

БОРТОВОЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Е.И. Скворцова, В.К. Зольников, А.С. Ягодкин

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»

В статье представлен аналитический обзор структуры, эволюции и современного состояния бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) воздушных судов. Рассмотрены ключевые группы систем — радиосвязь, радионавигация и радиолокация, а также тенденции интеграции функций в рамках концепции интегрированной модульной авионики. Особое внимание уделяется цифровой трансформации, внедрению технологий искусственного интеллекта, квантовых навигационных решений, а также задачам энергоэффективности и экологическим стандартам. Описаны перспективы развития отечественных БРЭО, направление на импортозамещение и создание интеллектуальных, отказоустойчивых комплексов для гражданских и военных авиационных аппаратов. Анализируется влияние новых технических и технологических решений на безопасность, надежность, эффективность и автоматизацию управления летательными аппаратами.

Ключевые слова: бортовое радиоэлектронное оборудование, авионика, интегрированная модульная архитектура, радиосвязь, радионавигация, радиолокация, искусственный интеллект, квантовые навигационные системы, энергоэффективность, импортозамещение, российская авиационная промышленность.

ON-BOARD RADIOELECTRONIC EQUIPMENT

E.I. Skvortsova, V.K. Zolnikov, A.S. Yagodkin,

Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov

This article presents an analytical review of the structure, evolution, and current state of aircraft avionics. Key system groups—radio communications, radio navigation, and radar—are examined, along with trends in integrating functions within the integrated modular avionics concept. Particular attention is paid to digital transformation, the implementation of artificial intelligence technologies, quantum navigation solutions, energy efficiency, and environmental

standards. The article describes the prospects for the development of domestic avionics, the focus on import substitution, and the creation of intelligent, fault-tolerant systems for civil and military aircraft. The impact of new technical and technological solutions on the safety, reliability, efficiency, and automation of aircraft control is analyzed.

Keywords: on-board radio-electronic equipment, avionics, integrated modular architecture, radio communications, radio navigation, radar, artificial intelligence, quantum navigation systems, energy efficiency, import substitution, Russian aviation industry.

Бортовое радиоэлектронное оборудование является одним из важнейших компонентов современных воздушных судов, обеспечивающим безопасность полетов, эффективную навигацию и связь с наземными службами. В условиях постоянного усложнения воздушного пространства и ужесточения требований к безопасности полетов роль БРЭО становится все более критической. Современные летательные аппараты буквально пронизаны радиоэлектронными системами, от простейших радиостанций связи до сложнейших интегрированных комплексов управления полетом и навигации.

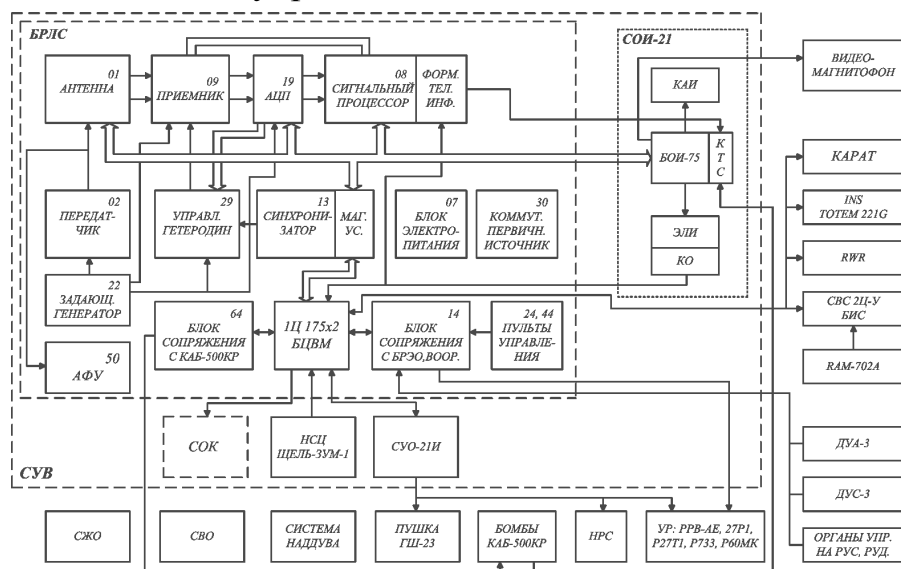


Рис.1 Бортовое радиоэлектронное оборудование современного самолета

Актуальность темы определяется быстрым ростом автоматизации полётов, широким внедрением БПЛА, переходом к цифровым архитектурам управления и появлением ИИ-компонент в контуре бортовых систем, а также ужесточением требований к безопасности и энергоэффективности авионики. Цель исследования — проанализировать эволюцию, текущее состояние и перспективные направления развития бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО), выявить технологические и организационные факторы, определяющие архитектуру и функциональность современных комплексов.

Объект исследования — авиационные и беспилотные платформы с интегрированными системами БРЭО; предмет — принципы построения, интеграции и цифровизации БРЭО, включая навигацию, связь, РЛС, вычислительные платформы и программно-аппаратные средства ИИ.

История развития бортового радиоэлектронного оборудования началась в первой половине XX века с появлением первых авиационных радиостанций. В те времена радиооборудование было громоздким, ненадежным и обладало ограниченными возможностями. Однако уже тогда стало ясно, что без средств радиосвязи и радионавигации дальнейшее развитие авиации невозможно. Вторая мировая война дала мощный импульс развитию авиационной радиоэлектроники, поскольку военные действия потребовали создания надежных систем связи, навигации и радиолокации. Послевоенное развитие гражданской авиации, в свою очередь, стимулировало создание более совершенных и безопасных систем БРЭО.

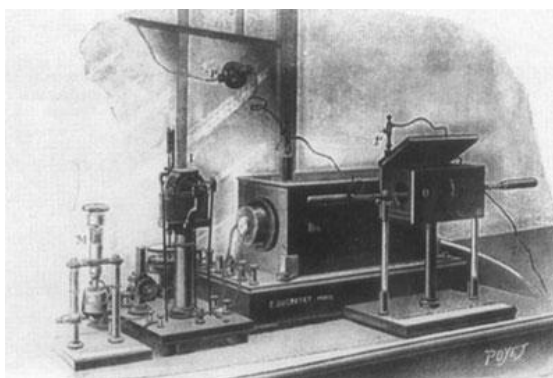


Рис.2 Первая авиационная радиостанция

Исследования последних лет фиксируют устойчивый переход от специализированных разрозненных блоков к интегрированным модульным архитектурам (ИМА) с высоконадежными вычислительными платформами реального времени, сертифицируемыми по авиационным стандартам (DO-178C/DO-254/ARP4754A и др.). Отмечается расширение роли GNSS/инерциальной интеграции, развитие активных РЛС с АФАР, а также рост значимости программных средств обработки и слияния данных. Одновременно обсуждаются вопросы жизненного цикла ПО, верификации ИИ-компонент, стандартизации интерфейсов и киберустойчивости. Несмотря на существенный прогресс, остаются открытыми проблемы масштабируемой сертификации алгоритмов машинного обучения, совместимости старых и новых подсистем, обеспечения энергоэффективности при возрастающей вычислительной

нагрузке и доводки квантовых навигационных решений до массового применения.

Современное бортовое радиоэлектронное оборудование представляет собой сложный комплекс систем, включающий средства радиосвязи, радионавигации, радиолокации, автоматического управления и контроля. К основным компонентам БРЭО относятся системы авиационной радиосвязи, обеспечивающие информационное взаимодействие экипажа с наземными службами управления воздушным движением и другими воздушными судами. Эти системы работают в различных частотных диапазонах и используют как аналоговые, так и цифровые методы передачи информации. Особое место занимают аварийно-спасательные радиосистемы, которые должны функционировать в экстремальных условиях и обеспечивать передачу сигналов бедствия даже при выходе из строя основных систем связи.



Рис.3 Современное бортовое радиоэлектронное оборудование

Радионавигационные системы составляют другую критически важную группу оборудования БРЭО. Современная авиационная навигация базируется на глобальных навигационных спутниковых системах GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou, которые обеспечивают высокоточное определение координат воздушного судна в любой точке земного шара. Однако наряду со спутниковыми системами продолжают использоваться традиционные радионавигационные средства, такие как системы инструментальной посадки ILS, всенаправленные радиомаяки VOR и автоматические радиоконпасы ADF. Эта избыточность обеспечивает надежность навигации и возможность продолжения полета даже при отказе отдельных систем.



Рис. 4. Вид экрана навигационного индикатора

Радиолокационное оборудование играет особую роль в обеспечении безопасности полетов. Современные авиационные радиолокационные комплексы являются высокоинтегрированными многофункциональными системами, обеспечивающими комплексный мониторинг воздушного пространства и метеорологической обстановки в трехмерном пространстве. Импульсно-доплеровские радиолокационные системы с активными фазированными антенными решетками (АФАР) демонстрируют возможности обнаружения воздушных целей на дальностях превышающих 300-400 километров при минимальной эффективной поверхности рассеяния от 0,01 квадратного метра. При обнаружении угрозы столкновения система автоматически выдает экипажу предупреждения типа ТА (Traffic Advisory) и, при необходимости, обязательные для исполнения команды уклонения RA (Resolution Advisory), координируя действия обоих воздушных судов для предотвращения катастрофы.



Рис.5 Радиолокационное оборудование

Интеграция различных систем в унифицированные комплексы представляет собой ключевое направление эволюции современного БРЭО. Концепция интегрированной модульной авионики (ИМА) предполагает объединение разнородных функций на единой вычислительной платформе с открытой сетевой архитектурой, что кардинально меняет подход к проектированию бортового оборудования.

Цифровая трансформация БРЭО представляет собой фундаментальную парадигму развития современной авионики. Миграция от аналоговой к цифровой элементной базе кардинально изменяет принципы построения бортовых радиоэлектронных систем, обеспечивая качественно новые возможности в области помехозащищенности, функциональной гибкости и системной интеграции.

Интеграция технологий искусственного интеллекта знаменует новую эпоху в эволюции БРЭО. Системы на базе ИИ могут автоматически анализировать радиолокационную информацию, оптимизировать маршруты полета в реальном времени, прогнозировать отказы оборудования и автоматически управлять радиоэлектронными системами. Это особенно важно для беспилотных летательных аппаратов, которые должны функционировать автономно без участия человека-оператора.

Российская промышленность демонстрирует значительные успехи в разработке современного БРЭО. Предприятия концерна "Радиоэлектронные технологии" и других организаций авиационно-промышленного комплекса создают конкурентоспособные системы для гражданских и военных воздушных судов. Особое внимание уделяется разработке оборудования для перспективных российских самолетов, таких как MC-21, SSJ-NEW и других. В рамках программы импортозамещения создаются отечественные аналоги зарубежных систем, которые не только соответствуют мировому уровню, но и часто превосходят их по отдельным характеристикам.

Траектория развития БРЭО ориентирована на создание высокоинтегрированных и интеллектуальных систем нового поколения. Процесс интеграции и автоматизации достигает качественно нового уровня с внедрением технологий искусственного интеллекта, машинного обучения и предиктивной аналитики, обеспечивающих автономное принятие решений в режиме реального времени.

Внедрение квантовых навигационных технологий открывает принципиально новые возможности для создания автономных систем позиционирования, превосходящих по точности традиционные GNSS в 50 раз. Квантовые инерциальные навигационные системы (Q-INS), основанные на использовании ультрахолодных атомов и конденсатов Бозе-Эйнштейна, демонстрируют полную независимость от спутниковых сигналов и устойчивость к глушению и подделке. Первые коммерческие испытания квантовых навигационных систем в авиации подтверждают их готовность к практическому применению в критически важных областях в качестве резервных или основных систем.

Экологические императивы формируют новые стандарты разработки БРЭО с фокусом на энергоэффективность и использование экологически чистых материалов. Современные требования предусматривают снижение энергопотребления более чем на 20% для новых систем, что особенно критично для электрических и гибридных воздушных судов. Интеграция интеллектуальных алгоритмов управления энергопотреблением на базе IoT и машинного обучения обеспечивает дополнительную экономию энергии до 15-20% за счет адаптивной оптимизации режимов работы оборудования.

Список литературы

1. Леньшин А.В., Тихомиров Н.М., Попов С.А. Бортовые радиоэлектронные системы. Основы построения // Вестник авиации. 2023. Т. 14, № 2. С. 54–68.
2. Кучерявый А.А. Авионика: учебное пособие. – М.: ЭБС Лань, 2024
3. Земляной Е.С. Основы разработки программного обеспечения бортового радиоэлектронного оборудования летательных аппаратов: учебное пособие. – М., 2022.
4. Гендин А.Я., Кузнецов В.А. «Авиационная электроника и электротехника». — М.: Радио и связь, 2020.
5. Дубровин Ю.Г. «Основы построения и функционирования авиационного бортового оборудования». — М.: Транспорт, 2019.
6. Земляной Е.С. «Основы разработки программного обеспечения авиационного бортового радиоэлектронного оборудования: Учебное пособие». — М., 2022.

References

1. Lenshin A.V., Tikhomirov N.M., Popov S.A. Onboard Radio-Electronic Systems. Design Basics // Aviation Bulletin. 2023. Vol. 14, No. 2. pp. 54–68.
2. Kucheryavy A.A. Avionics: A Tutorial. Moscow: EBS Lan, 2024
3. Zemlyany E.S. Fundamentals of Aircraft Onboard Radio-Electronic Equipment Software Development: A Tutorial. Moscow, 2022.
4. Gendin A. Ya., Kuznetsov V. A. "Aviation Electronics and Electrical Engineering". Moscow: Radio and Communications, 2020.
5. Dubrovin Yu. G. "Fundamentals of the Design and Operation of Aircraft Onboard Equipment". Moscow: Transport, 2019.
6. Zemlyany E. S. "Fundamentals of Software Development for Aircraft Onboard Radio-Electronic Equipment: A Tutorial". Moscow, 2022.