфейсов. Их надежность обеспечивается резервированием, самодиагностикой, детерминированной передачей данных и строгими процессами верификации. Дальнейшее развитие AFCS связано с расширением интеграции авионики, повышением уровня модульности и усилением требований к безопасности программно-аппаратных решений.

Список использованной литературы

1. Поляков В. Б., Неретин А. В., Иванов Д. В., Будков В. Б., Дьяченко А. В., Дудкин В. В. Архитектура перспективных комплексов управления бортовым оборудованием // Труды МАИ. — 2018. — Вып. 100.
2. Юков М. С. Бортовые автоматические системы управления // Образовательный вестник. — 2025.
3. AFDX®/ARINC664P7 Tutorial: What is AFDX // AIM Online. — Режим доступа: <https://www.aim-online.com/products-overview/tutorials/afdx-arinc664p7-tutorial/> (дата обращения: 02.06.2026).
4. FAA. ARP4754A: Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems. — 2010.

5. RTCA. DO-178C: Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification. — 2011.
6. RTCA. DO-254: Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware. — 2000.
7. RTCA. DO-297: Integrated Modular Avionics (IMA) Development Guidance and Certification Considerations. — 2005.