РАДИОНАВИГАЦИЯ
И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА
ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»
№ 19 (27) – 2025



АО «НПО Обуховский завод»

Редакционный совет:
Подвязников Михаил Львович, д.т.н., доц.
Волокитина Ирина Николаевна, к.э.н.
Долбенков Владимир Григорьевич, к.т.н.
Брагин Алексей Юрьевич, к.э.н., доц.
Король Виктор Михайлович, к.т.н.

Главный редактор
Баушев Сергей Валентинович, д.в.н., проф.
Заместитель главного редактора
Сайбель Алексей Геннадиевич, д.т.н., доц.
Технический редактор
Васильева Людмила Николаевна

Редакционная коллегия:
Гаврилов Роман Сергеевич, к.т.н.
Геворкян Арвид Грайрович, д.т.н., проф.
Завгородний Александр Федорович, д.и.н., проф.
Зозуля Виктор Михайлович, к.т.н.
Королев Андрей Валерьевич, к.т.н.
Криворучко Юрий Тимофеевич, д.т.н.
Макавеев Александр Тимофеевич, к.т.н.
Марченко Борис Иванович, д.т.н., проф.
Раскин Александр Владимирович, д.в.н.
Синицын Евгений Александрович, д.т.н., проф.
Федоров Дмитрий Александрович, к.т.н.
Фридман Леонид Борисович, д.т.н.
Шатраков Юрий Григорьевич, д.т.н., проф.
Щеглов Дмитрий Константинович, к.т.н., доц.
Яковлев Андрей Вячеславович, д.т.н.
Яковлев Виктор Тимофеевич, д.т.н.

Научно-технический журнал по вопросам разработки и производства инновационной продукции

Лицензионный договор
№ 285-1/2021 (НЭБ)

Журнал выходит
4 раза в год

Электронная версия доступна по адресу
noc.goz.ru/magazine



Адрес редакции:
192012,
г. Санкт-Петербург,
вн.тер.г. муниципальный округ Рыбацкое,
пр-кт Обуховской Обороны, д. 120.

E-mail:
noc.rnv@goz.ru
Тлф:
8 (812) 207-56-20

Санкт-Петербург

РАДИОНАВИГАЦИЯ И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ» №19 (27) – 2025: ТРУДЫ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА КОНЦЕРНА ВКО « АЛМАЗ – АНТЕЙ». – СПб.: Балтийская печать, 2025. – 120 с. – ил.

Научно-технический журнал **РАДИОНАВИГАЦИЯ И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»** публикует результаты научных исследований, разработок и производства инновационной продукции в областях организации производства, вооружения и военной техники, радиофизики, организации воздушного движения, радионавигации, радиолокации.

К участию приглашаются сотрудники предприятий оборонного промышленного комплекса, научных и образовательных учреждений Российской Федерации.

Мнение редакции может не совпадать с точкой зрения авторов. Ответственность за достоверность материалов лежит на авторах публикаций.

Отсутствие в статьях сведений, содержащих государственную тайну, подтверждается наличием соответствующих Заключений о возможности опубликования с предприятий.

Журнал рассчитан на широкий круг специалистов.

© АО «Обуховский завод», 2025



Уважаемый читатель!

Очередной номер нашего журнала открывает концептуальная статья «К вопросу о теории воздушно-космической обороны» сотрудников Военной академии Воздушно-космической обороны имени Г.К.Жукова *доктора военных наук профессора Подгорных Ю.Д. и Дыбова В.Н.*

В настоящее время, благодаря усилиям многих ученых, специалистов-практиков различных ведомств, участвующих в разработке, создании и боевом применении сил и средств, решающих задачи воздушно-космической обороны (ВКО), разработаны основы теории ВКО как системы взглядов, суждений, положений, позволяющих адекватно оценивать факты, анализировать происходящие процессы, выявлять тенденции их развития, прежде всего, геополитическую и геостратегическую обстановку, прогнозировать развитие СВКН противника и способы их боевого применения. Вместе с тем, целенаправленная работа по совершенствованию теоретической и научно-методической основ теории ВКО продолжается, подтверждением чему служит и настоящая статья.

Тему разработки и эксплуатации средств ВКО и ПВО продолжает статья сотрудников АО «НПО «Обуховский завод», входящего в состав Концерна ВКО «Алмаз – Антей», *Васильева А.В. и кандидатов технических наук доцента Щеглова Д.К., Фёдорова Д.А., Макавеева А.Т.* «Развитие и модернизация российских средств противовоздушной и воздушно-космической обороны: взгляд сквозь десятилетия». Статья посвящена послевоенному развитию и применению систем противовоздушной и воздушно-космической обороны. Проводится системный анализ процесса создания четырех поколений комплексов и систем для борьбы с воздушными средствами нападения потенциального противника. Кратко описаны зенитные ракетные системы Войск ПВО страны, зенитные ракетные комплексы Сухопутных войск, системы противоракетной обороны Москвы и Московского административно-промышленного района. Богатый фактографический и иллюстративный материал позволяет наглядно проследить развитие указанной тематики и роль сотрудников Конструкторского бюро специального машиностроения, ныне входящего в состав АО «НПО «Обуховский завод».

Кандидат технических наук Король В.М. и доктор технических наук Яковлев В.Т. (АО «НПО «Обуховский завод») представили свое видение перспективной модульной информационно-посадочной системы в материале «Радиотехническое обеспечение посадки летательных аппаратов». Предназначение научных результатов состоит в повышении точности определения координат воздушных судов, безотказности посадки и пропускной способности аэродромов различной категории. Особый упор делается на мобильность и литерность систем посадки, что позволит сократить затраты на ее серийное производство и эксплуатацию, что, в свою очередь, позволит оборудовать системами посадки небольшие аэродромы и посадочные площадки с малым и разовым использованием, что в ближайшее время станет крайне актуальным при увеличении трафика грузовых перевозок с помощью БПЛА средней весовой категории.

Кандидат технических наук Таричко В.И. (АО «НПО «Обуховский завод») в статье «Модульная архитектура конструкции специальных колёсных шасси и тягачей: системный анализ, разработка и организация производства» представил комплексный системный анализ эволюции, текущего состояния и стратегических перспектив модульной архитектуры в проектировании и производстве специальных колёсных шасси и тягачей. Проведённый ретроспективный анализ выявил закономерный переход от специализированных моноблочных конструкций к унифицированным платформам двойного назначения и, далее, к открытым модульным системам с функциональной адаптивностью. Организация производства эволюционирует в сторону сетевой модели с головным интегратором, что требует развития компетенций системной инженерии, управления цепочками поставок и цифровой интеграции. Тесная конвергенция модульной архитектуры с технологиями цифровых двойников, гибридных силовых установок и автономности формирует образ будущего поколения специальных колесных шасси и тягачей: гибкой, адаптивной технической системы, способной эволюционировать быстрее, чем меняется оперативная обстановка.

Статья «Исследование особенностей алгоритмов управления малым космическим аппаратом, подвешенным на магнитном подвесе» аспирантов Государственного университета авиакосмического приборостроения *Федоринова А.Ю. и Епринцева М.А.,* выполненная под руководством *доктора технических наук профессора Марченко Б.И.,* исследует особенности управления микро космическим аппаратом через экспериментальные испытания систем стабилизации и ориентации макета космического аппарата на лабораторном магнитном подвесе. Выявлены четыре основных преимущества магнитного подвеса по сравнению с подвешиванием на нити: отсутствует остаточное натяжение закручиваемой нити; отсутствие влияния на двигательную установку модуля ориентации; существующие вокруг постоянных магнитов магнитные поля несущественно влияют на показания магнитометра и могут быть учтены при калибровке систем перед испытаниями; наличие возможности разгрузить элементы подвеса от паразитных сил, в частности от моментов трения. В качестве дальнейшего развития исследований предлагается провести теоретический расчёт «сопротивления» подвеса на магнитах и подшипниках.

Одним из перспективных направлений функционального подавления беспилотных летательных аппаратов является воздействие на них мощным электромагнитным импульсом, а, следовательно, в концепции дуального развития «щита и меча», средств противодействия такому виду борьбы с БПЛА. В работе *адъюнкта научно-исследовательского центра Военной ордена Жукова академии войск национальной*

гвардии Российской Федерации Терешина С.Н. и его руководителя доктора технических наук Андрющенко М.С. «Способ защиты беспилотного летательного аппарата коптерного типа от узконаправленного сверхширокополосного импульсного электромагнитного излучения и устройство для его реализации» предлагается способ, основанный на автоматическом обнаружении угрозы посредством многоканального анализа сигналов. Сущность подхода заключается в мониторинге электромагнитной обстановки вокруг БПЛА с помощью бортовых сенсоров и последующем адаптивном перепланировании полетного задания для обхода источников излучения или возврата к месту вылета.

В статье *доктора технических наук Яковлева В.Т. и его ученицы Плехановой Л.А.* (АО «НПО «Обуховский завод») «Влияние шумов на квантование сигналов в аналого-цифровом преобразователе» осуществляется анализ влияния указанного типа шумов на качество работы радиолокатора, оснащенного малоразрядным АЦП (8-10 разрядов), что обусловлено требованием обрабатывать радиосигналы как больших, так и малых мощностей. На основе анализа ситуации предлагается подход намеренного использования привносимых шумов, которые, в совокупности с основным сигналом, позволяют преодолеть пороговое значение преобразователя, а за счет накопления сигналов – минимизировать ошибку выходного результата. Предлагаемый подход имеет общие черты с существующим методом предискажений в системах передачи информации.

Завершающие диссертационные исследования представлены в статье *аспиранта БГТУ «Военмех» Русиной А.А.* в статье «Управление рисками внедрения электронного контента в информационно-измерительные системы аэрогеофизического назначения» – предлагается комплексный метод управления рисками специфического характера в ходе внедрения в информационное обеспечение автоматизированных систем новых руководящих документов. Описана модель итеративной оценки рисков с применением нечетких множеств и лингвистических переменных, позволяющая иерархически структурировать риск-показатели и алгоритмы хеджирования и локализации рисков, основанные на использовании баз визуальных программных компонент.

Первые шаги в научной публицистической деятельности делают *аспиранты Лобовко К.В. и Серова Е.А.* (АО «НПО «Обуховский завод») с обзором «Текущее состояние и перспективы развития квантовых стандартов частоты космического применения», в котором приведены некоторые сведения об используемых на борту глобальных навигационных спутниковых систем квантовых стандартов частоты отечественных и зарубежных производителей.

В традиционной рубрике «Дискуссионная трибуна» профессора Научно-образовательного центра АО «НПО «Обуховский завод» доктора технических наук Геворкян А.Г. и Сайбель А.Г. рассматривают варианты формирования пространственно локальных сигналов в радио- и гравитационных системах связи, имеющих существенное отличие от традиционных решений, широко используемых в системах передачи информации. Предложенный в их статье «Интерферометрический синтез локальных сигналов» подход может стать новым направлением исследований, направленных на преодоление известных в электросвязи ограничений.

Доктор военных наук, профессор
С.В.Баушев

Содержание

Подгорных Ю.Д., Дыбов В.Н.
К вопросу о теории воздушно-космической обороны 7
Васильев А.В., Щеглов Д.К., Макавеев А.Т.
Ретроспективный анализ развития и применения отечественных средств противовоздушной и воздушно-космической обороны 17
Король В.М., Яковлев В.Т.
Радиотехническое обеспечение посадки летательных аппаратов 41
Таричко В.И.
Модульная архитектура конструкции специальных колёсных шасси и тягачей: системный анализ, разработка и организация производства 47
Федоринов А.Ю., Марченко Б.И., Епринцев М.А.
Исследование особенностей алгоритмов управления малым космическим аппаратом, подвешенным на магнитном подвесе 57
Терешин С.Н., Андрющенко М.С.
Способ защиты беспилотного летательного аппарата коптерного типа от узконаправленного сверхширокополосного импульсного электромагнитного излучения и устройство для его реализации 70

Статьи аспирантов и соискателей
Плеханова Л.А, Яковлев В.Т.
Влияние шумов на квантование сигналов в аналого-цифровом преобразователе 78
Мурсалов Д.Л., Нестерович А.В., Плеханова Л.А., Яковлев В.Т.
Расчет потенциальной точности измерения задержки дискретизированных сигналов произвольной формы 84
Лобовко К.В., Серова Е.А.
Текущее состояние и перспективы развития квантовых стандартов частоты космического применения 96

Дискуссионная трибуна
Геворкян А.Г., Сайбель А.Г.
Интерферометрический синтез локальных сигналов 109

УДК 355.48

К ВОПРОСУ О ТЕОРИИ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОБОРОНЫ

Подгорных Ю.Д., Дыбов В.Н.

На основе уточнения основных компонентов теории и анализа их содержания применительно к воздушно-космической обороне делается вывод о состоянии разработки основ теории воздушно-космической обороны.

Ключевые слова: теория; теория воздушно-космической обороны; компоненты теории воздушно-космической обороны; воздушно-космическая оборона; система воздушно-космической обороны.

К началу XXI века человечество накопило огромную совокупность знаний об окружающем мире. Большинство этих знаний, особенно в математике, физике, химии, медицине и многих других отраслях оформлено в строгую и однозначную терминологию (*понятийный аппарат*). Без этого не может развиваться никакая наука, теория. Общепринятый, обоснованный понятийный аппарат – это своего рода кирпичики, из которых строится здание. Если кирпичики не ровные, то и здание будет кривым. В науке общепризнано – прежде чем говорить о чем-либо, необходимо определиться с понятиями [1].

В нашем случае основными понятиями являются «теория» и «теория воздушно-космической обороны (ВКО)». С ними, прежде всего, и определимся.

Из существующей совокупности определений понятия «теория» выделим следующее: теория – упорядоченная и обоснованная система взглядов, суждений, положений, позволяющая адекватно объяснять факторы, анализировать процессы, прогнозировать и регулировать их развитие; уровень познания, на котором обобщаются и систематизируются знания о предмете исследования и формируются понятия, концепции. [1]

В структуре теории различные авторы выделяют различные основополагающие компоненты. Так доктор исторических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ В.А. Манохин в работе «Нищета терминологии и логические основы понятийного аппарата» [2] отмечает, что «теория включает в себя:

- исходную эмпирическую основу (множество зарегистрированных фактов в данной области);
- исходную теоретическую базу (совокупность гипотез, методов, методик, приемов, посредством которых изучается объект);
- правила логического вывода и доказательства, допустимые в рамках теории;
- законы и принципы разной степени общности, которые выражают существенные, устойчивые, повторяющиеся, необходимые связи между явлениями, охватываемые данной теорией;
- понятия и категории данной теории (терминологию);

- взаимосвязи теоретического и эмпирического уровней исследования;

- эмпирические знания в теории всегда нагружены, а теоретические знания эмпирически проверены».

И далее «структура любой теории предполагает наличие, как минимум пяти ключевых компонентов: собственная научная терминология (понятия, в том числе категории), свои законы, принципы, вытекающие из законов и подходов, объекты теории, предмет науки».

Не вдаваясь в глубокий анализ приведенных рассуждений автора-борца за чистоту и логичность терминологии обратим внимание только на явное противоречие в рассуждениях: в структуре теории выделяются семь наименований: исходная эмпирическая основа, исходная теоретическая база, правила логического вывода и доказательства и т.п., а затем утверждается, что структура любой теории предполагает наличие как минимум пяти компонентов.

Большая советская энциклопедия [2] в структуре теории выделяет следующие компоненты:

- исходную эмпирическую основу, которая включает множество зафиксированных в этой области знаний (предметной области) фактов, достигнутых в ходе практической деятельности и экспериментов, и требующих теоретического обоснования;

- исходную теоретическую основу, которая включает понятийный аппарат, множество требований, принципов, постулатов, аксиом, закономерностей и законов;

- научно-методическую основу – различные отдельные расчетные задачи по определению выбранных (обоснованных) характеристик, показателей и критериев эффективности исследуемых явлений (процессов);

- частные методики обоснования (оценки) предложений и решений, разрабатываемых мероприятий, способов, направленных на совершенствование исследуемых явлений (процессов); обобщенный научно-методический аппарат, позволяющий осуществлять их моделирование (рисунок 1).

По мнению авторов, приведенная структура несет четко выраженную смысловую нагрузку и создает дополнительный пласт информации, который способствует пониманию принятого определения общего понятия «теория».

Данной структуры в дальнейшем будут придерживаться и авторы. При этом отметим, что развитие и функционирование в науке осуществляется в органическом единстве с эмпирическим исследованием и теория выступает как реальное знание о мире только тогда, когда получает эмпирическую интерпретацию.

Очевидно это в полной мере можно отнести и к теории ВКО (рисунок 1).

Опираясь на приведенный рисунок проведем историко-ретроспективный анализ того, что же разработано к настоящему времени в теории ВКО.

Эмпирическая основа. Важнейшие положения эмпирической основы теории ВКО, надо полагать, были заложены в первой Концепции ВКО РФ на период до 2016 года и дальнейшую перспективу, утвержденной Президентом РФ в апреле 2006 года. Но уже задолго до её утверждения усилиями многих ученых и прежде всего ученых Военной академии Воздушно-космической обороны (ВА ВКО) имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова были исследованы вопросы эмпирической основы теории ВКО (рисунок 1) и вскрыты основные факторы, определяющие необходимость создания ВКО страны.



Рисунок 1 – Содержание основных компонентов теории ВКО

Одним из важнейших факторов являлось создание и совершенствование оружия на различных физических принципах, создающего не только угрозу военной безопасности России, но и дестабилизирующего общую обстановку в мире (рисунок 2).

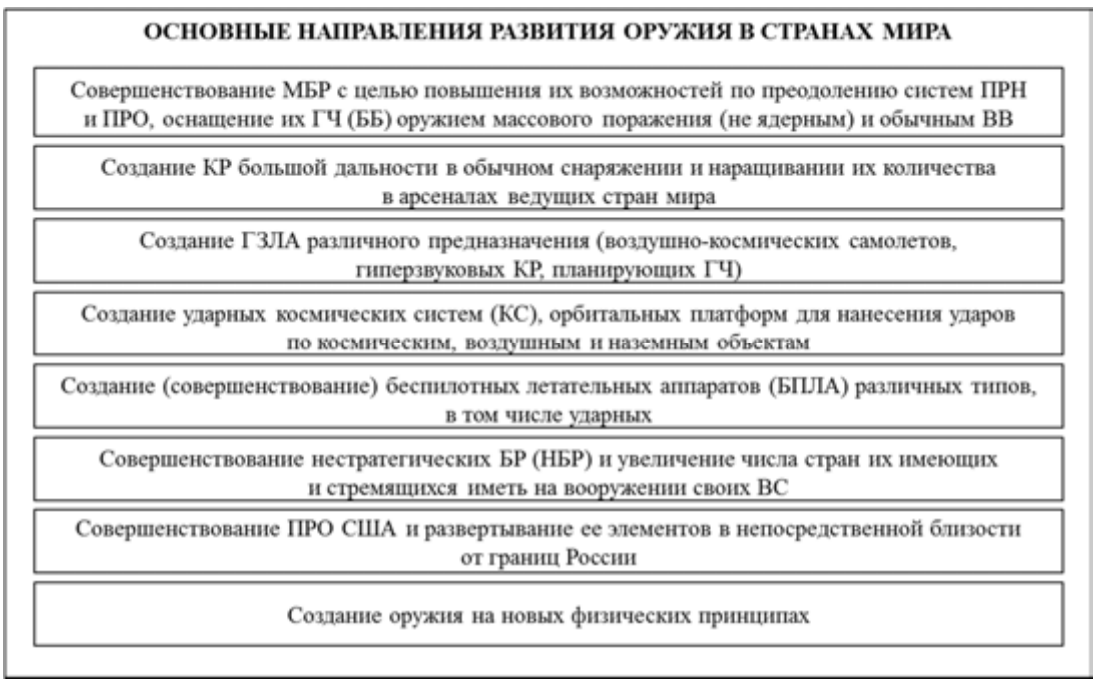


Рисунок 2 – Основные направления создания и совершенствования оружия в странах мира

Анализ приведенных направлений позволяет сделать вывод о том, что основные военные угрозы военной безопасности нашей страны исходят из воздушно-космического пространства.

Военным ученым и практикам стало окончательно ясно, что ход и исход воен-

ных действий в современной геополитической и геостратегической обстановке в значительной степени определяются успешными действиями в воздушно-космическом пространстве. Об этом убедительно свидетельствуют результаты различных командно-штабных исследовательских учений (КШИУ) и опыт военных конфликтов второй половины XX и начала XXI века. В этих условиях проблема создания надежной системы ВКО, способной парировать угрозы из воздушно-космического пространства, в настоящее время становится очень и очень актуальной. Она, по словам доктора военных наук генерал-полковника Чельцова Б.Ф., является одной из основных стратегических составляющих национальной безопасности страны и её роль постоянно возрастает, а её создание является государственной задачей, по своей значимости и сложности сопоставимой с созданием в 40-х годах прошлого столетия ядерного оружия.

Вопросы, относящиеся к эмпирической основе теории ВКО, такие как угрозы национальной и военной безопасности РФ, особенности современного этапа противоборства с силами и средствами противника, роль и место ВКО в обеспечении сдерживания агрессии и другие всесторонне исследованы в том числе в НИР, проводимых в ВА ВКО имени Маршала Советского Союза Г.К.Жукова и монографиях, разработанных представителями этой академии: «Угрозы национальной безопасности России» (2014 г.), «Военные угрозы безопасности России и её союзникам» (2015 г.), «Военно-методическое сопровождение боевого применения войск (сил), решающих задачи ВКО» (2017 г.), «Устойчивость воздушно-космической обороны» (2018 г.), в военно-теоретических трудах «Воздушно-космическая оборона Российской Федерации, современность и перспектива» (2022 г.), «Размышления о разном» (часть 1, 2022 г.).

Таким образом, можно утверждать, что эмпирическая основа теории ВКО в настоящее время существует и существует на вполне современной основе, которая постоянно дополняется и совершенствуется с учетом тенденций, которые проявляются в военной науке и вооруженной борьбе.

Теоретическая основа. Своеобразным показателем развития собственно теоретического исследования, обогащения концептуального аппарата теории и обоснования относительно самостоятельного слоя её теоретического содержания является уровень осмысления научным мышлением своего понятийного аппарата. Следовательно, чтобы теория ВКО стала действительно мощным средством решения фундаментальных задач научно-теоретического мышления в данной предметной области, познания сущности явлений действительности, необходимо определиться, в первую очередь, с понятийным аппаратом. Вместе с тем, в настоящее время ещё можно выделить в материалах как МО РФ, так и оборонно-промышленного комплекса (ОПК) различные определения понятий «ВКО», «система ВКО». Здесь очевидно сказывается и отставание от современного научно-технологического прорыва существующей парадигмы.

Так, в указанной выше «Концепции ВКО», ВКО определялась как составная часть обороны страны, представляющая собой «…систему политических, экономических, военных, военно-технических, правовых и иных мер по подготовке и ведению военных действий в воздушно-космическом пространстве. Основу воздушно-космической обороны составляют комплекс общегосударственных и военных мероприятий, а также боевых действий разновидовых (разнородных) группировок войск (сил), проводимых в общей системе вооруженной борьбы под единым руководством, по единому замыслу и плану в целях защиты Российской Федерации и её союзников

от нападения с воздуха и космоса». При этом в Концепции излагались только предполагаемые общегосударственные и военные мероприятия в области ВКО. Система политических, экономических, военных, военно-технических, правовых и иных мер не раскрывалась.

В проекте Федерального закона «О воздушно-космической обороне Российской Федерации», который в начале 2000-х годов обсуждался в Комитете по обороне Государственной Думы РФ (раздел 1 «Термины и определения») ВКО определялась как «…комплекс политических, организационных, правовых, экономических, научно-технических, военных и иных мер по обеспечению отражения воздушно-космического нападения на Российскую Федерацию, а также парированию угроз национальной безопасности государства в воздушно-космической сфере». Правда уже в разделе II «Основы воздушно-космической обороны» ВКО представлялась как система перечисленных выше мер «…по подготовке и ведению военных действий в воздушно-космическом пространстве». При этом проект названного закона раскрывал только общегосударственные и военные мероприятия, по сути повторял Концепцию. Можно встретить еще одно определение понятия «ВКО», которое принадлежит ВА ГШ ВС РФ: «ВКО – комплекс общегосударственных и военных мероприятий, боевого применения войск (сил), способных вести борьбу со средствами воздушно-космического нападения противника по единому замыслу и плану, под единым руководством в интересах предупреждения государственного и военного руководства, войск (сил) о воздушно-космическом нападении противника, снижения потерь и ущерба населению, экономическим и другим объектам, группировкам ВС от ударов с воздуха, из космоса и через космос.

Одновременно в Словаре оперативно-стратегических терминов ВАГШ ВС РФ ВКО определяется как «вид обороны, применяемый с целью защиты государства (коалиции) и его (их) ВС от ударов и других агрессивных действий воздушно-космических сил и средств противника. ВКО представляет собой систему политических, экономических, военных, военно-технических, правовых и иных мер по подготовке и ведению военных действий в воздушно-космическом пространстве».

Представители военно-научного комплекса МО РФ и ОПК определяли ВКО как комплекс общегосударственных и военных мероприятий, а также боевое применение войск (сил), способных вести борьбу со средствами воздушно-космического нападения.

Многообразие определений одного из основных понятий теоретических основ теории ВКО – «ВКО» конечно требует уточнения, что же такое оборона вообще и ВКО, в частности.

Из классики военного искусства следует, что оборона – вид военных (боевых) действий войск (сил), основанный на защитных действиях ВС, войск (сил). Применяется, как правило, в неблагоприятно складывающейся обстановке для срыва или отражения наступления (ударов) численно превосходящего противника, удержания важных районов, рубежей и объектов на своей территории, уничтожения сил и средств противника, выигрыша времени и с другими целями. Классификация видов обороны приведена на рисунке 3.

Обычно наряду с отражением ударов противника оборона включает в себя и элементы наступательных действий – нанесение упреждающих, встречных и ответ-

ных ударов, проведение контрударов и контратак, поражение атакующего противника в местах (районах) его базирования, развертывания или на исходных рубежах. Из анализа опыта проведения СВО на Украине следует, что возможны при обороне и т.н. удары возмездия. Опыт многих войн показывает, что только активная оборона может рассчитывать на успех.



Рисунок 3 – Классификация видов обороны

Известно, что разновидностями обороны являются противовоздушная, противоракетная, противодесантная, противотанковая и другие виды. Учитывая современную обстановку, кроме традиционных (если можно так сказать) разновидностей обороны, появилась и воздушно-космическая оборона (ВКО).

Следовательно, можно предположить, что в общем понятии «воздушно-космическая оборона» основная смысловая нагрузка ложится все-таки на понятие «оборона», а впереди идущее понятие «воздушно-космическая» подчеркивает, против какого противника осуществляется (организуется) оборона.

Анализируя далее приведённые выше определения понятия «ВКО», надо отметить, что оборона является одной из важнейших функций государства. При этом под функцией понимается направление деятельности государства в соответствии с его предназначением. Тогда оборону можно рассматривать как систему политических, военных, социальных, правовых, экономических и иных мер государства по недопущению безнаказанного на него нападения со стороны другого государства (любого агрессора), обеспечению защиты государства от вооруженной агрессии, а также по её непосредственному отражению, ведению войны, защите населения и территории.

Задача обеспечения обороны государства возлагается на ВС и ОПК. В соответствии с Конституцией государство имеет правовые основания на использование всего арсенала средств вплоть до применения вооруженной силы для защиты при возникновении опасности. Более того, Конституция страны не ограничивает территории, на которой эта защита должна быть осуществлена.

Реализуя комплекс (или систему) мер по обеспечению своей обороны, государство должно учитывать геополитическую и геостратегическую обстановку и весь спектр военных угроз, который существует на данный момент и в перспективе. Именно правильное определение военных угроз национальной безопасности позволит

вырабатывать обоснованную военно-техническую политику государства, определять необходимый облик ВС, формировать государственные программы вооружения.

При этом меры, предпринимаемые государством для обеспечения своей обороны, будут сходными для различных разновидностей обороны. К примеру: поддержание на должном уровне необходимого научно-технического, технологического, промышленного и кадрового потенциала, рациональное использование и развитие имеющихся, а также создание при необходимости новых производственных мощностей промышленных предприятий для поставок ВС вооружения, военной и специальной техники, снижения эксплуатационных расходов за счет внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий, передовых средств и методов технического обслуживания и других. Отличными могут быть только специфические меры, непосредственно составляющие основу ВКО или других видов обороны.

Исходя из вышеизложенного, авторы предлагают под ***воздушно-космической обороной (ВКО)*** понимать вид обороны, применяемый с целью защиты государства (коалиции) и его (их) Вооруженных сил от ударов и других агрессивных действий воздушно-космических сил и средств противника.

ВКО должна быть стратегической, оперативной, тактической, продолжительной, активной, преднамеренной и маневренной (рисунок 3).

Учитывая, что в состав СВКН противника входят аэродинамические средства (СА, ТА, АА (ПА), БпЛА и др.), ракеты различных типов (МБР, БРПЛ, НБР, СКР, ОТР и др.), средства, которые относят к гиперзвуковым летательным аппаратам, – ГЗКР, ПБЧ, гиперзвуковые самолеты и КА, в первую очередь ударные, ВКО должна быть противосамолетной, противоракетной и противокосмической.

Для того чтобы осуществить подготовку данного вида военных (боевых) действий разноведомственных разновидовых войск (сил), а в последующем добиться требуемой эффективности по защите критически важных государственных, хозяйственных, военных объектов, транспортных коммуникаций, группировок войск, населения от поражения с воздуха, из космоса и через космос, необходимо осуществить комплекс оперативно-стратегических, инженерно-технических, специальных и других мероприятий, которые должны быть предусмотрены общим планом обороны государства.

Еще одной важной научной категорией теоретических основ теории ВКО является понятие «система ВКО», которое по мнению авторов также требует уточнения. Опираясь на одно из классических определений понятия «вооруженная система» – «совокупность комплексов вооружения, находящаяся на оснащении ВС, видов и родов войск (сил флота), предназначенная для выполнения свойственных им стратегических, оперативных и боевых задач, включая одну из важнейших задач мирного времени – сдерживание агрессии» [4], авторы предлагают под системой ВКО понимать совокупность комплексов вооружения, функционирующих на различных физических принципах, размещенных в различных сферах (на земле, в воздухе, космосе), объединенных единой автоматизированной системой боевого управления и решающих задачи ВКО.

Такие вопросы теоретической основы теории ВКО как требования к ВКО, принципы построения и боевого применения сил и средств, решающих задачи ВКО, формы и способы решения этих задач, закономерности и законы ВКО определены и

всесторонне исследованы в многочисленных НИР различного уровня, военно-методических и военно-теоретических трудах, монографиях и диссертационных работах. Авторы не называют их только исходя из режимных соображений.

Таким образом, можно утверждать, что теоретическая основа теории ВКО, равно как и её эмпирическая основа, к настоящему времени в основном разработана на высоком научно-методическом уровне. И более того она постоянно уточняется и совершенствуется с учетом тех новых тенденций и факторов, которые выявляются в военной науке и вооруженной борьбе. Отметим, что значительный вклад в развитие теоретических основ теории ВКО вносят ученые ВА ВКО имени Маршала Советского Союза Г.К.Жукова.

Научно-методическая основа теории ВКО включает в настоящее время огромный пласт различных расчетных задач, позволяющих количественно оценивать параметры (характеристики) обстановки (противника, своих войск, условий боевого применения, воинских формирований, решающих задачи ВКО), необходимые для принятия обоснованных решений различных уровне и комплексных моделей, позволяющих оценивать живучесть и устойчивость как отдельных комплексов вооружения, так и системы ВКО в целом, а также её эффективность в различных условиях обстановки.

Научно-методическая основа теории ВКО создана и постоянно совершенствуется различными организациями военно-научного комплекса, ОПК, силами воинских формирований, решающих задачи ВКО. При этом каждый разработчик, отстаивая свои авторские права, как правило практически не делится бескорыстно с «собратьями по оружию» своими достижениями в разработке элементов научно-методической основы теории ВКО. Возникают некоторые разногласия в проводимых оценках, их объективности и точностных характеристиках. Это в конечном итоге может привести к разночтению окончательных выводов при исследовании различных процессов, что совершенно нежелательно. Этот недостаток может быть устранен установлением более тесного взаимодействия между военным образованием, военной наукой и войсковой практикой. Возможные пути решения данной проблемы исследованы в монографии, изданной в ВА ВКО имени Маршала Советского Союза Г.К.Жукова в 2014 году [5].

В заключении отметим, что всё изложенное в совокупности позволяет сделать следующие выводы.

В настоящее время, благодаря усилиям многих ученых, специалистов-практиков различных ведомств, участвующих в разработке, создании и боевом применении сил и средств, решающих задачи ВКО, основы теории ВКО разработаны. Этот вывод подтверждается тем, что существует упорядоченная и обоснованная система взглядов, суждений, положений, позволяющая адекватно оценивать факты, анализировать происходящие процессы, выявлять тенденции их развития, прежде всего, геополитическую и геостратегическую обстановку, прогнозировать развитие СВКН противника и способы их боевого применения.

Продолжается целенаправленная работа по совершенствованию теоретической и научно-методической основ теории ВКО. Это подтверждается тем, что в ходе научно-практических конференций, семинаров, проводимых на различных площадках, научно-исследовательских и военно-научных работ уточняются используемые науч-

ные категории, требования, принципы построения системы ВКО и её роль в осуществлении сдерживания противника от агрессии, а также постоянно совершенствуется и дополняется комплекс расчетных задач и моделей, которые проявляются в науке и вооруженной борьбе. Одновременно просматривается явная тенденция на достижение однозначного понимания и трактовки как основных компонентов теории ВКО, так и их содержания. Значительный вклад при этом вносят ученые ВА ВКО имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова.

Литература

1 Загвазинский В.И., Замирова А.Ф., Ситронова Т.А. Педагогический словарь. М.: Академия, 2008. 343 с.

2 Махонин В.А. Нищета терминологии и логические основы понятийного аппарата. М.: Проспект, 2022. 397 с.

3 Большая советская энциклопедия, т. 25. Изд. 3. М.: Советская энциклопедия, 1976. 600 с. С. 434-436.

4 Война и мир в терминах и определениях / Под редакцией Д. Рогозина. М.: По Рог, 2004. С. 247.

5 О проблемах высшей школы. Тверь: ВА ВКО имени Маршала Советского Союза Г.К.Жукова. 2004. 375 с.

Подгорных Юрий Дмитриевич – доктор военных наук, профессор, старший научный сотрудник, ФГК ВОУ ВО «Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова», г.Тверь.
Область научных интересов: системотехнические основы построения систем (комплексов) ВКО.
E-mail: dvn.tver@gmail.com

Дыбов Валентин Николаевич – старший научный сотрудник, ФГК ВОУ ВО «Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г.К.Жукова», г.Тверь.
Область научных интересов: системотехнические основы построения систем (комплексов) ВКО.
E-mail: dvn.tver@gmail.com

Почтовый адрес: 170100, г. Тверь, ул. Жигарева, д. 50.

ON THE ISSUE OF THE THEORY OF AEROSPACE DEFENSE

Based on the clarification of the main components of the theory and the analysis of their content in relation to air and space defense, he concludes about the state of development of the theory of air and space defense.

Keywords: theory, theory of air and space defense, component theory of air and space defense, sistema of air and space defense.

Podgornich Ury Dmitrievich – doctor of military Science, professor, Senior Staff Scientist of the Military Academy of Aerospace Defense research center, Tver.
Research interests: systems engineering principles for constructing aerospace defense systems (complexes).

Dybov Valentin Nikolaevich – Senior Staff Scientist of the Military Academy of Aerospace Defense research center, Tver.
Research interests: systems engineering principles for constructing aerospace defense systems (complexes).

УДК 623.419

РАЗВИТИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ РОССИЙСКИХ СРЕДСТВ ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ И ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОБОРОНЫ: ВЗГЛЯД СКВОЗЬ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Васильев А.В., Щеглов Д.К., Фёдоров Д.А., Макавеев А.Т.

Статья посвящена послевоенному развитию и применению систем противовоздушной и воздушно-космической обороны. Приведена информация о создании систем четырех поколений для борьбы с воздушными средствами нападения потенциального противника. Представлены зенитные ракетные системы Войск ПВО страны, зенитные ракетные комплексы Сухопутных войск, системы противоракетной обороны Москвы и Московского административно-промышленного района.

Ключевые слова: Противовоздушная оборона; воздушно-космическая оборона; зенитная ракетная система; зенитный ракетный комплекс; зенитная управляемая ракета; пусковая установка.

Введение

Обеспечение противовоздушной обороны (ПВО) является одной из ключевых задач безопасности государства. Для защиты страны необходим комплекс мероприятий и боевых действий по отражению воздушных ударов противника и прикрытию войск и объектов тыла. С этой целью создаётся система ПВО – совокупность сил и средств, действующих по единому плану.

Цель ПВО заключается в надёжном прикрытии важнейших группировок войск и объектов тыла, а также в отражении внезапных воздушных нападений. Для её достижения решаются задачи разведки воздушного противника, своевременного оповещения о налётах, отражения ударов, прикрытия войск и объектов во всех видах боевых действий и уничтожения воздушных десантов.

Эффективность ПВО определяется превосходством её боевых возможностей над средствами воздушного нападения противника, уровнем взаимодействия подразделений и подготовкой личного состава.

Далее рассматривается история развития зенитных ракетных систем четырёх поколений, систем противоракетной обороны (ПРО) и формирования системы воздушно-космической обороны (ВКО).

1 Создание и развитие стационарных и перевозимых систем противовоздушной обороны страны

1.1 Зенитная ракетная система С-25 «Беркут»

В июле 1946 г. Высший военный совет СССР принял решение о развертывании ПВО на всей территории страны, включая районы, где она отсутствовала в годы войны. Был разработан план усиления ПВО в Поволжье, на Урале, в Сибири и Средней Азии. Территория СССР была разделена на приграничную зону, ответственность за

которую несли военные округа, и внутреннюю территорию, охраняемую Войсками ПВО страны.

9 августа 1950 г. было принято секретное постановление Совета Министров СССР о создании ракетной системы ПВО с радиолокационным управлением. Руководство работами было возложено на Третье главное управление при Совете Министров СССР. Следует отметить, что в области создания зенитных ракетных средств СССР опередил США [1].

Первой зенитной ракетной системой стала С-25 «Беркут», предназначенная для защиты Москвы и Московского промышленного района как важнейшей цели для средств воздушного нападения США [2]. Разработка была поручена КБ-1 (впоследствии – «Алмаз»). Первоначально главными конструкторами комплекса являлись С.Л. Берия и П.Н. Куксенко, а с 1953 г. – А.А. Расплетин, впоследствии академик АН СССР и основоположник вооружения Войск ПВО страны (рисунок 1).

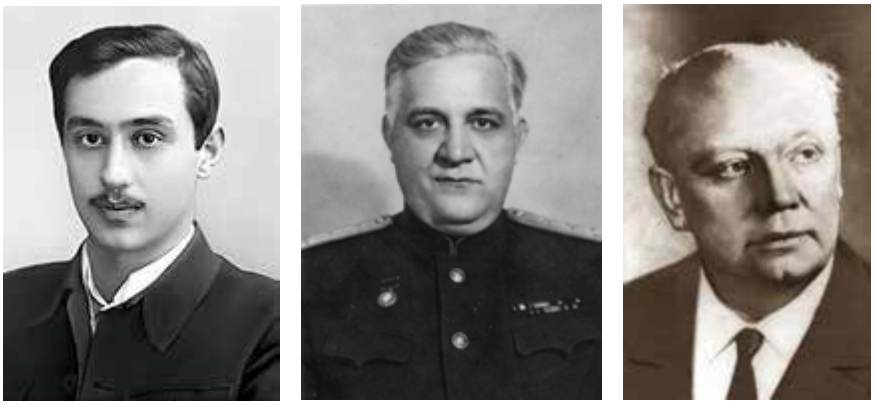


Рисунок 1 – Главные конструкторы системы С-25: С.Л. Берия [3], П.Н. Куксенко [4], А.А. Расплетин [5]

Разработка принципиально нового вооружения потребовала создания новой элементной базы и технологий производства, что привело к переходу ряда отраслей промышленности на более высокий технологический уровень и стало одним из факторов научно-технической революции. Одновременно была организована подготовка офицерских кадров для войск ПВО в ряде высших военных учебных заведений.

В мае 1955 года, всего через четыре года после начала разработки, система С-25 «Беркут» (рисунок 2) была принята на вооружение и поставлена на боевое дежурство.

Первоначально система включала:

- 22 радиолокационные станции дальнего обнаружения А-100, размещённые двумя кольцами вокруг Москвы;

- 56 зенитных ракетных комплексов, каждый из которых состоял из радиолокатора наведения Б-200 и зенитных управляемых ракет вертикального старта В-300 разработки СКБ Лавочкина;

- технические базы и командные пункты управления.

В разработке радиолокационных станций принимал участие В.П. Ефремов (рисунок 3), сотрудник НИИ-20 (ныне – НИИЭМ). Зенитная управляемая ракета В-300 была создана в КБ под руководством С.А. Лавочкина (рисунок 4).




Рисунок 2 – Элементы ЗРС С-25: ЗУР В-300 [6] и пусковой стол СМ-82 [7]



Рисунок 3 – В.П. Ефремов [8]



Рисунок 4 – С.А. Лавочкин [9]

Самолёт Ла-7 конструкции С.А. Лавочкина считается одним из лучших советских истребителей Второй мировой войны. Во второй половине 1950-х гг. в ОКБ-301 под его руководством велась разработка ЗРС «Даль» с ЗУР 5В21. Из-за сложностей испытаний и смерти С.А. Лавочкина в 1960 г. работы по системе были прекращены. Однако в течение последующих почти десяти лет ракеты 5В11 использовались для дезинформации зарубежных разведывательных служб: их макеты регулярно демонстрировались на военных парадах в Москве и Ленинграде как «высокоскоростные беспилотные перехватчики воздушно-космических целей» [10].

Для 1950-х гг. система С-25 являлась наиболее совершенной в мире и обеспечивала поражение целей на высотах 5–20 км, со скоростью до 1500 км/ч и на дальности до 35 км, с одновременным сопровождением до 20 целей. Срок хранения ракеты на пусковой установке достигал шести месяцев. Система С-25 надёжно защищала воздушное пространство столицы на протяжении трёх десятилетий, последовательно модернизируясь. Максимальное развёртывание системы составляло 3360 пусковых установок (1958 г.) [2].

1.2 Зенитная ракетная система С-75 «Двина»

Несмотря на высокую эффективность, система С-25 отличалась крайне высокой стоимостью и низкой мобильностью, что ограничивало её применение прикрытием лишь особо важных объектов. Масштабное развёртывание подобной системы на всей территории страны, включая Ленинград, оказалось экономически нецелесообразным.

В связи с этим 20 ноября 1953 г. было принято постановление Совета Мини-

стров СССР о создании передвижной зенитной ракетной системы, после чего началась разработка С-75 [2, 11]. Работы были поручены КБ-1 под руководством А.А. Расплетина (рисунок 5). Создание новой ракеты В-750 с твердотопливной стартовой и жидкостной маршевой ступенями осуществлялось в ОКБ-2 под руководством П.Д. Грушина. Для комплекса под руководством главного конструктора ЦКБ-34 (КБСМ) Б.С. Коробова были разработаны перевозимые пусковые установки СМ-63 и СМ-90, а также транспортно-заряжающая машина ПР-11.



Рисунок 5 – Главные разработчики системы С-75: А.А. Расплетин [5], П.Д. Грушин [12], Б.С. Коробов [13]

Дивизион С-75 (рисунок 6) включал шесть вращающихся на 360° пусковых установок, транспортно-заряжающие машины с 18 ракетами, радиолокационную станцию наведения СНР-75 и пункт управления. Как правило, дивизиону придавалась РЛС дальнего обнаружения П-12. Ракета имела радиокомандное наведение и радиовзрыватель. При скорости полёта до 3 М (около 4100 км/ч) максимальное время полёта ракеты при пуске вдогонку составляло 10-40 секунд.



Рисунок 6 – Элементы ЗРС С-75: ЗУР В-750 на ПУ СМ-63 во Вьетнаме и на ПУ СМ-90 на полигоне [11]

Комплекс С-75 «Двина» был принят на вооружение в 1957 году и обладал высокими для своего времени характеристиками: дальность поражения целей достигала 42 км на активном участке и до 56 км на пассивном, высота – от 3 до 25–30 км, ско-

рость ракеты превышала 3 М. В модификациях «Десна» и «Волхов» характеристики были существенно улучшены, в том числе снижена минимальная дальность поражения до 400 м в варианте «Волхов». Максимальное развёртывание системы составило около 6400 пусковых установок (1964 г.) [14].

С-75 стал первым в истории ПВО комплексом, успешно применённым против высотных разведчиков. 7 октября 1959 г. вблизи Пекина был сбит самолёт RB-57D на высоте 20 600 м, а 16 ноября того же года – американский аэростат на высоте 28 км недалеко от Сталинграда. 1 мая 1960 г. комплекс С-75 уничтожил самолёт-разведчик U-2 ВВС США под Свердловском, пилот Г. Пауэрс был захвачен в плен; при этом по ошибке был сбит советский истребитель МиГ-19. 27 октября 1962 г. во время Карибского кризиса U-2 был сбит над Кубой. В 1960-е гг. ВВС Китая уничтожили над своей территорией пять американских разведчиков.

Высокая эффективность С-75 обусловила его широкое применение в войсках ПВО и масштабные поставки за рубеж. Комплекс активно использовался в реальных боевых действиях, прежде всего во Вьетнаме и на Ближнем Востоке. Во Вьетнаме количество дивизионов С-75 возросло с нескольких единиц в 1966 г. до 36 к 1967 г. 23 октября 1967 г. над Ханоем был сбит штурмовик А-4Е «Скайхок», пилотируемый будущим сенатором от штата Аризона Джоном Маккейном. В 1972 г. комплексами С-75 было уничтожено 421 американское воздушное судно, включая 51 самолёт В-52. Несмотря на большие потери от ствольной зенитной артиллерии, именно С-75 в значительной степени определял тактику действий авиации США и стал одним из факторов прекращения войны.

1.3 Зенитная ракетная система С-125 «Нева»

Опыт эксплуатации комплексов С-25 и С-75 показал необходимость расширения возможностей ПВО на весь диапазон высот потенциальных угроз. Минимальная высота поражения этих систем составляла 1–3 км, что соответствовало требованиям начала 1950-х гг., однако развитие авиации делало вероятным переход к полётам на малых высотах. В связи с этим КБ-1 под руководством А.А. Расплетина была поставлена задача создания маловысотной зенитной ракетной системы С-125 [2, 11].

Ключевым требованием к комплексу стала полная мобильность всех его средств с возможностью транспортировки автомобильным, железнодорожным, морским и авиационным транспортом. Работы начались осенью 1955 г. В создании комплекса участвовали П.Д. Грушин (МКБ «Факел», разработчик ЗУР) и Б.С. Коробов (ЦКБ-34, разработчик перевозимых пусковых установок 5П71 и 5П73). В дальнейшем под руководством А.В.Пантелеева (рисунок 7) была создана самоходная экспортная модификация «Печора-2М» на колёсном шасси (рисунок 8) [11, 15].

Для комплекса была разработана ракета В-600П – первая двухступенчатая твердотопливная ракета, выполненная по схеме «утка», обеспечивавшей высокую манёвренность. Она предназначалась для поражения низколетящих целей на высотах 100–5000 м при скорости до 1500 км/ч. Дальность поражения составляла до 12 км, что соответствовало задачам комплекса, поскольку цели на больших дальностях эффективно поражались существующими системами.

Зенитные ракетные полки, оснащённые комплексом С-125, получили новые станции наведения СНР-125, транспортно-заряжающие машины и кабины сопряже-

ния. Важным новшеством стало внедрение автоматизированной системы пуска ракет АПП-125, самостоятельно определявшей границу зоны поражения и осуществлявшей пуск при минимальном времени подлёта цели.



Рисунок 7 – Главный конструктор КБСМ А.В. Пантелеев [16]



Рисунок 8 – ПУ самоходного ЗРК «Печора-2М» на испытательной станции КБСМ

Принятый на вооружение в 1961 году ЗРК С-125 (рисунок 9) обеспечивал обстрел одной цели, летящей со скоростью до 560 м/с, двумя ракетами с вероятностью поражения до 0,98. Максимальное развёртывание системы С-125 составило 1250 пусковых установок (1986 г.) [17].

В ходе Войны Судного дня египетские подразделения ЗРК С-125 174 ракетами В-600П сбили 21 самолёт, а сирийские – 33 самолёта 131 ракетой. Широкую известность комплекс получил после события 27 марта 1999 г., когда над Югославией ЗРК С-125 впервые в истории уничтожил малозаметный ударный самолёт *Lockheed F-117 Nighthawk.*




Рисунок 9 – Элементы ЗРС С-125: ЗУР В-600П на ПУ 5П71 [11] и на ПУ 5П73 [15]

1.4 Зенитная ракетная система С-200 «Ангара»

Перед отечественными разработчиками ПВО стояла задача создания перевозимой зенитной ракетной системы большого радиуса действия, способной поражать высоколетящие цели на значительных расстояниях. В соответствии с постановлениями правительства от 19 марта 1956 г. и 8 мая 1957 г. № 501 и № 250 к разработке дальнобойного комплекса С-200 было привлечено большое число предприятий [11, 15].

Генеральным конструктором системы стал А.А. Расплетин, затем его сменил Б.В. Бункин (рисунок 10). Разработка ракеты была поручена П.Д. Грушину, радиолокационных средств – В.И. Овсянникову, а пусковых установок – Б.Г. Бочкову и А.Ф. Уткину из ЦКБ-34 (рисунок 10).



Рисунок 10 – Создатели ЗРС-200: Б.В. Бункин [18], В.И. Овсянников [19], Б.Г. Бочков [15], А.Ф. Уткин [16]

Первый эскиз ракеты В-860 был представлен в декабре 1959 г. Пуск осуществлялся с помощью четырёх твердотопливных ускорителей суммарной тягой 168 тс, после чего включался маршевый жидкостный двигатель, обеспечивавший скорость полёта до 1200 м/с. Для повышения манёвренности ракета автоматически выбирала режим работы двигателя в зависимости от дальности до цели. Особое внимание уделялось теплозащите конструкции, учитывая интенсивный нагрев при полёте на высоких скоростях.

Огневой комплекс С-200 включал командный пункт, радиолокатор уточнения обстановки, цифровую вычислительную машину и до пяти дивизионов. Каждый ди-

визион имел шесть пусковых установок, аппаратные и стартовые кабины, дизельную электростанцию, 12 автоматических заряжающих машин и антенный пост с радиолокатором подсвета цели. Зенитно-ракетный полк, как правило, состоял из 3–4 дивизионов и технического дивизиона.

Система С-200 «Ангара» (рисунок 11) была принята на вооружение в 1967 г. Она обеспечивала поражение целей со скоростью до 1100 км/ч на высотах 0,5–20 км и дальностях 17–180 км, с одновременным обстрелом до шести целей. Вероятность поражения составляла 0,45–0,98 в зависимости от манёвренности цели и условий радиоэлектронного противодействия.



Рисунок 11 – Элементы ЗРС С-200: ЗУР 5В28 на ПУ 5П72 (БО) [15] и ЗУР 5В21 на заряжающей машине 5Ю24 [15]

В последующих модификациях «Вега» и «Дубна» характеристики системы значительно возросли: скорость поражаемых целей достигла 2300 км/ч, высота – 40 км, дальность – 300 км, а вероятность поражения – 0,72–0,99. По данным США, количество пусковых установок С-200 составляло около 1100 в 1970 г., 1600 в 1975 г. и 1900 в 1980 г., достигнув максимума в середине 1980-х гг. – 2050 ПУ [17].

Комплекс С-200 стал первой зенитной ракетной системой, способной поражать самолёты-разведчики Lockheed SR-71, что вынуждало авиацию США ограничивать полёты районами вдоль границ СССР и стран Варшавского договора. Действующие на больших дистанциях самолёты-постановщики помех также являлись эффективными целями для системы самонаведения С-200.

2 Развитие мобильных систем противовоздушной обороны

Комплексы С-75, С-125 и С-200 обеспечивали эффективную оборону важнейших объектов СССР, однако к концу 1950-х гг. возросшие боевые возможности авиации и угроза применения тактического ядерного оружия потребовали принципиально новых средств ПВО. Основной военной угрозой для стран НАТО считались Сухопутные войска Советской армии, что делало их прикрытие приоритетной задачей.

Зенитные подразделения Сухопутных войск, входившие в состав полевой артиллерии, уже не могли эффективно решать задачи противовоздушной обороны на театрах военных действий. Войска ПВО страны также не обеспечивали прикрытие сухопутных группировок из-за низкой мобильности систем и наличия крупных советских контингентов за рубежом, находившихся вне зон действия стационарной ПВО. Даже относительно мобильный комплекс С-75 с временем развёртывания 1,5–2 часа

не отвечал требованиям манёвренной войны. В этих условиях возникла необходимость создания принципиально новой системы вооружения для ПВО Сухопутных войск.

2.1 Системы ПВО второго поколения

В 1958 году в составе Сухопутных войск был сформирован новый род войск – Войска ПВО Сухопутных войск. Им были переданы существующие средства зенитной артиллерии и часть ранее созданных систем ПВО, а также разработаны новые комплексы второго поколения, способные вести боевую работу в движении, с коротких остановок и с неподготовленных позиций. К таким системам относились ЗРК и ЗАК «Круг», «Куб», «Оса», «Шилка», а также переносные ЗРК «Стрела-2».

В рамках данной работы рассматриваются не все указанные комплексы, а лишь отдельные из них. Так, в 1965 году на вооружение был принят войсковой зенитный ракетный комплекс средней дальности 2К11 «Круг» [20]. Головным исполнителем работ выступил В. П. Ефремов (НИИ-20), где также разрабатывались радиолокационные средства комплекса. Зенитная управляемая ракета 3М8 была создана Л.В. Люльевым (ОКБ-8, ныне ОКБ «Новатор»), а самоходная пусковая установка – Г.С. Ефимовым (ОКБ-3 «Уралмашзавода»).

Ракетный дивизион комплекса «Круг» включал станцию обнаружения целей 1С12, кабину приёма целеуказания К-1 «Краб» и три зенитные ракетные батареи. Каждая батарея состояла из станции наведения 1С32 и трёх самоходных пусковых установок 2П24 с двумя ЗУР на каждой.

Для ракеты 3М8 был применён керосиновый прямоточный воздушно-реактивный двигатель с использованием атмосферного кислорода в качестве окислителя. Высокая эффективность двигателя на больших скоростях компенсировалась необходимостью применения стартовых ускорителей. Осколочно-фугасная боевая часть массой 150 кг содержала около 90 кг взрывчатого вещества и формировала до 15 000 поражающих элементов.

Все боевые средства комплекса «Круг» размещались на гусеничных самоходных лёгкобронированных шасси высокой проходимости и имели защиту от оружия массового поражения (рисунок 12). Запас топлива обеспечивал марш со скоростью до 45–50 км/ч на дальность до 300 км и ведение боевой работы на месте в течение до 2 часов.

Зона поражения комплекса составляла 3–23,5 км по высоте и 11–45 км по дальности, при курсовом параметре целей до 18 км. Максимальная скорость поражаемых целей достигала 800 м/с, средняя вероятность поражения истребителя – около 0,7. Время развёртывания и свёртывания комплекса составляло порядка 5 минут, хотя на практике этот показатель не всегда выдерживался. В последующих модификациях основные характеристики были улучшены.

Станция обнаружения целей 1С12 обеспечивала обнаружение истребителя на дальностях до 70 км при высоте полёта 500 м, до 150 км при высоте 6 км и до 180 км при высоте 12 км.

Иным принципиальным решением отличался дивизионный ЗРК «Оса» [20], в котором все радиолокационные средства и зенитные ракеты размещались на одном шасси. Разработка комплекса сопровождалась значительными трудностями, и после

срыва сроков новым главным конструктором был назначен В.П. Ефремов (рисунок 12), его заместителем – И.М. Дризе (рисунок 14). Колёсное шасси было разработано Брянским автомобильным заводом, а ракета – ОКБ-2 под руководством П.Д. Грушина (рисунок 5). После 11 лет разработки комплекс был принят на вооружение в 1971 году. Концептуально схожий американский ЗРК Mauler так и не был доведён до серийного состояния.



Рисунок 12 – Создатели ЗРК «Круг»: В.П. Ефремов[8], Л.В. Люльев [21], Г.С. Ефимов



Рисунок 13 – Элементы ЗРК «Круг»: ЗУР 3М8 на ПУ 2П24 и РЛС 1С32 [23]



Рисунок 14 – И.М. Дризе [24]

В состав ЗРК «Оса» (рисунок 15) входила боевая машина с четырьмя ракетами и всеми средствами разведки, наведения и пуска, а также транспортно-заряжающая машина с восемью дополнительными ракетами и вспомогательные средства технического обслуживания. Таким образом, выполнение боевой задачи обеспечивалось одной боевой машиной.



Рисунок 15 – Боевая машина 9А33БМ3 ЗРК 9К33М3 «Оса-АКМ» [25]

Зенитная управляемая ракета 9М33 имела длину более 3 м, стартовую массу 128 кг и боевую часть массой 15 кг. Средняя скорость на управляемом участке полёта составляла около 500 м/с. Комплекс обеспечивал поражение целей со скоростью до 300 м/с на высотах 200–5000 м и дальностях 2,2–9 км; для сверхзвуковых целей максимальная дальность не превышала 7,1 км. Вероятность поражения истребителя F-4 Phantom II составляла 0,35–0,4 на высоте 50 м и возрастала до 0,42–0,85 на высотах более 100 м.

При борьбе с боевыми вертолётами, использующими складки местности, эффективность ЗРК «Оса» оказалась ниже, чем при поражении самолётов. В связи с этим была разработана ракета 9М33М3 и усовершенствованы методы наведения. Хотя вероятность поражения вертолётов оставалась относительно невысокой (менее 0,55), пуск ракеты в большинстве случаев приводил к срыву атаки.

Создание мобильных зенитных ракетных комплексов второго поколения вывело Войска ПВО Сухопутных войск на один из самых высоких в мире уровней технической оснащённости и обеспечило эффективную противовоздушную оборону войск во всех условиях боевых действий, днём и ночью, при любой погоде и даже на радиоактивно заражённой местности. Подобными мобильными системами ПВО в тот период не обладала ни одна армия мира, и даже в настоящее время они имеются далеко не у всех государств.

2.2 Системы ПВО третьего поколения

К 1983–1985 гг. была завершена разработка систем ПВО третьего поколения, включавших дальнобойные ЗРС ПРО-ПВО, комплексы средней и малой дальности,

зенитные пушечно-ракетные комплексы ближнего действия и переносные ЗРК. Их принятие на вооружение позволило формировать на театрах военных действий комплексные высокоэффективные группировки ПРО-ПВО, структура которых сохраняет актуальность до настоящего времени.

Система ПРО-ПВО включала центральную компоненту для борьбы с пилотируемыми и беспилотными средствами воздушного нападения, средства противодействия крылатым ракетам и БПЛА, а также компоненту ПРО для перехвата баллистических целей. Дополнительно применялись средства защиты от противорадиолокационных ракет и радиоэлектронного подавления.

В состав системы вооружения Войск ПВО третьего поколения (рисунок 16) вошли:

- ЗРС ПРО-ПВО дальнего действия С-300;
- ЗРС средней дальности «Бук» и «Бук-М1»;
- ЗРК малой дальности «Тор»;
- ЗПРК ближнего действия «Тунгуска»;
- ПЗРК «Игла».



Рисунок 16 – Состав системы вооружения Войск ПВО третьего поколения [26]

2.3 Зенитная ракетная система С-300

Разработка системы С-300 началась в конце 1960-х годов с учётом опыта войн во Вьетнаме и на Ближнем Востоке, показавшего необходимость создания многоканального автоматизированного мобильного комплекса, способного отражать массированные воздушные удары при минимальном времени развёртывания.

В 1969 г. было принято решение о создании трёх вариантов комплекса: С-300П – для ПВО страны, С-300В – для Сухопутных войск и С-300Ф – для ВМФ (рисунок 17) [2, 27]. Комплексы различались назначением, однако в ходе дальнейших модификаций их боевые возможности сближались.

Система С-300П, разработанная ЦКБ «Алмаз», была принята на вооружение в 1978 г., а в 1982 г. – в самоходном варианте (рисунок 18). С-300В, созданная НИИЭМ,

поступила на вооружение в 1983 г. и размещалась на гусеничных шасси. Корабельный вариант С-300Ф, разработанный НИИ «Альтаир», был принят в 1984 г.

Комплексы семейства С-300П обеспечивали поражение целей на высотах от 10 м до предельных высот полёта и на дальностях до 75–200 км в зависимости от типа ракеты. Скорость поражаемых целей достигала 4 М (до 8,5 М в поздних модификациях), интервал между пусками составлял около 3 с, пуск осуществлялся вертикально. Вероятность поражения истребителя достигала 0,9. Стандартный дивизион включал 12 мобильных пусковых установок с централизованным управлением.



Рисунок 17 – Разработчики зенитных ракетных систем С-300 [26]

Корабельная ЗРС С-300Ф представляла собой подпалубную установку вертикального пуска револьверного типа с автоматической перезарядкой и интервалом стрельбы 3 с. Ракеты размещались в герметичных транспортно-пусковых контейнерах со сроком хранения до 10 лет без обслуживания.

Войсковой комплекс С-300В (рисунок 19) предназначался для прикрытия войск, важных объектов и административно-промышленных центров от аэродинамических и баллистических целей. Все элементы системы размещались на унифицированных гусеничных шасси высокой проходимости.

Дивизион С-300В включал командный пункт, две РЛС обзора и четыре зенитные ракетные батареи. Он мог одновременно обстреливать до 24 целей и наводить до 48 ракет. Зона поражения аэродинамических целей достигала 100 км по дальности и 25–30 км по высоте, баллистических – до 40 км по дальности и до 25 км по высоте. Максимальная скорость поражаемых целей составляла до 3000 м/с, а вероятность по-

ражения различных типов целей – 0,4–0,9.



Рисунок 18 – Пусковые установки 5П85С и 5П85Д ЗРК С-300ПС [11]



Рисунок 19 – Элементы зенитно-ракетной системы С-300В [26]

Несмотря на высокую эффективность системы С-300, создание единого унифицированного комплекса для ПВО страны, Сухопутных войск и ВМФ реализовать не удалось – были сформированы три самостоятельные системы с ограниченной унификацией.

2.4 Развитие систем ПВО в 90-ые годы XX века

В 1990-е годы на фоне экономического кризиса и упадка оборонно-промышленного комплекса развитие войск ПВО существенно замедлилось. Поставка нового вооружения осуществлялась в ограниченных объёмах, однако именно в этот период стала очевидной необходимость непрерывного совершенствования систем ПРО-ПВО.

Выходом стало создание эффективных группировок ПВО за счёт глубокой модернизации существующих комплексов третьего поколения в ходе капитального ремонта. В качестве примера рассматривается ЗРК средней дальности «Бук», разработка которого началась в 1972 г., а принятие на вооружение состоялось в 1979 г. Модификация «Бук-М1» появилась в 1983 г. и обеспечивала поражение до 6 целей на дальностях до 22 км и высотах до 35 км.

Комплекс «Бук-2М», разработанный в 1988 г., не был запущен в серийное производство из-за распада СССР. Спустя 15 лет документация была адаптирована под современную элементную базу, что позволило внедрить цифровые вычислительные средства, новые РЛС, фазированные антенные решётки, модернизированные ракеты и шасси.

В результате модернизации дальность поражения самолётов типа *F*-15 увеличилась до 50 км, возросла вероятность поражения всех типов целей, появилась возможность поражения морских целей и одновременного обстрела до 24 целей (рисунок 20).



Рисунок 20 – Модернизация зенитного ракетного комплекса «Бук» [26]

Проведённые мероприятия позволили России к началу XXI века на основе глу-

бокой модернизации и внедрения новейших технологий создать систему ПВО четвёртого поколения, не имеющую мировых аналогов.

3 Развитие систем противовоздушной обороны четвертого поколения

В настоящее время в серийном производстве и эксплуатации находятся системы ПВО четвёртого поколения (рисунок 21): зенитные ракетные системы дальнего действия С-300В4 и С-400, системы средней дальности С-350 «Витязь» и «Бук-М2/М3», зенитные ракетные комплексы малой дальности «Тор-М2», а также автоматизированные средства управления данными комплексами.



Рисунок 21 – Системы ПВО четвертого поколения [26]

Следует отметить, что сохранение традиционных обозначений с добавлением буквенно-цифровых индексов не отражает глубину произошедших изменений. Речь идёт не о модификациях, а о качественно новом поколении систем ПРО-ПВО, созданных за счёт непрерывного совершенствования элементной базы, алгоритмов обработки информации, средств разведки и управления.

Так, дальность поражения аэродинамических целей системой С-300В4 увеличилась в 2,8–3,3 раза по сравнению с базовой С-300В и достигла 400 км при сохранении сопоставимых массогабаритных характеристик. Комплекс получил возможность поражения баллистических ракет средней дальности с дальностью старта свыше 2500 км, включая маневрирующие ОТБР, что недостижимо для современных зарубежных аналогов.

ЗРС средней дальности «Бук-М3» трансформировалась в 36-канальную систему, способную поражать крылатые ракеты на высотах от 5 м и дальностях до 40 км

при времени развертывания не более 5 минут. Вероятность поражения неманеврирующих целей достигает 0,9999, крылатых ракет – до 0,8. Комплекс также способен поражать морские цели.

ЗРК малой дальности «Тор-М2» обеспечивает одновременное поражение до четырёх целей, включая пилотируемые ЛА, высокоточные средства поражения и большинство типов БПЛА. Комплекс выпускается в гусеничном, колесном, контейнерном и арктическом вариантах. По совокупному критерию «эффективность–стоимость» он превосходит зарубежные аналоги, включая ЗРК «*Iron Dome*».

Система С-400, несмотря на значительную преемственность с С-300ПМ2, обладает рядом принципиальных преимуществ: повышенной автоматизацией, расширенными возможностями обнаружения и сопровождения целей, интеграцией в многоуровневые системы управления и увеличенной дальностью поражения до 250 км. Высокопотенциальная РЛС с ФАР обеспечивает сопровождение до 100 целей и обстрел до 80 целей одновременно, что делает С-400 одной из наиболее совершенных систем ПВО-ПРО в мире.

ЗРС С-350 «Витязь» демонстрирует трансформацию объектовых комплексов большой дальности в системы средней дальности. Дивизион включает до восьми ПУ, две многофункциональные РЛС и пункт боевого управления. Комплекс способен сопровождать до 200 целей и обеспечивать одновременный обстрел до 28 целей с наведением 32 ракет. В отличие от «Бук-М3», С-350 оптимизирован для объектовой ПВО и отличается меньшей стоимостью и простотой эксплуатации.

Эффективность российских систем ПВО четвёртого поколения подтверждается боевым применением. Так, в апреле 2017 года при ударе КР по авиабазе Шайрат комплексами «Бук-М2» было уничтожено 36 из 59 крылатых ракет (61%), что значительно превышает показатели предыдущих конфликтов.

4 Переход от системы ПВО-ПРО в системе ВКО

В настоящее время ведётся создание эшелонированной территориальной системы противоракетной и противокосмической обороны Московского промышленного района А-235 «Нудоль», предназначенной для защиты от ракетно-ядерного удара.

Первые шаги к созданию ПРО в СССР были предприняты в начале 1950-х годов, когда стало очевидно, что существующие средства ПВО не способны противодействовать баллистическим ракетам. В августе 1953 года группа высших военачальников СССР официально инициировала работы по созданию противоракетной обороны [29].

Несмотря на скепсис части научного сообщества, 4 марта 1961 года была осуществлена первая в мире успешная перехват и поражение баллистической ракеты противоракетой В-1000 (рисунок 22) [30, 31]. Головным разработчиком системы «А» являлось КБ-1 под руководством Г.В. Кисунько (рисунок 23). Система имела ограниченные возможности и обеспечивала перехват только одной цели в ближнем атмосферном эшелоне.

Первая серийная система ПРО Москвы А-35 была принята на вооружение в 1971 году [30, 33]. К 1974 году она включала командно-вычислительный центр, РЛС дальнего обнаружения «Дунай-3М» и «Дунай-3У», четыре позиционных района и 64 противоракеты А-350Ж (рисунок 24). В 1977 году на вооружение была принята мо-

дернизированная система А-35М.



Рисунок 22 – Противоракета В-1000 на ПУ СМ-71на полигоне Сары-Шаган, 1958 год



Рисунок 23 – Г.В. Кисунько (1918-1998) [31]

В 1995 году была введена в эксплуатацию система ПРО А-135 «Амур» [30], включающая РЛС «Дон-2Н», 100 шахтных противоракет двух эшелонов перехвата и вычислительный комплекс «Эльбрус» (рисунки 25, 26). Система обеспечивала селекцию боевых блоков МБР и их поражение на скоростях до 6–7 км/с.

Разработка системы А-235 «Нудоль» началась ещё в середине 1980-х годов как модернизация А-135. Реализация проекта активизировалась во втором десятилетии XXI века. Система предусматривает применение как шахтных, так и мобильных комплексов, а также противоракет с различными типами боевых частей, обеспечивая функции ПРО и ПКО. В перспективе система может использоваться не только для защиты Москвы, но и для других стратегически важных районов.



Рисунок 24 – Позиционный район системы А-35 с подъемно-пусковыми установками Б-176-ll с противоракетами А-350Ж [34]



Рисунок 25 – Памятник противоракете А-350Р в Приозерске (Казахстан) [34]

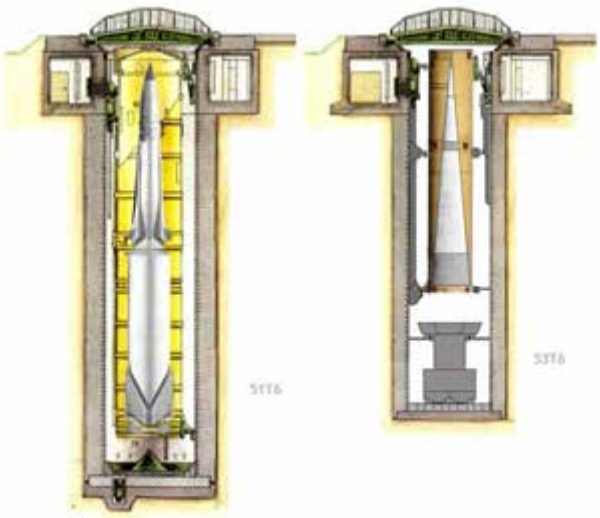


Рисунок 26 – Противоракеты 51Т6 и 53Т6 системы ПРО А-135 в шахтных пусковых установках [35, 36]

И это лишь небольшая честь всех работ, которые ведутся в интересах ВКО Российской Федерации.

Заключение

В настоящее время в интересах ВКО Российской Федерации и для экспортных поставок отечественный оборонно-промышленный комплекс производит широкий спектр современных средств противовоздушной и противоракетной обороны:

- Комплексы ПВО большой дальности, обеспечивающие прикрытие населённых пунктов и стратегически важных объектов: С-300, С-300В4, С-400, С-500;

- Комплексы ПВО средней дальности: «Печора-2А», зенитные ракетные комплексы «Бук-М2», «Бук-М3», С-350 «Витязь»;

- Мобильные комплексы ПВО малой дальности непосредственного сопровождения подразделений сухопутных войск: «Оса-АКМ», «Тор-М1», «Тор-М2»;

- Комплексы ПВО морского базирования: большой дальности – «Риф-М», средней дальности – «Штиль-1», малой дальности – «Клинок», «Гибка» и другие перспективные системы.

Таким образом, обеспечиваются как текущие, так и перспективные потребности в создании, поддержании и развитии эффективной системы ВКО, направленной на обеспечение безопасности и обороноспособности Российской Федерации и её союзников.

Несмотря на сложную экономическую и социальную обстановку в стране после 1990-х годов, российскому ОПК удалось сохранить ключевые компетенции, необходимые для разработки и производства современных средств ПВО. По отдельным направлениям разработка новых решений и технологий велась фактически с нуля. Сегодня технические и технологические возможности России значительно превосходят уровень двух десятилетий назад, что обеспечивает оснащение Вооружённых сил Российской Федерации новейшими образцами вооружений и поддержание их боевого потенциала на современном уровне.

Литература

1 Первов М. Зенитное ракетное оружие противовоздушной обороны страны. М.: ПФГ «Акварус-XXl», 2001. 312 с.

2 Ганин С. И др. Ракетные комплексы ПВО страны // Авиация и космонавтика вчера, сегодня, завтра. 2002. № 12. 48 с.

3 Берия Сергей Лаврентьевич. [Электронный ресурс]. // Сайт «ВикипедиЯ». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Берия,_Серго_Лаврентьевич (дата обращения: 25.08.2025).

4 Быстродействующий пишущий радиоприёмник. Гениальная разработка П.Н.Куксенко. [Электронный ресурс]. // Сайт «dzen.ru». URL: https://dzen.ru/a/X7UZbkL5yh2h15Jq?utm _medium (дата обращения: 25.08.2025).

5 Расплетин, Александр Андреевич. [Электронный ресурс]. // Сайт «ВикипедиЯ». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Расплетин,_Александр_Андреевич (дата обращения: 25.08.2025).

6 Первый отечественный ЗРК С-25. [Электронный ресурс]. // Сайт «Военное обозрение». URL: https://topwar.ru/29102-pervyy-otechestvennyy-zrk-s-25.html (дата об-

ращения: 25.08.2025).

7 Ракета В-300 и стартовый стол в деталях. [Электронный ресурс]. // Сайт «livejournal.com». URL: https://c25-ru.livejournal.com/1176.html (дата обращения: 25.08.2025).

8 Ефремов, Вениамин Павлович. [Электронный ресурс]. // Сайт «ВикипедиЯ». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ефремов,_Вениамин_Павлович (дата обращения: 25.08.2025).

9 На его истребителях сражался Иван Кожедуб и Алексей Маресьев. История легендарного конструктора Семена Лавочкина. [Электронный ресурс]. // Сайт «dzen.ru». URL: https://dzen.ru/a/Zt9BF8R6lVq-iq-c?ysclid=mel8d6es73742857969 (дата обращения: 25.08.2025).

10 Макавеев А.Т., Щеглов Д.К., Тимофеев В.И. Военные парады в СССР как эффективный способ дезинформации потенциального противника // Вестник воздушно-космической обороны. 2021. №2 (30).

11 Ушаков В.С. КБСМ Войскам ПВО страны. СПб.: КБСМ, 2004. 136 с.

12 День в истории. 15 января – 115 лет со дня рождения Петра Дмитриевича Грушина (1906—1993). [Электронный ресурс]. // Сайт «vk.com» URL: https://vk.com/wall-8375_453564 (дата обращения: 25.08.2025).

13 Коробов, Борис Самойлович. [Электронный ресурс]. // Сайт «ВикипедиЯ». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Коробов,_Борис_Самойлович (дата обращения: 25.08.2025).

14 Ядерное вооружение СССР / Т. Кохран, У. Аркин, Р. Норрис, Дж. Сэндс. – М.: ИздАТ, 1992. 490 с.

15 От артиллерийских систем до стартовых комплексов. СПб.: КБСМ, 2002. 556 с.

16 Фото-архив АО «Конструкторское бюро специального машиностроения».

17 The Military Balance 1986-1987. London: The International Institute for Strategic Studies, 1986.

18 Бункин Борис Васильевич: человек, создававший систему противовоздушной обороны нашей страны. [Электронный ресурс]. // Сайт «Военное обозрение». URL: https://topwar.ru/116173-bunkin-boris-vasilevich-chelovek-sozdavavshiy-sistemu-protivovozdushnoy-oborony-nashey-strany.htm (дата обращения: 25.08.2025).

19 Овсянников Василий Иванович. [Электронный ресурс]. // Сайт «Военное обозрение». URL: https://www.names52.ru/o/tpost/z952b0vzv1-ovsyanikov-vasilii-ivanovich (дата обращения: 25.08.2025).

20 Ангельский Р. И др. Зенитные ракетные комплексы противовоздушной обороны Сухопутных войск // Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра. 1999. №5-6. 80 с.

21 Люльев Лев Вениаминович. [Электронный ресурс]. // Сайт «Союз предприятий оборонных отраслей промышленности свердловской области». URL: http://www.souzop.ru/about/zal_slaviy2/lyulev-lev-veniaminovich/ (дата обращения: 25.08.2025).

22 Ефимов, Георгий Сергеевич. [Электронный ресурс] // Сайт «ВикипедиЯ». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ефимов,_Георгий_Сергеевич (дата обращения: 25.08.2025).

23 Круг (зенитный ракетный комплекс). [Электронный ресурс]. // Сайт «ВикипедиЯ». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Круг_(зенитный_ракетный_ комплекс)\ (дата обращения: 25.08.2025).

24 Дризе, Иосиф Матфеевич. [Электронный ресурс] // Сайт «ВикипедиЯ». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Дризе,_Иосиф_Матвеевич (дата обращения: 25.08.2025).

25 Оса (зенитный ракетный комплекс). [Электронный ресурс]. // Сайт «ВикипедиЯ». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Оса_(зенитный_ракетный_комплекс) (дата обращения: 25.08.2025).

26 Щеглов Д.К., Фёдоров Д.А. Лекция «На страже мирного неба вчера, сегодня, завтра». АО «НПО «Обуховский завод», 2025.

27 Зенитная ракетная система С-300 / С.М. Ганин, А.В. Карпенко, В.И. Жизневский, Г.В. Федотов. СПб.: Невский бастион, 1997. // Приложение к военно-техническому сборнику «Невский бастион». Выпуск 3. – 72 с., ил

28 Зенитная ракетная система С-400 «Триумф». – М.: НПО «Алмаз», 2017. – 20 с., ил.

29 1953 год. «Письмо семи маршалов» о необходимости создания ПРО. И как против этого выступали высокопоставленные светила науки. [Электронный ресурс]. // Сайт «dzen.ru». url: https://dzen.ru/a/zetuhc4012c5twtz (дата обращения: 25.08.2025).

30 Карпенко, А.В. Противоракетная и противокосмическая оборона / А.В. Карпенко. – СПб.: Невский бастион, 1998. // Приложение к военно-техническому сборнику «Невский бастион». Выпуск 4. – 48 с., ил.

31 Кисунько, Г.В. Секретная зона: Исповедь генерального конструктора / Г.В. Кисунько. – М.: Современник, 1996. – 510 с., ил. – (Жестокий век: Кремль и ракеты).

32 Коровин В. Ракеты «Факела». М.: МКБ «Факел», 2003.

33 Первушин А.И. Тайна системы «А». Ракетный щит Москвы. СПб.: ООО Издательство «Пальмира», 2017. 255 с.

34 Система А-35М - ABM-1B GALOSH. [Электронный ресурс]. // Сайт «Military Russia». URL: http://militaryrussia.ru/blog/topic-301.html<br/topic/topic/topic-353.htm (дата обращения: 25.08.2025).

35 Система А-135. Ракета А-925 / 51Т6 / - ABM-4 GORDON. [Электронный ресурс]. // Сайт «Military Russia». URL: http://militaryrussia.ru/blog/topic-345.html (дата обращения: 25.08.2025).

36 Система А-135 Амур. Ракета 5Я26 / ПРС-1 / 51Т6 / - ABM-3 GAZELLE. [Электронный ресурс]. // Сайт «Military Russia». URL: http://militaryrussia.ru/blog/index-384.html (дата обращения: 25.08.2025).

Васильев Александр Владимирович – Заместитель генерального директора – генеральный конструктор, АО «НПО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: управление наукоемкими проектами и сложных технических систем военного, гражданского и двойного назначения.
Email: vav@bk.ru

Щеглов Дмитрий Константинович – кандидат технических наук, доцент, научный руководитель, АО «НПО «Обуховский завод»; доцент, БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: инженерные расчеты, методы проектирования сложных технических систем, системный анализ, промышленная автоматизация, управление проектами, методы и средства цифровой трансформации предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности.
Email: _dk@bk.ru

Фёдоров Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, Начальник лаборатории, АО «НПО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: инженерные расчеты, методы проектирования сложных технических систем, системный анализ, промышленная автоматизация.
Email: fda@bk.ru

Макавеев Александр Тимофеевич – кандидат технических наук, Главный специалист, АО «НПО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: инженерные расчеты, динамика и прочность сложных технических систем военного, гражданского и двойного назначения, история создания средств вооружения, военной и специальной техники, история космонавтики.
Email: aleksandr-makaveev@yandex.ru

DEVELOPMENT AND MODERNIZATION OF RUSSIAN AIR AND AEROSPACE DEFENSE SYSTEMS: A VIEW THROUGH DECADES

This article examines the post-war development and use of air and aerospace defense systems. It provides information on the development of four generations of systems for countering potential enemy air attack. The article presents the anti-aircraft missile systems of the Russian Air Defense Forces, the anti-aircraft missile systems of the Ground Forces, and the anti-missile defense systems of Moscow and the Moscow Administrative-Industrial District.

Keywords: Air defense; aerospace defense; anti-aircraft missile system; anti-aircraft missile system; anti-aircraft guided missile; launcher.

Aleksandr Vladimirovich Vasiliev – Deputy General Director – General Designer, JSC NPO Obukhovsky Zavod, St. Petersburg.
Research interests: management of knowledge-intensive projects and complex technical systems for military, civilian, and dual purposes.

Dmitry Konstantinovich Shcheglov – PhD (Engineering), Associate Professor, Research Director, JSC NPO Obukhovsky Zavod; Associate Professor, Belgorod State Technical University "Voenmekh" named after D.F. Ustinov, St. Petersburg.
Research interests: engineering calculations, design methods for complex technical systems, systems analysis, industrial automation, project management, and methods and tools for dig-

ital transformation of high-tech enterprises.

Dmitry Aleksandrovich Fedorov – PhD (Engineering), Head of Laboratory, JSC NPO Obukhovsky Zavod, St. Petersburg.
Research interests: engineering calculations, design methods for complex technical systems, systems analysis, industrial automation.

Alexander Timofeevich Makaveev – PhD in Engineering, Chief Specialist, JSC NPO Obukhovsky Zavod, St. Petersburg.

Research interests: engineering calculations, dynamics and strength of complex technical systems for military, civilian, and dual-use applications, the history of weapons, military, and special-purpose equipment, and the history of cosmonautics.

УДК 621.396.96

РАДИОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОСАДКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Король В. М., Яковлев В. Т.

Анализируются причины и противоречия, которые требуют реформации посадочных систем. Рассматривается перспектива развития систем посадки летательных аппаратов. Предложена структура перспективной системы посадки.

Ключевые слова: система посадки; точность.

Введение

В настоящее время растут требования к временному и координатно-информационному обеспечению полетов, а также к наиболее ответственной фазе полета – посадке. Это направление относится к *ATN* сети авиационной электросвязи – глобальной межсетевой структуре, которая позволяет наземной подсети передачи данных, подсети передачи данных «воздух – земля» и подсети передачи данных бортового оборудования обмениваться цифровыми данными в интересах безопасности аэронавигации и регулярного, эффективного и экономичного функционирования служб воздушного движения [1].

Наибольший вклад в это обеспечение, в силу всепогодности, вносят радиотехнические средства, которые используются практически на всех этапах полета. Развитие технологической и технической базы позволяет использовать новые радиотехнические решения для выполнения этих требований. Ниже рассматриваются возможные варианты построения высокоточных и скоростных радиотехнических систем, обладающих высокими точностными характеристиками определения координат пилотируемых и беспилотных воздушных судов (ВС) и обладающих высокой скоростью обмена данными и управляющими воздействиями. Это обеспечит более эффективное использование воздушного движения и повысит безопасность полетов в целом.

Традиционно для обеспечения посадки используются радиомаячные системы, которые выдают информацию об угловом отклонении ВС от заданной траектории и траектории захода на посадку и о дальности до расчетной точки приземления. В состав радиомаячной системы входит наземное и бортовое оборудование [2, 3]. В состав наземного оборудования входят азимутальные (курсовые), угломестные (глиссадные), дальномерные и маркерные радиомаяки, а также аппаратура контроля сигнализации и управления. На рисунках 1, 2 представлены глиссадный и курсовой радиомаяки международной системы посадки *ILS*, на рисунках 3, 4 – отечественная разработка для обеспечения посадки (ПРМГ).

Бортовое оборудование предназначено для приема, усиления и передачи сигналов на индикаторы пилоту и в САУ, передачу соответствующих угловых отклонений, а также расстояний до расчетной точки приземления. Эти устройства работают в метровом и дециметровом диапазонах радиоволн. Для обеспечения заданной точности и

определения местоположения ВС (порядка 0,1 градуса по угловым координатам и 30 метров по каналу дальности) наземные антенны этих устройств имеют достаточно большие размеры (метры и десятки метров), что делает их стационарными. Подстилающая поверхность и местные предметы оказывают сильное влияние на точность определения измеряемых параметров радиомаячных систем. Кроме того, используемый ими диапазон частот постепенно занимается цифровым телевидением и сотовой связью, которые создают помехи посадочным и радионавигационным средствам. В силу этих причин возникает настоятельная потребность проектировать и разрабатывать свободную от этих недостатков посадочную аппаратуру и разрешить противоречие между растущими требованиями и фиксированными возможностями существующей навигационно-посадочной аппаратуры.



Рисунок 1 – Глиссадный радиомаяк системы посадки *ILS*



Рисунок 2 – Курсовой радиомаяк системы посадки *ILS*



Рисунок 3 – Глиссадный радиомаяк ПРМГ



Рисунок 4 – Курсовой радиомаяк ПРМГ

Главными направлениями могут быть:

а) Переход в диапазон частот 10-30 ГГц (длин волн 1-5 см);

б) Использование принципов построения посадочной аппаратуры на основе высокоточных стандартов частоты и единого времени, что позволяет применять однопутевые дальномерные устройства и увеличить скорость обмена данными в системе посадки;

в) Использование высоко интегрированных и твердотельных компонентов в приемных и передающих частях аппаратуры;

г) Использование твердотельных распределённых передающих модулей небольшой мощности, в совокупности создающих излучаемую электромагнитную волну заданной мощности;

д) Использование фазированных антенных решеток с быстрой перестройкой остронаправленного излучения и размерами порядка метра и менее, что позволяет:

- создавать и использовать совмещенные КРМ, ПРЛ и ВРЛ;

- уменьшить влияние местных предметов на точность определения координат ВС в зоне посадки;

- обеспечить быстрый и помехозащищенный обмен информационными данными.

Все это позволит строить системы посадки в виде модульной интегрированной сети информационно связанных недорогих компонентов, обеспечивающих необходимой информацией пункт управления полетами и объекты посадки, как пилотируемые, так и беспилотные, в радиусе действия порядка 30 километров (рисунки 5-7). Совместное использование единого точного времени, однопутевых измерителей дальности, радиомаяков и радиолокаторов с вторичным и первичным режимами позволит обеспечить необходимую безопасность ВС, находящихся в зоне посадки при высокой

интенсивности воздушного движения. Для оценки качества проектируемых систем предлагается ввести показатель относительных затрат на одну посадку при заданной безопасности посадки ВС.

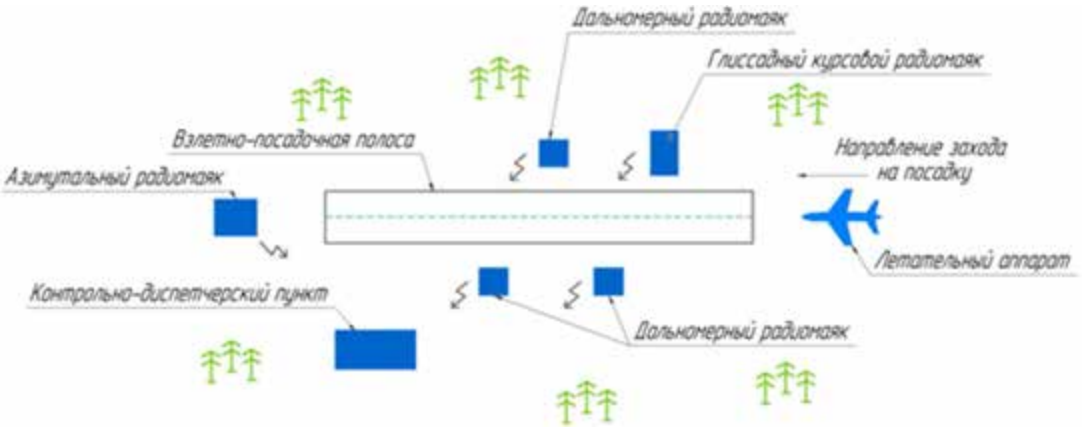


Рисунок 5 – Модель перспективной информационно-посадочной системы аэродрома

Ожидаемая расчетная ошибка измерения координат (СКО) составит 0,1 градуса по азимуту и углу места и 1-10 метров по дальности в присутствии местных предметов. Скорость обмена информацией увеличится до 20-100 Мбит/с, влияние местных предметов на координатные измерения уменьшится не менее чем в 2-3 раза. За счёт увеличения числа и связности компонентов информационно-посадочной системы увеличится безотказность посадки. Все эти меры позволят производить посадку ВС и на аэродромы низкой категории, и на не аттестованные аэродромы, в том числе и в автоматическом режиме.

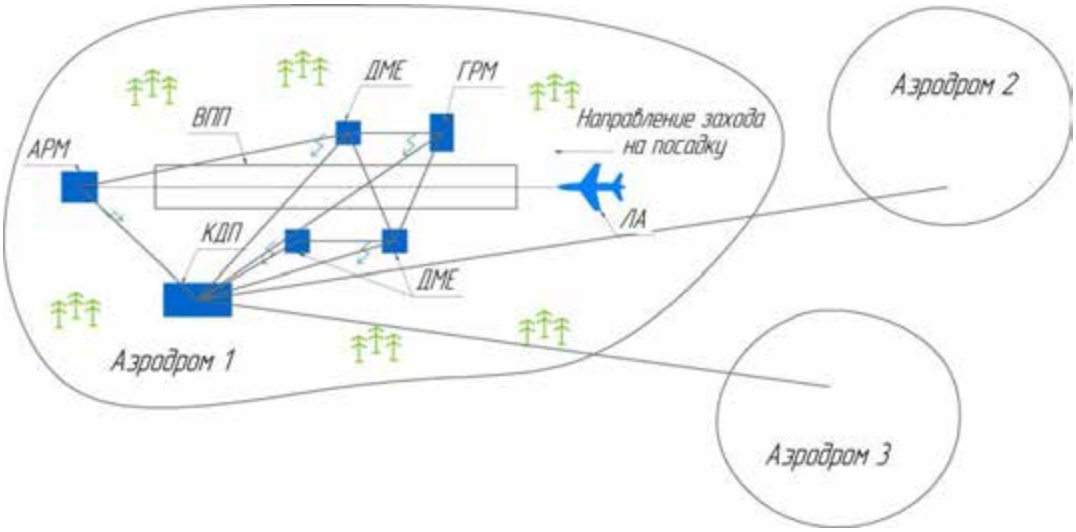


Рисунок 6 – Модель перспективной информационно-посадочной системы зоны:
АРМ – азимутальный радиомаяк, ВПП – взлетно-посадочная полоса,
КДП – контрольно-диспетчерский пункт, ДМЕ – дальномерный радиомаяк,
ГРМ – глиссадный радиомаяк, ЛА – летательный аппарат

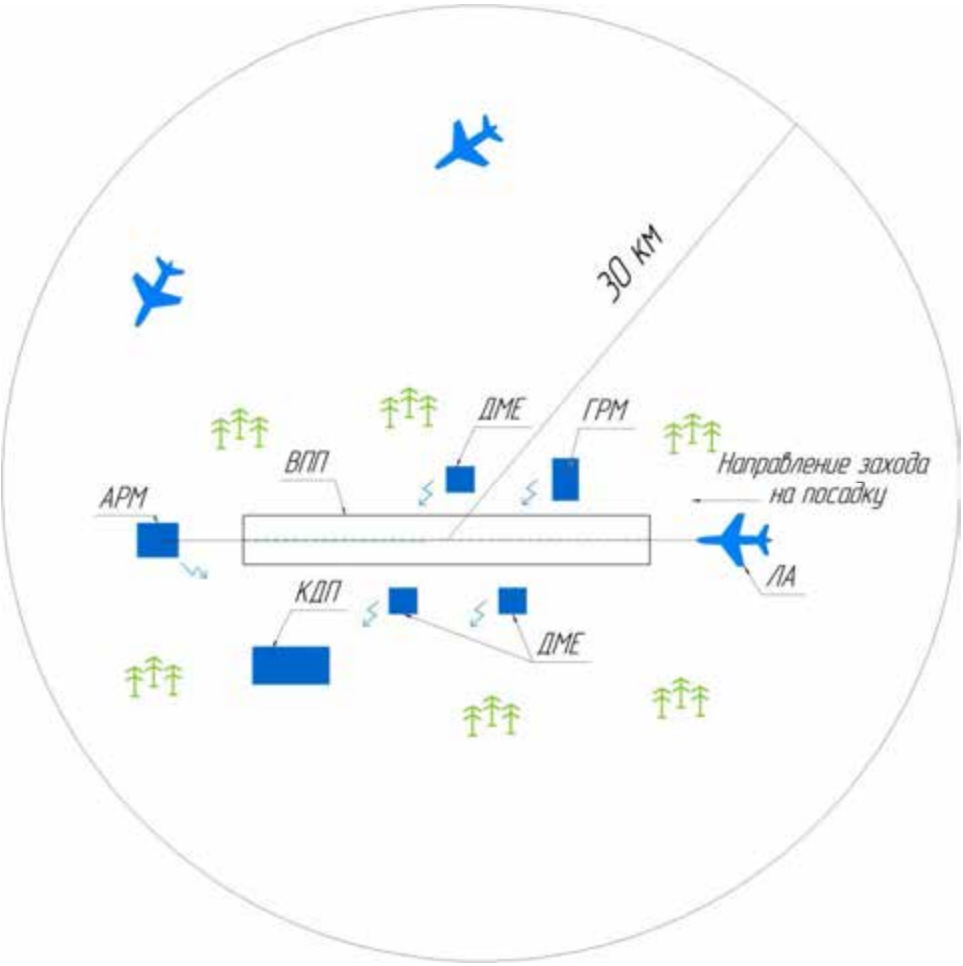


Рисунок 7 –Зона ответственности перспективной информационно-посадочной системы

Заключение

Ожидается, что представленная структура перспективной модульной информационно-посадочной системы (ИПС) позволит повысить точность определения координат ВС, безотказность посадки и пропускную способность аэродромов различной категории. Появятся мобильность и литерность систем посадки, что сократит затраты на ее изготовление и эксплуатацию. Это, в свою очередь, позволит оборудовать системами посадки небольшие аэродромы и посадочные площадки с малым и разовым использованием.

Угломерная часть ИПС существенно улучшает ее характеристики в плане точности и помехозащищённости по сравнению со спутниковыми вариантами. Дальномерная часть увеличивает ее радиус действия – зону ответственности – и может использоваться в труднодоступных (горных) районах для определения координат ВС и введения его в зону посадки.

Одновременно ожидается уменьшение времени развертывания и уменьшение значения показателя относительных затрат на одну посадку. Бортовая аппаратура должна быть двухканальной для обеспечения преемственности при работе с эксплуа-

тируемыми в настоящее время посадочными системами посадки. Новую часть бортовой аппаратуры целесообразно строить в виде отдельного модуля. Массогабаритные характеристики составных частей информационно-посадочной системы уменьшатся.

На сегодня технически доступны все необходимые комплектующие для проектирования и разработки таких систем, имеется научный и технологический заделы. Во избежание излишних затрат («семь раз отмерь, один раз отрежь»), целесообразно провести НИР с целью оценки технико-экономического облика разрабатываемой аппаратуры и в рамках ОКР разработать действующий образец информационно-посадочной системы для летной проверки ее характеристик. Основой может служить элементы 6-ти сантиметровой аппаратуры микроволновой системы посадки (*MLS*), которые разрабатывались в свое время во ВНИИРА.

Литература

1 ICAO. Авиационная электросвязь. Приложение 10. Том III. Версия 2. 2007.

2 Сосновский А.А., Хаймович И.А. Авиационная радионавигация. Справочник. М.: Транспорт, 1980. 255 с.

3 Современные системы ближней радионавигации летательных аппаратов: (Азимутально-дальномерные системы): Учеб. пособие для вузов. / Т.Г.Анодина, Ю.А.Игнатьев, В.В.Кашинов и др. Под ред. Г.А.Пахолкова. М.: Транспорт, 1986. 200 с

Король Виктор Михайлович – кандидат технических наук, главный научный руководитель НТЦ, АО «НПО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: радионавигация, радиолокация.
Email: v.korol@goz.ru

Яковлев Виктор Тимофеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, АО «НПО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: радионавигация, радиолокация.
Email: v.yakovlev@goz.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

RADIOTECHNICAL SUPPORT FOR AIRCRAFT LANDING

prospects for the development of aircraft landing systems are considered. The structure of a promising landing system is proposed.

Keywords: landing system; precision.

Viktor Mikhailovich Korol, PhD in Engineering, Chief Scientific Officer of the Scientific and Technical Center, JSC NPO Obukhovsky Zavod, St. Petersburg.
Research interests: radio navigation and radar.

Yakovlev Viktor Timofeyevich – doctor of technical sciences, chief scientific specialist, JSC « Obukhovskiy plant», St. Petersburg.
Research interests: radio navigation, radiolocation.

УДК 629.3.027

МОДУЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА КОНСТРУКЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ КОЛЁСНЫХ ШАССИ И ТЯГАЧЕЙ: СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, РАЗРАБОТКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Таричко В.И.

Рассматривается комплексный системный анализ эволюции, текущего состояния и стратегических перспектив модульной архитектуры (МА) в проектировании и производстве специальных колёсных шасси и тягачей (СКШТ). Проведён ретроспективный анализ перехода от специализированных моноблочных конструкций к унифицированным платформам двойного назначения и открытым модульным системам с функциональной адаптивностью. На основе сравнительного исследования современных зарубежных и перспективных отечественных проектов выделены ключевые элементы МА: базовая ходовая платформа, энергетический модуль, модуль управления и сменные миссионные модули. Детально рассмотрены вопросы стандартизации физических, электрических и информационных интерфейсов как основы производственной кооперации. Предложены математические модели для оценки технологической и экономической эффективности модульного подхода на разных этапах жизненного цикла. Проанализированы организационные модели распределённого производства. Перспективы развития увязаны с конвергенцией технологий Индустрии 4.0: внедрением цифровых двойников, гибридно-электрических силовых установок, элементов автономности. Сделан вывод, что модульная архитектура является системообразующим фактором, обеспечивающим технологический суверенитет и экономическую эффективность.

*Ключевые слова***:** модульная архитектура; специальные колёсные шасси и тягачи; платформа; стандартизация интерфейсов; цифровой двойник; организация производства; жизненный цикл; гибридная силовая установка; автономность.

Введение

В условиях динамичного изменения характера военных конфликтов, возрастания требований к освоению труднодоступных территорий и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, к мобильной специальной технике предъявляются противоречивые требования. Они должны сочетать высокую специализацию под конкретную задачу, способность к быстрой адаптации в полевых условиях, максимальную эксплуатационную готовность, технологическую независимость от единичных поставщиков и рентабельность на протяжении всего жизненного цикла. Классическая парадигма проектирования СКШ и тягачей как целостных, уникальных изделий, оптимизированных под узкий набор требований, продемонстрировала свою ограниченность. Она ведёт к экспоненциальному росту затрат на НИР и ОКР, неприемлемо длительным циклам разработки, сложностям модернизации, ремонта и логистического обеспече-

ния.

Ответом на эти системные вызовы стала концепция модульной архитектуры (МА), эволюционировавшая от простой унификации агрегатов до целостной философии системного инжиниринга. МА представляет собой методологию проектирования и организации производства сложной технической системы, основанную на её декомпозиции на функционально законченные, конструктивно обособленные и взаимозаменяемые блоки – модули. Эти модули соединяются через систему стандартизированных интерфейсов, что обеспечивает их независимую разработку, тестирование, производство и замену.

Актуальность исследования обусловлена следующими факторами:

1) Стратегический фактор: обеспечение технологического суверенитета и обороноспособности требует наличия гибкого промышленного базиса, способного быстро реагировать на новые угрозы.

2) Экономический фактор: сокращение совокупной стоимости владения за счёт многократного использования проверенных модулей, упрощения ремонта, снижения номенклатуры запасных частей.

3) Оперативно-тактический фактор: резкое сокращение времени цикла «выявление новой угрозы — поставка технического решения», возможность оперативной реконфигурации машины в полевых условиях.

Целью исследования является проведение всестороннего междисциплинарного анализа модульной архитектуры СКШТ, охватывающего исторические предпосылки, современные конструктивно-технологические решения, экономико-организационные модели производства и перспективы интеграции с прорывными технологиями.

Научная новизна статьи заключается в:

- систематизации и углублении теоретических основ МА применительно к СКШ, включая разработку критериев модульности и моделей оценки эффективности;
- комплексном анализе взаимосвязи конструктивных решений с организацией распределённого производства и логистики;
- формулировке принципов интеграции цифровых двойников в полный жизненный цикл модульной платформы.

1 Теоретико-методологические основы модульной архитектуры в машиностроении

1.1 Системный подход и теория модульности

Модульность является фундаментальным свойством сложных систем, позволяющим управлять их сложностью за счёт декомпозиции, иерархической организации и слабой связанности компонентов. В контексте машиностроения теория модульности опирается на работы [1, 2], которые определяют модуль как функциональную единицу с чётко определёнными интерфейсами, чью внутреннюю структуру можно изменять независимо от остальной системы.

Для количественной оценки уровня модульности конструкции СКШ предлагается использовать комплекс показателей, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Количественные показатели оценки уровня модульности конструкции СКШТ

Группа показателей	Конкретный показатель (индекс)	Формула/Принцип расчёта	Целевое значение для эффективной МА
Конструктивно-технологические	Индекс унификации агрегатов (ИУ)	ИУ = (N_униф/N_общ)*100%, где N_униф – число унифицированных узлов, N_общ – общее число узлов	> 70%
	Индекс стандартизации интерфейсов (ИСИ)	Оценивается доля соединений, выполненных по отраслевым/корпоративным стандартам	> 90%
	Коэффициент связности модулей (КС)	КС = L / (n*(n-1)/2), где L – число необходимых межмодульных связей, n – число модулей	< 0,3 (низкая связность)
Экономические	Стоимость реконфигурации (СР)	Отношение затрат на замену модуля к стоимости нового специализированного изделия.	< 0,2
	Время переналадки производства (Тп)	Время на переход конвейера с выпуска одной модификации на другую.	Снижение на 60-80%
Эксплуатационные	Среднее время восстановления (*MTTR*)	Среднее время замены критического модуля в полевых условиях.	Снижение на 50% и более
	Коэффициент оперативной готовности (КОГ)	Вероятность того, что система будет работоспособна в произвольный момент времени.	> 0,95

1.2 Модель жизненного цикла модульной платформы

Внедрение МА трансформирует традиционную линейную модель жизненного цикла (ЖЦ) «проектирование-производство-эксплуатация-утилизация» в итеративно-циклическую. Формируется ядро – базовая платформа с длительным ЖЦ (10-15 лет и более), и набор сменных модулей с более коротким ЖЦ (3-7 лет), обновляемых по мере появления новых технологий или изменения требований.

Эта модель, известная как *Platform-Based Development* (*PBD*), детально исследована в работах [3, 4]. Её экономическая эффективность, как показано в исследовании [5], описывается функцией

$$Э_пбд = \int [C_пл(t) + \Sigma\, C_мод_i(t)]\, dt,$$

где Э_пбд – совокупные затраты по платформенной схеме,

С_пл – затраты на разработку и поддержку платформы,

С_мод_i – затраты на разработку i-го модуля.

При выпуске более 3-4 модификаций на одной платформе Э_пбд становится значительно ниже затрат по индивидуальной разработке.

2 Ретроспективный анализ: эволюция от агрегатной унификации к системной модульности

Эволюция подходов к созданию СКШТ демонстрирует последовательный поиск баланса между специализацией и гибкостью.

Этап I: Узкая специализация (1950-е – 1970-е гг.). Каждое шасси (например, для первых советских оперативно-тактических ракетных комплексов) проектировалось практически с нуля. Унификация носила случайный характер. Преимущество – максимальное соответствие тактико-техническим требованиям (ТТТ). Недостатки: колоссальные затраты, несовместимость, сложность ремонта. Уровень модульности (по Таблице 1) был близок к нулю.

Этап II: Агрегатная унификация и создание семейств (1970-е – 1990-е гг.). Осознание экономических ограничений привело к планомерной унификации ключевых агрегатов: двигателей, мостов, коробок передач, элементов рам. Яркий пример – отечественное семейство «Вощина-1» Брянского автомобильного завода. Принятие единого базового габаритного и силового формата (колёсная формула, мощность) позволило создать линейку шасси для военных (седельные тягачи для ПВО) и народно-хозяйственных задач (шасси для буровых установок) [6]. Это был прообраз платформы, где «модулем» являлось навесное целевое оборудование. ИУ для таких семейств мог достигать 40-50%.

Этап III: Концепция «материнского» шасси и функциональных контейнеров (1990-е – 2000-е гг.). Идея получила развитие в виде шасси-носителя с рамой, рассчитанной на установку стандартизированных функционально-технологических модулей (ФТМ) в виде контейнеров. Это повысило гибкость, но ограничивалось массогабаритными характеристиками контейнеров и сложностью инженерных сетей.

Этап IV: Цифровая революция и открытая модульность (2010-е гг. – по н.в.). Появление мощных средств CAD/CAE, стандартов цифрового обмена (STEP, JT), а также опыт боевого применения выявили необходимость более глубокой интеграции. Современная МА предполагает разделение на уровне крупных системных блоков с интеллектуальными интерфейсами, что и является предметом данного исследования.

3 Современная модульная архитектура СКШТ: элементы, интерфейсы и примеры

3.1 Ключевые элементы архитектуры

Базовая ходовая платформа (БХП). Фундамент системы. Включает несущую конструкцию, ходовую часть, базовую тормозную систему, топливные баки и систему универсальных интерфейсных узлов.

Энергетический модуль (ЭМ). Стремится к оформлению в виде «картриджа». Включает первичный двигатель, трансмиссию, генераторную установку. Исследования [6, 7] показывают растущую роль гибридных ЭМ.

Модуль управления (кабина). Превращается в съёмный защищённый модуль, например, *Modular Armoured Cabin* (*MAC*).

Миссионные (функциональные) модули. Определяют целевое назначение машины. Замена модуля должна занимать менее часа.

3.2 Система стандартизированных интерфейсов: технические и организационные аспекты

Успех МА на 90% определяется качеством проработки интерфейсов. Они делятся на несколько уровней:

Уровень 1: Физико-механические интерфейсы.

Стандартизированные силовые узлы крепления (*ISO*, ГОСТ), проушины, плоскости. Гарантируют точное позиционирование и восприятие нагрузок. Требуют высочайшей точности изготовления.

Уровень 2: Энергетические интерфейсы.

Быстроразъёмные соединения (БРС) для гидравлики высокого давления (стандарты SAE), пневмомагистралей, топливных систем. Электрические силовые разъёмы (например, для питания электромоторов платформы от ЭМ) и слаботочные разъёмы.

Уровень 3: Информационные (цифровые) интерфейсы.

Наиболее критичны. Включают протоколы обмена данными между модулями. Доминирующим стандартом является *CAN* (*Controller Area Network*), особенно его военная и коммерческая версия SAE J1939. Современные платформы переходят на Ethernet с высокой пропускной способностью (стандарт *TTEthernet* для жёстких требований реального времени) для передачи данных от датчиков, камер и систем управления оружием [9].

Уровень 4: Программно-логические интерфейсы (*API*).

Стандартизированные методы взаимодействия программных компонентов разных модулей (например, между системой управления двигателем и системой стабилизации вооружения).

Организационно, стандарты интерфейсов должны быть закреплены в межкорпоративных технических регламентах или в национальных/отраслевых стандартах.

3.3 Сравнительный анализ современных модульных платформ

Таблица 2 – Сравнение современных модульных платформ специальных колёсных машин

Платформа / Страна	Ключевой принцип модульности	Состав модулей	Стандарт информационного обмена	Время замены модуля
БТР *Boxer* (Германия / Нидерланды)	*Drive Module* + *Mission Module*. Полностью независимая разработка.	Ходовая часть с ЭМ и базовыми системами; сменный бронированный корпус-модуль.	*MIL*-стандарты, *CAN*	~1 час
Бронеавтомобиль *FNSS Pars* (Турция)	Гибридная архитектура. Сменные модули вооружения и спецоборудования.	Базовая БХП, ЭМ, центральная вычислительная система, модули вооружения.	*CAN J*1939	Не регламентировано (зависит от модуля)

Беспилотный носитель *Rheinmetall Mission Master* (Германия)	Платформа для автономности. Модульность для разных миссий (груз, разведка, ЭМП)	Шасси, пакет автономности, сменные надстройки-миссии	*Ethernet*, *ROS* (*Robot Operating System*)	< 30 мин.

4 Организация производства на основе модульной архитектуры

4.1 Экономические и организационные модели

Переход к МА влечёт за собой кардинальную реорганизацию производственной системы. Вертикально-интегрированный завод уступает место сети кооперации, управляемой головным интегратором.

Модель 1: «Интегратор-производитель платформы». Головное предприятие разрабатывает стандарты, производит БХП и осуществляет финальную сборку, интеграцию систем и испытания. Модули кабины и ЭМ поставляются специализированными партнёрами.

Модель 2: «Чистый интегратор». Предприятие разрабатывает архитектуру и стандарты, но закупает все модули, включая БХП, у субподрядчиков, фокусируясь на системной интеграции, продажах и сервисе.

Модель 3: «Консорциум». Несколько равноправных партнёров совместно владеют архитектурой и производят различные модули, сборка может быть распределена.

Организационно, стандарты интерфейсов должны быть закреплены в межкорпоративных технических регламентах или в национальных/отраслевых стандартах.

4.2 Технологические аспекты организации производства

Гибкое сборочное производство (ГСП): Конвейер заменяется на ячейки или гибкие линии, оснащённые роботизированными комплексами. Ключевую роль играет *MES*-система.

Цифровая цепочка создания стоимости: От цифровой модели изделия через планирование производства до эксплуатационных данных формируется сквозной цифровой поток. Это требует внедрения единой платформы *PLM*.

4.3 Контроль качества и логистика

Входной контроль модулей: Смещается акцент с контроля деталей на приёмосдаточные испытания готовых модулей у поставщика по единым, жёстким методикам.

Логистика: Требует решения для перевозки крупногабаритных, тяжёлых и высокотехнологичных модулей. Применяются специальные контейнеры, траверсы и транспортные платформы. Важен принцип *Just-in-Sequence* (*JIS*) – поставка модулей в последовательности, совпадающей с графиком сборки.

5 Интеграция цифровых двойников в жизненный цикл модульной платформы

Концепция цифрового двойника (*Digital Twin*), активно исследуемая в послед-

ние годы [10, 11], становится естественным продолжением и усилением МА. Цифровой двойник – это виртуальная динамическая модель физического изделия, синхронизированная с ним через потоки данных от датчиков и позволяющая моделировать, анализировать, прогнозировать и оптимизировать его поведение.

В контексте модульного СКШТ можно говорить о системе цифровых двойников:

- двойник модуля: Каждый физический модуль (ЭМ, кабина) имеет свою цифровую модель с историей производства, испытаний и эксплуатации.

- двойник конфигурации: Виртуальная модель конкретной сборки, используемая для проверки совместимости, виртуальных испытаний и обучения экипажа.

- двойник жизненного цикла: Агрегирует данные всех экземпляров платформы и её модулей для прогнозной аналитики: выявления слабых мест, оптимизации графика ТО, планирования модернизаций.

Как показано в работе [10], использование цифровых двойников на этапе проектирования позволяет на 40-50% сократить количество дорогостоящих физических прототипов. На этапе эксплуатации анализ данных двойников позволяет перейти от планового к предиктивному (прогнозному) техническому обслуживанию, предотвращая отказы.

6 Перспективы развития и стратегические рекомендации

6.1 Технологические перспективы:

Глубокая гибридизация и полная электрификация: Переход к ЭМ на топливных элементах или мощных аккумуляторах кардинально упростит силовую архитектуру, сделав платформу по сути «электрическим скелетом» с раздачей энергии и данных [6, 7].

Автономность как сменный модуль: Развитие, предсказанное в [14], ведёт к появлению стандартизированных «пакетов автономности» – модулей с набором сенсоров (лидары, радары, камеры) и вычислительных блоков, которые можно установить на любую платформу для превращения её в беспилотную.

Аддитивные технологии (3*D*-печать): Позволят оперативно производить уникальные элементы для адаптации стандартных интерфейсов под нестандартные модули или быстро восстанавливать вышедшие из строя детали интерфейсов в удалённых местах эксплуатации.

6.2 Организационно-экономические перспективы:

Формирование открытых экосистем: Развитие по аналогии с мобильными ОС, где утверждённые стандарты интерфейсов позволяют сторонним разработчикам создавать и сертифицировать свои миссионные модули для базовой платформы [15].

Сервисная бизнес-модель «Платформа как услуга» (*Platform-as-a-Service*): Заказчик (например, Минобороны) оплачивает не парк машин, а гарантированный уровень мобильности и функциональности. Интегратор отвечает за поддержание платформ в актуальном состоянии путём своевременной замены и обновления модулей.

6.3 Рекомендации для отечественного машиностроения

1) Инициировать разработку стандарта на модульную архитектуру СКШТ, включающего классификацию модулей, требования к интерфейсам.

2) Создать на базе ведущего КБ и завода-интегратора центр компетенций по модульной архитектуре.

3) Стимулировать формирование специализированных производителей модулей через механизмы госзаказа.

4) Инвестировать в опытно-экспериментальную базу для отработки технологий цифровых двойников и гибридных силовых установок.

Заключение

Модульная архитектура из перспективной концепции превратилась в необходимое условие выживания и конкурентоспособности в области создания специальных колёсных шасси и тягачей. Проведённый анализ показывает, что это комплексная трансформация, затрагивающая не только конструкцию машины, но и философию проектирования, организацию производства, логистику и подход к техническому обслуживанию.

Ключом к успеху является не столько разработка самих модулей, сколько создание и неукоснительное соблюдение системы жёстких стандартов на интерфейсы. Организация производства эволюционирует в сторону сетевой модели с головным интегратором, что требует развития компетенций системной инженерии и управления цепочками поставок.

Для Российской Федерации и научно-технического сообщества в области колёсных и гусеничных машин системное освоение принципов модульной архитектуры представляет собой стратегический императив.

Литература

1 Baldwin C.Y., & Clark, K.B. Design Rules: The Power of Modularity // MIT Press. 2000.

2 Ulrich K. The role of product architecture in the manufacturing firm // Research Policy, 1995.24(3). P. 419-440.

3 Simpson T.W., Siddique Z., Jiao J. Product Platform and Product Family Design: Methods and Applications // Springer. 2006.

4 Mikkola J.H. Capturing the degree of modularity embedded in product architectures // Journal of Product Innovation Management. 2006. №23(2). P. 128-146.

5 Fixson S.K. Modularity and commonality research: past developments and future opportunities // Concurrent Engineering. 2007. №15(2). P. 85-111.

6 Ehsani M., Gao Y., Emadi A. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles // CRC Press. 2019.

7 Lukaitis V.Yu., Glushkov S.Yu. Autonomous power generation facilities, hybrid structures comprising renewable energy sources // Power and Autonomous equipment. 2019. №2(2). P. 111-120.

8 Steiner W., Bauer G. TTEthernet: Time-Triggered Services for Ethernet Networks // IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. 2009.

9 Novak S., Eppinger S.D. Sourcing by design: Product complexity and the supply

chain // Management Science. 2001. № 47(1). P. 189-204.

10 Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. № 15(4). P. 2405-2415.

11 Derunets B.S., Filippova E.B. Graphic interface for digital double of chemical production // D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. 2023.

12 Ro Y.K., Liker J.K., Fixson S.K. Modularity as a strategy for supply chain coordination: The case of U.S. auto // IEEE Transactions on Engineering Management. 2007. № 54(1). P. 172- 189.

13 Fong T., Thorpe C., Baur C. Multi-Robot Remote Driving with Collaborative Control // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2003.

14 Gawer A., Cusumano M.A. Industry platforms and ecosystem innovation // Journal of Product Innovation Management. 2014. № 31(3). P. 417-433.

15 Актуальные проблемы проектирования и производства специальных колёсных машин // Сборник трудов НТЦ «Автомобильной техники». 2022.

16 Военная мысль (2020-2023). Журнал Министерства обороны РФ.

Таричко Вадим Игоревич – кандидат технических наук, начальник конструкторского комплекса, АО «НПО «Обуховский завод», г.Санкт-Петербург.

Область научных интересов: модульные платформы, специальные колёсные шасси, системный инжиниринг.

E-mail: vit@aa-kbsm.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

MODULAR ARCHITECTURE OF SPECIAL WHEELED CHASSIS AND TRACTORS DESIGN: SYSTEM ANALYSIS, DEVELOPMENT AND PRODUCTION ORGANIZATION

The article presents a comprehensive system analysis of the evolution, current state and strategic prospects of modular architecture (MA) in the design and production of special wheeled chassis and tractors (SWCT). A retrospective analysis of the transition from specialized monoblock structures to unified dual-purpose platforms and open modular systems with functional adaptability is carried out. Based on a comparative study of modern foreign and advanced domestic projects, the key elements of MA are identified: basic running platform, power module, control module and replaceable mission modules. The issues of standardization of physical, electrical and information interfaces as the basis for industrial cooperation are considered in detail. Mathematical models are proposed to assess the technological and economic efficiency of the modular approach at different stages of the life cycle. Organizational models of distributed production are analyzed. Development prospects are linked to the convergence of Industry 4.0 technologies: introduction of digital twins, hybrid-electric power plants, and autonomy elements. It is concluded that modular architecture is a system-forming factor ensuring technological sovereignty and economic efficiency.

Keywords: modular architecture; special wheeled chassis and tractors; platform; interface standardization; digital twin; production organization; life cycle; hybrid power plant; autonomy.

Tarichko Vadim Igorevich - Deputy General Designer - Head of Design Complex No. 4 - Chief Designer for Special Wheeled Chassis and Tractors, JSC "NPO "Obukhovskiy zavod".

Research interests: modular platforms, special wheeled chassis, systems engineering.

УДК 629.783

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МАЛЫМ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ, ПОДВЕШЕННЫМ НА МАГНИТНОМ ПОДВЕСЕ

Федоринов А.Ю., Марченко Б.И., Епринцев М.А.

Исследование влияния созданного магнитного подвеса на системы малого космического аппарата, изучение особенностей его работы систем ориентации и стабилизации, исходя из особенностей подвеса. Получены экспериментальные данные с систем ориентации аппарата, позволяющие сказать, что влияние данного подвеса не будет вносить существенные искажения в работу его систем. Предлагаемый магнитный подвес имеет ряд преимуществ относительно простых методов подвешивания аппаратов в лабораторных условиях. Полученные в ходе работы данные подтверждают целесообразность применения.

Ключевые слова: алгоритмы стабилизации и ориентации; магнитный подвес; малый космический аппарат.

Введение

Предлагается исследовать особенности алгоритмов стабилизации и ориентации МКА, подвешенного на магнитном подвесе, оценить влияние данного подвеса на системы спутника и особенности программного кода, написанного под задачи ориентации с учетом возмущающих факторов.

Следует рассмотреть основные способы ориентации МКА, используются такие системы, как:

1) Датчик угловой скорости. Датчик угловых скоростей (ДУС) предназначен для измерения угловой скорости вращающегося объекта [1]. Измерять угловую скорость необходимо для того, чтобы можно было остановить вращение спутника – стабилизировать его. Также, используя данные, полученные от датчика угловой скорости, возможно задавать спутнику вращение с определенной скоростью.

Принцип работы датчика угловой скорости. Основным измерительным элементом датчика угловой скорости является специальный микроэлектромеханический (МЭМС) гироскоп. Это не обычный гироскоп, в котором с большой скоростью вращается диск, а миниатюрный вибрационный. Внутри МЭМС гироскопа есть кольцо, которое колеблется в одной плоскости (рисунок 1). Если такой гироскоп поставить на вращающуюся платформу, плоскость которой совпадает с плоскостью колебаний кольца, то на нее начнет действовать сила Кориолиса пропорциональная скорости вращения платформы. Сила Кориолиса измеряется с использованием пьезоэлементов, которые выдают напряжение, пропорциональное приложенной силе.

2) Магнитометры – эти приборы измеряют магнитное поле Земли, что позволяет определить ориентацию аппарата относительно магнитного поля планеты.

Принцип работы магнитометра. Работа магнитометра основана на применении

магниторезистивного эффекта, когда электрическое сопротивление проводника изменяется в соответствии с направлением линий магнитного поля [2]. В основе датчика лежит слой пермаллоя (специального сплава никеля с железом), который обладает сильным магниторезистивным эффектом. Электрическое сопротивление пермаллоя меняется обычно в пределе ±5 % в зависимости от силы и направления действующего магнитного поля.

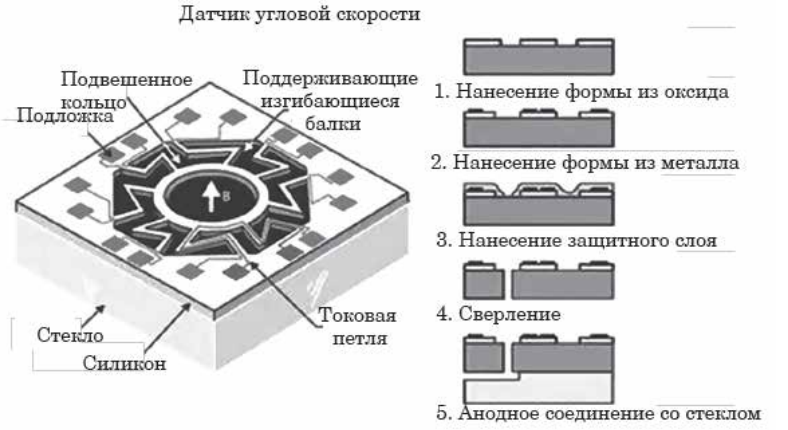


Рисунок 1 – Строение ДУС

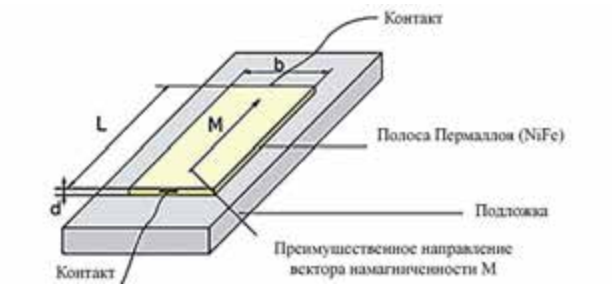


Рисунок 2 – Конструкция магнитометра

Таким образом, измеряя силу тока, протекающего через слой пермаллоя при подаче постоянного напряжения +5В можно определить направление линий магнитного поля. Для того чтобы измерить направление магнитных линий по всем трем осям используют три маленьких датчика, ориентированных по осям X, Y и Z, установленные в одной микросхеме.

3) Солнечные датчики - исследуют положение Солнца относительно аппарата и используются для ориентации с помощью солнечных панелей, что позволяет оптимально нацелить их на Солнце для получения энергии.

Существуют различные типы датчиков солнца, которые различаются по своей технологии и эксплуатационным характеристикам [3]. Датчики присутствия Солнца выдают двоичный выходной сигнал, показывающий, когда Солнце находится в поле зрения датчика. Аналоговые и цифровые солнечные датчики, напротив, указывают угол наклона Солнца с помощью непрерывного и дискретного сигнала на выходах соответственно.

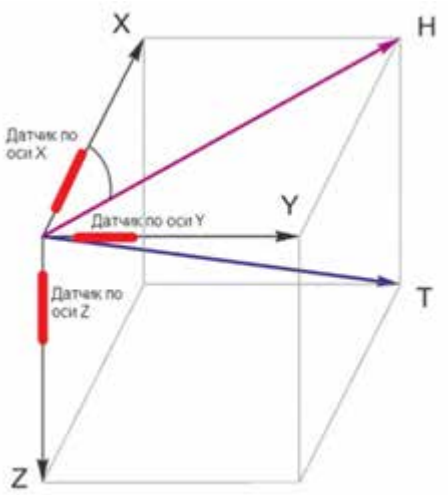


Рисунок 3 – Направление осей магнитометра



Рисунок 4 – Внешний вид типового фоторезистора

4) Астрономические методы. Использование звездных датчиков, которые фиксируют положение звезд, помогает определить ориентацию аппарата относительно звездного фона [4]. Это позволяет получить точные данные о ориентации в пространстве.



Рисунок 5 – Современный миниатюрный звездный датчик

Под исполнительными устройствами могут выступать:

1) Двигатели – маховики (ДМ), они являются исполнительными органами и предназначены для создания управляющих моментов относительно центра масс КА [5]. Конструктивно ДМ обычно выполняется в виде двух блоков:

- блока механики, в котором расположены маховик, двигатель привода маховика, датчик положения ротора и датчик скорости;

- блока электроники, в котором расположены два комплекта схем электроники для управления и контроля функционированием ДМ.

Двигатель привода маховика представляет собой бесконтактный электродвига-

тель с постоянными магнитами. Датчик положения ротора служит для воспроизведения синусной зависимости выходного сигнала в функцию угла поворота ротора датчика момента и представляет собой бесконтактный вращающийся трансформатор. Датчик скорости служит для снятия информации о частоте вращения ротора и представляет собой дифференциальный индуктивный датчик. Блок электроники ДМ осуществляет регулирование электромагнитного момента и обеспечивает прием, формирование и выдачу управляющих и телеметрических сигналов. Блок обработки сигналов служит для формирования сигнала скорости и знака вращения маховика. Регулятор тока осуществляет регулирование напряжения, подводимого для питания обмотки возбуждения датчика положения ротора. Автономный источник питания осуществляет питание узлов блока электроники стабилизированным напряжением. Фильтр осуществляет сглаживание пульсаций по цепи источника питания.

Принцип работы ДМ: управляющее напряжение поступает на усилитель входного сигнала, где преобразуется в фазопеременный сигнал с регулируемой амплитудой, усиливается по мощности и поступает на обмотку возбуждения датчика положения ротора, образующийся электромагнитный момент приводит в движение маховик, который создает кинетический момент. Выходные сигналы демодулируются в регуляторах тока и поступают на устройство сравнения. Далее выходные сигналы сравниваются с сигналом обратной связи по току, предварительно усиленным. Выходной сигнал элемента сравнения задает значение фазных токов соответственно значению и знаку управляющего напряжения, изменение полярности приводит к изменению направления тока в фазах двигателя и, следовательно, к реверсу момента двигателя.

2) Двигатели малой тяги для МКА [6]. В отличие от классических двигателей основанных на сгорании веществ, для МКА в невесомости возможно использовать двигатели с относительно малой тягой, для придания небольших моментов или импульсов, но достаточных для изменения своего положения в невесомости или придания необходимых скоростей по направлениям. Ниже целесообразно отметить последние достижения в данном вопросе:

Двигатели типа Холла [7]. Используют замкнутый дрейф электронов, отличаются высокой плотностью тяги и удельным импульсом.

Ионные двигатели [8]. Ускоряют ионы за счёт высокого электрического потенциала, приложенного к металлической сетке. Отличаются низкой плотностью тяги, но очень высоким удельным импульсом.

Двигатели импульсного типа и постоянного тока [9]. Используют электрический разряд между двумя электродами для ускорения плазмы как целостной среды.

Электрораспылительные двигатели [10]. Тяга создаётся путём приложения электростатического напряжения к электрораспылительным излучателям, которые ускоряют жидкое топливо, выходящее из капилляра небольшого диаметра.

Печатные двигатели [11]. Имеют плоскую геометрию из двух или более концентрических электродов, нанесённых металлическими чернилами на диэлектрическую пластину, обычно тонкую гибкую полимерную плёнку.

Маневровые двигатели для сверхмалых космических аппаратов. В апреле 2024 года сообщалось, что учёные из Рязанского государственного радиотехнического университета разработали маневровые двигатели для сверхмалых космических аппаратов. Эти устройства предназначены для пикоспутников, фемтоспутников и адо-

спутников, вес которых составляет от нескольких граммов до килограмма. Двигатели представляют собой матричную структуру из крошечных ячеек, каждая из которых содержит несколько зарядов твёрдого топлива [12]. Они управляются командами в виде двоичного кода, что позволяет регулировать направление, скорость и дальность перемещения спутника.

3) Управление МКА путем изменения положений солнечных панелей. Теоретически возможно управлять положением спутника путем перемещений или ориентации солнечных панелей, приводимых в движения шаговыми двигателями, данный метод малоэффективен, но возможен [13].

1 Описание особенностей лабораторной установки

При испытании МКА в лабораторных условиях накладывается ряд ограничений, вызванный конструкций стендов и установок:

1 Сложность имитация невесомости на Земле. Необходимо сказать, что для рядовых институтов, лабораторий это практически невозможно.

2 Ограничение степеней свободы МКА даже на самых продвинутых подвесах.

3 Действие множества возмущающих факторов на МКА в простых лабораторных условиях, начиная от электромагнитных помех, заканчивая движением воздушных масс.

Один из самых простых и распространённых методов подвешивания – подвес на длинную тонкую нить, с жестким креплением ее концов к спутнику и стенду соответственно (показан на рисунке 8). Следующий (доработанный) вариант такого же подхода – использование каких-либо подшипников в креплении на стенде или спутнике, их использование (как вариант, поворотных подшипников) позволяет осуществлять незатрудненный поворот МКА [14].

Предлагаемый и разработанный третий вариант на данный момент – магнитный подвес (на постоянных магнитах, показан на рисунке 8). Предполагается что использование сил взаимодействия данных магнитных компонентов позволит ослабить действие паразитных сил и моментов на подвес аппаратов. Пример постоянных магнитов, используемых в составе установке показан на рисунке 8, магниты способны выдерживать нагрузку до 10 кг.



Рисунок 6 – Магнитные элементы подвеса

В конечном итоге лабораторный стенд для отработки алгоритмов управления, стабилизации и ориентации МКА будет иметь вид, показанный на рисунке 7.



Рисунок 7 – Фотография созданного магнитного подвеса для МКА с одной степенью свободы



Рисунок 8 – Фотография лабораторной установки с двумя МКА на разных подвесах (магнитным и ниточным)

На фотографиях также отчетливо видны блоки, из которых состоит современный МКА.



Рисунок 9 – Фотография конфигурации аппарата, участвующего в опыте

На рисунке 9 продемонстрирован спутник ОрбиКрафт, где (по модульно) 1 – УДМ (одноосный), 2 – модуль полезной нагрузки (ПН), 3 – модуль дистанционного зондирования земли (камера) и УКВ передатчик, 4 – бортовой вычислительный модуль, 5 – солнечный датчик (необходим для ориентации на солнце), 6 – система электропитания (включает в себя блок аккумулятора). Считается, что данный минимальный набор модулей позволяет в своей комплектации выполнять базовые задачи, предъявляемые к спутнику. Модульная конструкция позволяет при необходимости расширять возможности аппарата путем добавления новых систем или ПН. Однако, необходимо также отметить, что для корректного функционирования систем спутника необходимо выполнить калибровку датчиков или целых модулей, непосредственно установленных на борт аппарата при полной сборке его частей (полная сборка изделия – готовое к запуску, при успешной отработки кода и прохождения испытаний) [15].

Исходя из данной компоновки МКА вытекают и задачи, которые необходимо решить в процессе испытаний и перед вводом в эксплуатацию. А именной провести калибровку мемс датчиков: ДУС и магнитометра. Калибровка MEMS-датчиков, в том числе акселерометров и магнитометров, необходима для повышения точности работы систем ориентации мобильных объектов.

Для акселерометров главным источником погрешностей считают конструкцию самого датчика [16]. Также к погрешностям относят рассогласование показаний из-за неточного размещения на плате, смещение системы координат сенсора относительно системы координат платы и неединичный масштаб осей.

Для магнитометров основными источниками погрешностей являются [17]:

- магнитное наклонение, которое обусловлено особенностью магнитного поля Земли.

- искусственные поля вокруг датчика, которые создают, например, магниты двигателей, провода питания, аккумуляторные батареи и другие.

- искажения, вызванные наличием ферромагнитных материалов рядом с датчиком, таким как корпус двигателя, проводка, металлические болты крепления.

- при калибровке магнитометра нужно учитывать разницу между географическим и магнитным полюсами, которая зависит от местоположения, в котором проводится измерение. Чтобы устранить эти различия, к показаниям датчика необходимо прибавить или вычесть определённый угол, называемый магнитным склонением.

Для калибровки используют, например, метод наименьших квадратов, который позволяет минимизировать сумму квадратов отклонений экспериментальных точек от эталонных. Также применяют специальный ручной полноповоротный стенд, который обеспечивает коррекцию погрешностей выходных сигналов *MEMS*-датчиков.

2 Описание процесса стабилизации и ориентации

Алгоритмы стабилизации и ориентации в данном случает работают за счёт получения информации с магнитометра и ДУС.

Датчик угловой скорости предназначен для измерения угловой скорости вращающегося объекта. С его помощью можно остановить вращение спутника, то есть стабилизировать его.

Магнитометр даёт информацию об ориентации. Данные об угле нужны для того, чтобы разворачивать спутник в необходимую сторону. А информация об угловой скорости необходима для стабилизации спутника, то есть погашения углового вращения.

Алгоритм ориентации и стабилизации по магнитному полю включает следующие функции [18]:

- запуск магнитометра для снятия тестовых показаний.

- корректировка снятых показаний в соответствии с калибровочной матрицей.

- расчёт угла отклонения спутника от необходимого положения относительно магнитного поля.

- расчёт направления, угла поворота и скорости вращения спутника, а также корректировка результата после достижения требуемого положения.

Основой алгоритма ориентации по магнитному полю является совмещение целевого вектора магнитного поля с вектором реального поля.

Из выше сказанного следует, что корректные показания с магнитометра важны как для калибровки датчика в составе МКА, так и для корректной работы системы ориентации в процессе выполнения целевой задачи. Следовательно, необходимо изучить влияние созданного магнитного подвеса на системы и алгоритмы управления, стабилизации и ориентации МКА, находящегося на данном подвесе.

В качестве исследования будут собраны данные с магнетометра МКА, установленного на два разных подвеса. Иными словами, предполагается оценить влияние магнитного подвеса на показания датчика магнитометра. Некоторые особенности подвесов, влияющих на алгоритмы управления:

1 – «примитивный» механический подвес на нити или штанг с подшипниками: подразумевается, что данный подвес не будет влиять на показание магнитометра, однако, при написании кода управления поворотом, требуется учесть нестабильность

аппарата, появляющееся вследствие остаточного натяжения нити и/или инерции саморазворота МКА.

2 – конструкция на магнитном подвесе: необходимо оценить влияние данного конструкторского решения на показания магнетометра. Что касается особенностей алгоритмов управления для поворота подвешенного образца, из-за свободного незатрудненного вращения, алгоритмы максимально приближены к реальным в условиях полета.

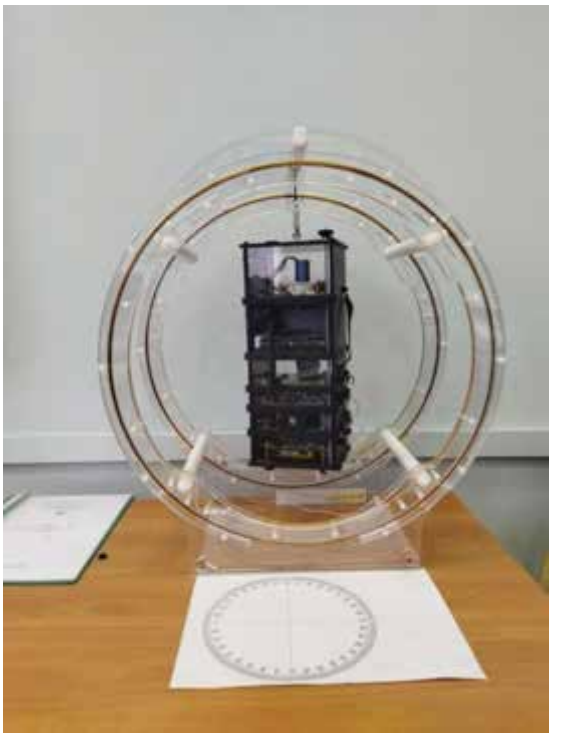


Рисунок 10 – Фотография МКА, помещенного внутрь установки, позволяющей имитировать магнитное поле Земли

3 Результаты полученные с систем ориентации по магнетометру

Данные, полученные в результате экспериментов, представлены в таблицах.

Таблица 1 – Сырые данные с магнитометра помноженные на 10^{-4} (для удобства восприятия) полученные с МКА подвешенного на нить

Поворот, °	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Значение выдаваемые магнитометром повторение №1	581	133	910	961	745	634	523	568	187
2	562	153	908	962	746	639	521	561	185
3	551	144	904	965	744	637	525	560	187
4	573	134	907	968	750	620	530	559	190
5	585	142	1001	958	752	621	531	570	188

Таблица 2 – Сырые данные с магнитометра помноженные на 10^{-4} (для удобства восприятия) полученные с МКА подвешенного на магнитный подвес

Поворот, °	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Значение выдаваемые магнитометром повторение №1	588	145	917	970	748	644	532	571	195
2	570	157	915	965	764	638	548	569	187
3	590	151	923	968	734	641	545	567	188
4	575	143	987	960	745	635	529	558	189
5	565	139	999	959	761	636	534	567	190

Проанализировав данные, и найдя средние значения для углов поворота за пять повторений, возможно сравнить полученные значения, результаты представлены на рисунке 11.

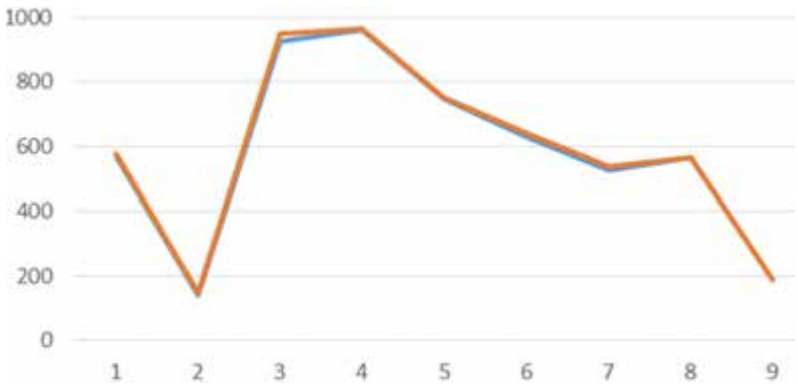


Рисунок 11 – Средние значения данных полученных с магнитометра для двух типов подвесов

Как видно из рисунка 11, влияние подвеса наблюдается, однако оно не существенное, также необходимо понимать, что играет роль и чувствительность устройства при разных углах поворота, что будет исследоваться в дальнейших исследованиях.

Заключение

Рассматривая особенности управления МКА, испытание его систем стабилизации и ориентации на разработанном магнитном подвесе, были получены следующие результаты:

1) Использование магнитов в качестве подвеса позволяет беспрепятственно осуществлять поворот спутника вокруг желаемой оси, и в отличие от классической нити – не будет иметь остаточное натяжение из-за закрутки.

2) Предлагаемое решение подвеса не будет оказывать влияние на ДУС модуля ориентации, так как его физическая природа измерений не завязана на магнитных полях, создаваемыми постоянными магнитами.

3) Существующие вокруг постоянных магнитов магнитные поля не существенно влияют на показания магнитометра, и могут быть учтены при калибровке систем, перед испытаниями.

4) Применение данной технологии подвешивания позволяет разгрузить элементы подвеса от паразитных сил, в частности от моментов трения, однако теоретический расчёт «сопротивления» подвеса на магнитах и подшипниках еще предстоит провести.

При подготовке статьи авторы использовали результаты исследований НИР “Развитие систем относительной навигации и управления конфигурацией группы малых спутников для решения содержательных задач мониторинга и связи”, выполняемых по госзаданию в ГУАП, а также материалы, полученные в рамках реализации проекта развития ГУАП Приоритет-2030.

Литература

1 Фирсов С.Н. Обеспечение функциональной устойчивостью стабилизации и ориентации космического аппарата // SR. 2014. №1.

2 Петров Р.В., Леонтьев В.С. Магнитоэлектрический магнитометр // Вестник НовГУ. 2013. №75.

3 Дюльдин Руслан Сергеевич, Блинов Валентин Дмитриевич Малогабаритный двухкоординатный датчик положения Солнца с увеличенным полем зрения // Вестник СГАУ. 2012. №4 (35).

4 Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Автономная астрономическая система навигации и слежения // Приборостроение. 2015. №8.

5 Жумаев З.С. Математическая модель маневрирующего наноспутника с гелиотермической двигательной установкой и маховичной системой ориентации и стабилизации // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. №5 (113).

6 Вавилов И.С., Лукьянчик А.И., Ячменев П.С., Литау Р.Н., Кузьменко И.А. Дилатометрический микродвигатель малого космического аппарата с резонансным СВЧ-ускорителем // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». 2018. №4.

7 Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2009. С. 208.

8 Тимохович А.С., Савык А.Я. Ионные двигатели // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. №14.

9 Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель с разделенным механизмом ионизации и ускорением рабочего тела // Труды МАИ. 2012. №52.

10 Редько С.В., Чубенко Е.Б., Бондаренко В.П., Никифоров И.В., Краков М.С. Математическое и натурное моделирование режимов работы капиллярного эмиттера электростатического коллоидного микродвигателя // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2024. №3.

11 Талабанова Н.Е., Масягина Д.А., Смелов Д.А. Разработка модели беспилотного летательного аппарата с применением двигателей на основе печатных плат // Вестник науки. 2023. №12 (69).

12 Новосельцев Д. А. Разработка и испытания прототипов импульсных двигателей с внешними источниками энергии для космических аппаратов фемтокласса на базе концепции кинетических реактивных двигателей с возможностью использования космического мусора // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли: Материалы 15-й Всероссийской НТК, посвященной памяти гл. конструктора ПО «Полёт» А.С.Клинышкова. Омск, 2021. С. 22-25.

13 Еленев В.Д., Титов Б.А., Давыдов Е.И., Давыдов И.Е., Кочян А.Г., Юдинцев В.В. Исследование динамики малого космического аппарата с учётом воздействия упругих колебаний конструкции присоединённых панелей солнечных батарей и аэродинамического момента // Вестник СГАУ. 2015. №1.

14 Игрицкий В.А., Майорова В.И. Особенности разработки модульных аппаратно-программных комплексов полунатурного моделирования систем управления и навигации малоразмерных космических аппаратов // Машиностроение и компьютерные технологии. 2011. №13.

15 Федоринов А.Ю. Исследование особенностей программного кода для системы ориентации и стабилизации малого космического аппарата // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXVII Международной научной конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 03-07 июня 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. С. 252-255.

16 Аксенов В.В. Инструментальные средства для экспериментального построения модели погрешностей МЭМС акселерометра // ИВД. 2020. №11 (71).

17 Кулигин М.Н. Интегрирующие устройства в измерительных трактах индукционных магнитометров и анализ их погрешности интегрирования // РТС. 2018. №3 (31).

18 Федоринов А.Ю., Перлюк В.В. Разработка системы управления движением малых космических аппаратов в группе на основе методов имитационного моделирования // Навигация и управление движением : Материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 15-18 марта 2022 года. Санкт-Петербург: «Электроприбор», 2022. С. 184-185.

Федоринов Алексей Юрьевич – старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г.Санкт-Петербург.
Область научных интересов: малые космические аппараты, радионавигационные системы и комплексы.
E-mail: fedorinov.aleksey@mail.ru

Епринцев Михаил Александрович – аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г.Санкт-Петербург.
Область научных интересов: малые космические аппараты, радионавигационные системы и комплексы.
E-mail: noltar12@mail.ru

Марченко Борис Иванович – профессор, доктор технических наук, профессор, АО «НПО «Обуховский завод», г.Санкт-Петербург.
Область научных интересов: радионавигационные системы и комплексы, радиопередающие устройства.
E-mail: navybim@mail.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

INVESTIGATION OF THE FEATURES OF CONTROL ALGORITHMS FOR A SMALL SPACECRAFT SUSPENDED ON A MAGNETIC SUSPENSION

The study of the effect of the created magnetic suspension on the systems of a small spacecraft, the study of the features of its orientation and stabilization systems, based on the characteristics of the suspension. Experimental data from the orientation systems of the device have been obtained, which allow us to say that the influence of this suspension will not significantly distort the operation of its systems. The proposed magnetic suspension has several advantages over relatively simple methods of hanging devices in the laboratory. The data obtained in the course of the work confirms the expediency of the application.

Keywords: stabilization and orientation algorithms, magnetic suspension, small spacecraft.

Alexey Fedorinov – Senior Lecturer, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,Saint Petersburg.
Research interests: small spacecraft, radio navigation systems and complexes.

Mikhail Alexandrovich Eprintsev – Postgraduate Student, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg.
Research interests: small spacecraft, radio navigation systems and complexes.

Boris Ivanovich Marchenko – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor, JSC «NPO «Obukhov Plant», Saint Petersburg.
Area of scientific interests: radio navigation systems and complexes, radio transmitting devices.

УДК 621.396.6: 623.746.4.

СПОСОБ ЗАЩИТЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КОПТЕРНОГО ТИПА ОТ УЗКОНАПРАВЛЕННОГО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

Терешин С.Н., Андрющенко М.С.

В работе предлагается способ защиты беспилотных летательных аппаратов от мощного электромагнитного воздействия, основанный на автоматическом обнаружении угрозы посредством многоканального анализа сигналов. Новизна подхода заключается в мониторинге электромагнитной обстановки с помощью бортовых сенсоров и последующем адаптивном перепланировании полетного задания для обхода источника излучения или возврата к месту вылета.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; защита от электромагнитного излучения; сверхширокополосный импульс; адаптивная траектория; искусственный интеллект; машинное обучение; электромагнитная обстановка; активная защита.

Введение

Настоящее время характеризуется стремительным развитием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Возможности современных БПЛА позволили расширить область их применения не только для гражданских целей, но и для военных задач. В связи с широким применением БПЛА в военной области, начались интенсивные научные исследования в области противодействия им. Как следствие последовали работы и по повышению их защищенности, например по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) БПЛА (при использовании в условиях сложной электромагнитной обстановки) [0-0]. Для противодействия БПЛА используют различные методы, включая средства огневого поражения (противовоздушной обороны), радиоэлектронного подавления критических систем БПЛА, а также функциональное поражение (ФП) мощным электромагнитным излучением (ЭМИ). Последний способ является наиболее перспективным, поскольку позволяет миновать недостатки комплексов противодействия БПЛА, основанных на обычном радиоэлектронном подавлении (используемых, например, для вскрытия и подавления каналов навигации, управления и радиосвязи БПЛА), связанные с отсутствием однозначной реакции БПЛА на подавление. Функционируют средства ФП как правило с использованием различных источников мощного электромагнитного излучений.

Так, высокая мощность создаваемого ЭМИ и сложность обеспечения его «избирательности» в отношении поражаемых радиоэлектронных средств (РЭС) способны ухудшить электромагнитную обстановку внутри радиоэлектронного комплекса (РЭК) БПЛА [0]. Поэтому остро стоит вопрос повышения защищенности собственных БПЛА, попадающих в зону воздействия ЭМИ как своих средств противодействия, так

и средств поражения противника.

Традиционные методы защиты основываются на пассивных экранирующих решениях, включающих использование специализированных покрытий на основе композитных материалов с улучшенными электромагнитными характеристиками. Исследования показывают, что применение восстановленного оксида графена (*RGO*) для экранирования корпуса БПЛА обеспечивает эффективную защиту электроники в частотном диапазоне от 100 МГц до 10 ГГц. Кроме того, широко используются электропроводящие силиконовые прокладки с металлическими наполнителями (никель-алюминий, серебро-медь), которые обеспечивают как ЭМИ-экранирование, так и герметизацию корпуса [0].

Активные методы защиты включают применение адаптивных частотно-селективных систем и алгоритмов адаптивной перестройки частоты. Разработанные специалистами Военной академии связи адаптивные антенные решетки позволяют дронам поддерживать связь даже при воздействии направленных помех, динамически изменяя характеристики излучения в зависимости от уровня и направления помех. Современные исследования в области адаптивной перестройки частоты (*Adaptive Frequency Hopping*) демонстрируют возможность использования алгоритмов машинного обучения для оптимизации схем переключения частот в реальном времени [0].

Перспективным направлением является интеграция многоканальных систем обнаружения и анализа электромагнитной обстановки с возможностями прогнозирования воздействия ЭМИ на критически важные подсистемы БПЛА. Экспериментальные исследования на модели *DJI Phantom* 4 показали, что наиболее уязвимыми к воздействию ЭМИ являются длинные силовые кабели, соединяющие двигатели с контроллерами скорости (*ESC*), которые выступают в роли антенн. Это открывает возможности для разработки специализированных экранированных кабельных систем и оптимизации компоновки бортовой электроники [0].

Вместе с тем анализ существующих решений выявляет их ограничения в условиях воздействия узконаправленного сверхширокополосного электромагнитного импульсного излучения (СШП ЭМИ) высокой мощности. Статические методы защиты не обеспечивают адаптивного реагирования на изменяющиеся характеристики электромагнитной угрозы, а существующие адаптивные системы не согласованы с маневренными возможностями БПЛА. Это вызывает необходимость разработки нового подхода, объединяющего многоканальный анализ параметров ЭМИ, интеллектуальные алгоритмы принятия решений и использование маневренных характеристик летательных аппаратов для динамической пространственной защиты путем адаптивного изменения траектории полета.

1 Способ защиты БПЛА от узконаправленного СШП ЭМИ

В данной работе, предлагается способ защиты БПЛА от узконаправленного СШП ЭМИ, сущность которого заключается в автоматическом обнаружении опасного излучения посредством многоканальной частотно-разнесенной обработки сигналов. При идентификации критического сочетания амплитуды и частоты БПЛА выполняет круговое сканирование пространства для регистрации диаграммы электромагнитной обстановки, на основе которой осуществляется адаптивное перепланирование траектории полета в обход источника угрозы или возврат на точку взлета.

Прием сигнала ведется с нескольких дополнительных направлений антеннами, разнесенными по углу в горизонтальной плоскости. Принятый сигнал в виде сверхширокополосного импульсного напряжения последовательно ограничивают по амплитуде, уменьшают в делителе напряжения, после чего подают на входы нескольких частотно разнесенных каналов усиления и обработки, в каждом из которых производят соответствующее выбранному диапазону частот ослабление сигнала, его частотную селекцию в выбранных смежных частотных диапазонах, усиление и аналого-цифровое преобразование, по результатам которого определяют частоту и амплитуду принятого антенной сверхширокополосного импульсного электромагнитного излучения, после чего указанные величины направляют в вычислитель. Вычислитель определяет наличие критического сочетания «частота-амплитуда» с учетом получаемых по каналам приема и обработки сигналов, сопоставляя с обновляемой базой данных по критическим значениям, запрограммированной в вычислителе. При достижении этого значения вычислитель формирует команду на зависание и разворот на угол 360 градусов в горизонтальной плоскости. В процессе разворота сигналы с выходов вычислителя поступают на блок формирования электромагнитной обстановки, в котором обрабатываются сигналы со всех каналов приема при повороте БПЛА. Возможность такого формирования обеспечивается за счет подачи в этот блок информации о текущем угле поворота БПЛА. Таким образом строится круговая диаграмма электромагнитной обстановки вокруг БПЛА. При этом учитываются и усредняются сигналы со всех антенн, что позволяет сгладить влияние формы их диаграмм направленности. Исходя из вида диаграммы и координат точки назначения блок искусственного интеллекта прокладывает маршрут, избегая движения в направлении опасного излучения. Указанный маршрут вводится в бортовую систему управления, которая управляет работой приводов винтомоторной группы. Если на основе информации об остаточном полетном ресурсе, получаемой с бортовой системы управления, блок искусственного интеллекта делает вывод о невозможности реализации оптимального маршрута к цели, то он определят маршрут движения к точке взлета и вводит соответствующее полетное задание в бортовую систему управления.

2 Устройство защиты БПЛА коптерного типа от узконаправленного СШП ЭМИ

Последовательность действий вышеописанного способа, реализована в виде устройства защиты БПЛА [0], схема которого представлена на рисунке 1.

Устройство защиты представляет собой установленные на борту БПЛА разнесенные по углу в горизонтальной плоскости антенны 1, последовательно соединенные через соответствующие ограничители 2 с соответствующими делителями напряжения 3, при этом выходы каждого делителя напряжения 3 через соответствующие последовательно соединенные аттенюаторы 4, полосовые фильтры 5, логарифмические усилители 6 и аналого-цифровые преобразователи 7 соединены с соответствующими входами вычислителя 8, первый выход которого соединен с бортовой системой управления 9, а второй выход вычислителя 8 – через блок формирования электромагнитной обстановки 10 с блоком искусственного интеллекта 11, выход которого соединен с бортовой системой управления 9, при этом выходы бортовой системы управления 9 соединены с блоком формирования электромагнитной обстановки 10 и

приводами винтомоторной группы 12.

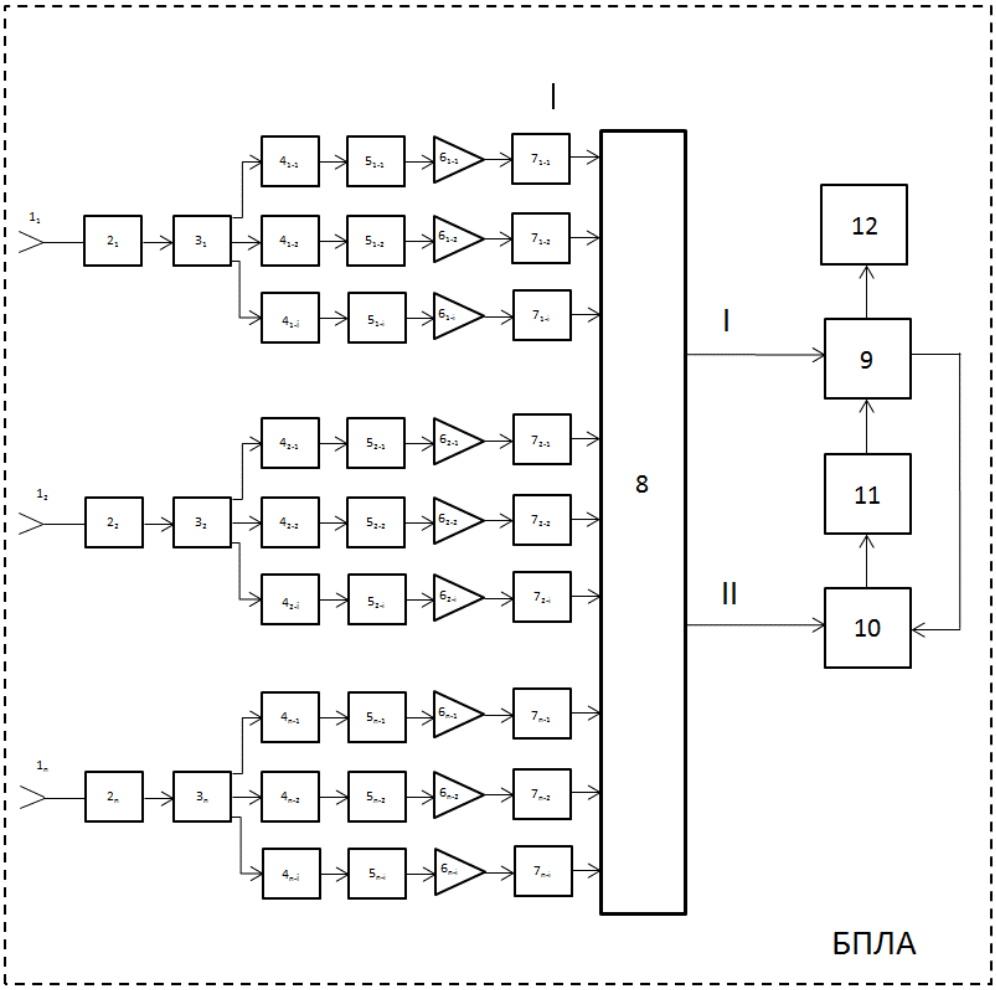


Рисунок 1 – Схема устройства защиты БПЛА коптерного типа от узконаправленного СШП ЭМИ

Основным ключевым компонентом системы защиты БПЛА коптерного типа является блок искусственного интеллекта 11, который реализует интеллектуальный анализ электромагнитной обстановки для динамического формирования безопасного маршрута полета.

Архитектура блока основана на четырехуровневой иерархической структуре, включающей сенсорный интерфейс для предварительной обработки данных электромагнитной обстановки, аналитический модуль для кластеризации опасных зон и прогнозирования динамики излучения, модуль принятия решений для оптимизации траектории полета и исполнительный модуль для формирования управляющих команд бортовой системе. Входными данными блока служат круговая диаграмма распределения излучения, *GPS*-координаты БПЛА и точки назначения, параметры остаточного полетного ресурса, что обеспечивает комплексную оценку текущей ситуации для принятия обоснованных решений о маршруте.

Функциональная основа блока построена на гибридном подходе, сочетающем методы обучения с подкреплением [0-0] и графовые алгоритмы поиска кратчайшего пути. Реализуемый алгоритм обеспечивает адаптивное принятие решений в изменяющихся условиях электромагнитной обстановки, максимизируя функцию награды за успешное избежание опасных зон излучения при минимизации энергозатрат на выполнение маневра. Система наград включает положительные значения за время нахождения вне критических зон (+100 за шаг), штрафы за попадание в область излучения (-500) и корректировки за превышение энергопотребления (-50), что обеспечивает комплексную оптимизацию траектории по критериям безопасности и энергоэффективности.

Процесс обучения блока реализуется в рамках трехэтапной схемы, включающей начальную фазу исследования среды (10^4 эпизодов), основную фазу тонкой настройки политики (10^5 эпизодов) и финальную валидационную фазу (10^3 эпизодов). Критерий сходимости определяется стабилизацией средней награды за эпизод в пределах ±5% на протяжении 500 последовательных итераций, что гарантирует надежность принимаемых решений в условиях реального применения. Аналитический модуль осуществляет кластеризацию опасных зон методами *DBSCAN* или -средних с адаптивным определением количества кластеров на основе анализа амплитуды излучения, а прогнозирование динамики электромагнитной обстановки выполняется с использованием *LSTM*-сетей для анализа временных рядов.

Исполнительный модуль обеспечивает преобразование оптимального маршрута в набор управляющих сигналов для винтомоторной группы, включая углы поворота, параметры скорости и высоты полета, с последующей передачей команд в бортовую систему управления. Система обратной связи реализует логирование результатов выполненных маневров для последующего онлайн-обучения модели, что позволяет непрерывно совершенствовать алгоритмы принятия решений на основе накопленного опыта эксплуатации. В критических ситуациях, когда построение безопасного маршрута невозможно или остаточного полетного ресурса недостаточно для достижения цели, блок принимает решение о возврате БПЛА к точке взлета, обеспечивая сохранность аппарата.

Теоретические положения и алгоритмы, изложенные в работе, нашли свое воплощение в виде комплекса зарегистрированных программ для ЭВМ [15-17]. Данные программные продукты служат подтверждением реализуемости предложенного способа защиты и составляют основу для его дальнейшего внедрения в системах защиты беспилотных летательных аппаратов коптерного типа.

Заключение

В работе предложен способ активной защиты БПЛА коптерного типа от узконаправленного СШП ЭМИ, основанный на интеграции многоканальной системы обнаружения и интеллектуальной системы управления. Ключевое отличие от известных аналогов заключается в реализации динамической пространственной защиты за счет автоматического построения диаграммы электромагнитной обстановки и адаптивного перепланирования маршрута в реальном времени. Это обеспечивает не просто активное уклонение, но и построение траектории с учетом прогнозируемых зон риска.

Таким образом, разработанный подход позволяет повысить устойчивость БПЛА

в сложной электромагнитной обстановке за счет перехода от пассивных средств защиты к активному интеллектуальному маневрированию. Перспективы дальнейших исследований связаны с адаптацией системы для работы в условиях сложных электромагнитных воздействий и оптимизацией вычислительных алгоритмов для расширения практической применимости представленного решения.

Литература

1 Нуриев М.Г. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2018. № 102. С. 1-15.

2 Гизатуллин Р.М., Дроздиков В.А., Константинов Э.С. Моделирование функционирования элементов электронных систем БПЛА при воздействии излучаемых электромагнитных помех высоковольтной линии электропередачи // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11, № 4(44). С. 13-21.

3 Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Математические модели для физического моделирования задач электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № (1-2). С. 115-122.

4 Holland M. A. Counter-Drone Systems // Center for the Study of the Drone at Bard College. Feburary 2018, 23 P.

5 Countering rogue drones // FICCI Committee on Drones, EY, 2018, 31 p. URL: https://www.varindia.com/pdf/Countering-rouge-drones.pdf (дата обращения: 25.04.2024)

6 Sheu B.H., Chiu C.C., Lu W. T., Huang C.-I., Chen W.-P. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual–Axis Rotary Platform for an Anti–UAV System // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. № 13. P. 1–17.

7 Белоусов, А.О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением / А.О. Белоусов // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 134-196. – DOI 10.24412/2410-9916-2023-3-134-196.

8 Мырова Л. О. Защита воздушного пространства от легких БПЛА с применением современных источников СКИ ЭМИ / Л. О. Мырова, Р. В. Киричек, М. М. Ступницкий // Труды Научно-исследовательского института радио. 2022. № 1. С. 2-10.

9 Kubacki, Roman & Przesmycki, Rafal & Laskowski, Dariusz. (2023). Shielding Effectiveness of Unmanned Aerial Vehicle Electronics with Graphene-Based Absorber. Electronics. 12. 3973. 10.3390/electronics12183973.

10 Ahmed T. I., Ali H. N. M. Problems and Solutions of Frequency Hopping for Drones: A Review // Al-Furat Journal of Innovations in Electronics and Computer Engineering. 2025. Т. 4, № 1. С. 37–47. DOI: 10.46649/fjiece.v4.1.4a.25.3.2025.

11 Jalali, Z., Hashemi, S.M., Sadeqi, A. et al. Predicting EMI in UAVs using characteristic mode analysis: a case study of the DJI Phantom 4. Sci Rep 15, 10016 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-94415-1

12 Патент № 2840142 C1 Российская Федерация, МПК H04B 17/20, H04K 3/00. Способ защиты беспилотного летательного аппарата коптерного типа от узконаправленного сверхширокополосного импульсного электромагнитного излучения и устройство для его реализации : заявл. 12.12.2024 : опубл. 19.05.2025 / И.М. Шмелев, И.Н.Алешин, С.Н.Терешин [и др.].

13 Hwangbo J., Sa, I. Siegwart R., Hutter, M. “Control of a Quadrotor with Reinforcement Learning.” IEEE Robotics and Automation Letters. 2017;2(4):2096–2103.

14 Pan J., Zheng Y., & Pan G. “Deep Reinforcement Learning for Autonomous UAV Navigation.” IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019;68(4):3163–3173.

15 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682636 Российская Федерация. Программа имитационного моделирования оценки угроз СШП ЭМИ и адаптивной коррекции полетного задания КБПЛА : заявл. 16.07.2025 : опубл. 25.08.2025 / С. Н. Терешин.

16 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683233 Российская Федерация. Комплексный модуль оценки устойчивости КБПЛА к сверхширокополосным электромагнитным импульсам и принятия решений по выбору мер защиты : заявл. 22.07.2025 : опубл. 02.09.2025 / С. Н. Терешин.

17 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025683489 Российская Федерация. Программный модуль нейросетевого прогнозирования уровней повреждения электронных компонентов и идентификации каналов проникновения сверхширокополосного электромагнитного импульса в системах комплексов беспилотных летательных аппаратов : заявл. 21.07.2025 : опубл. 03.09.2025 / С.Н.Терешин.

Терешин Сергей Николаевич – адъюнкт, Военная ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации, г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: защищенность беспилотных летательных аппаратов.
E-mail: sergeyterechin@yandex.ru

Почтовый адрес: 198206 г. Санкт-Петербург, ул. Л.Пилютова, д.1

Андрющенко Михаил Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Военная ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации, г. Санкт-Петербург.

Почтовый адрес: 198206 г. Санкт-Петербург, ул. Л.Пилютова, д.1
E-mail: 125msa@mail.ru

Область научных интересов: снижение заметности, радиоэлектронная борьба, беспилотные летательные аппараты и борьба с ними.

A METHOD FOR PROTECTING A COPTER-TYPE UNMANNED AERIAL VEHICLE FROM NARROW-BAND ULTRA-BROADBAND PULSED ELECTROMAGNETIC RADIATION AND A DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION

The paper proposes a method for protecting unmanned aerial vehicles from powerful electromagnetic effects based on automatic threat detection through multi-channel signal analysis. The novelty of the approach lies in the intelligent construction of a diagram of the electromagnetic environment and the subsequent adaptive rescheduling of the flight mission to bypass the radiation source or return to base, which provides dynamic spatial protection.

Keywords: unmanned aerial vehicle, protection from electromagnetic radiation, ultra-broadband pulse, adaptive trajectory, artificial intelligence, machine learning, electromagnetic environment, active protection.

Tereshin Sergey Nikolaevich, Adjunct at the Military Research Center of the Zhukov Military Academy of the National Guard of the Russian Federation. St.Petersburg.
Research interests: security of unmanned aerial vehicles.

Andryushchenko Mikhail Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Military Scientific Research at the Military Research Center of the Military Order of Zhukov of the Academy of the National Guard of the Russian Federation. St.Petersburg.

УДК 621.391.8

ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА КВАНТОВАНИЕ СИГНАЛОВ В АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

Яковлев В.Т., Плеханова Л.А.

В работе приводится анализ влияния шумов на точность аналого-цифрового преобразования низкоразрядным аналого-цифровым преобразователем. Показаны результаты проведенного анализа в виде графиков зависимостей среднеквадратической ошибки измерения системы от амплитуды шума и количества накоплений.

Ключевые слова: аналого-цифровое преобразование, накопление сигналов, шум, точность преобразования.

Введение

Преобразование аналогового сигнала в цифровой часто используется в радиолокации. Несмотря на высокую точность аналого-цифровых преобразователей (АЦП), дискретность их преобразования приводит к погрешности, которая проявляется в виде неточностей в выходных значениях. В радиолокации чаще всего применяются относительно низкоразрядные АЦП (например, 8-10-ти разрядные), параметры которых позволяют обрабатывать радиосигналы как больших, так и малых амплитуд. Это возможно по той причине, что при обработке сигналов в радиолокации используют накопление. Далее рассматривается влияние намеренно добавленных шумов на точность преобразования.

1 Описание задачи

Аналого-цифровой преобразователь – устройство, выполняющее преобразование входного аналогового сигнала в дискретный (цифровой) сигнал.

Преобразование сигнала происходит в два этапа: дискретизация и квантование. Точность квантования определяется динамическим диапазоном, задающим пределы измерения входного сигнала, и разрядностью, определяющей число двоичных разрядов выходного кода АЦП [2].

Одним из основных параметров АЦП является его разрядность, которая связана с шагом квантования следующим соотношением [3]

$$\Delta U = \frac{D}{2^{\mathrm{n}}}, \qquad (1)$$

где ΔU – шаг квантования;

D – динамический диапазон;

n – разрядность АЦП.

Шаг квантования определяет точность представления входного аналогового сигнала в виде цифровых отсчетов [3]. Например, для 10-ти разрядного АЦП с амплитудой 5 В шаг квантования составит ≈ 4,88 мВ, то есть 10-ти разрядный АЦП позволяет оцифровывать сигнал с точностью примерно до 0,1%.

Несмотря на высокую точность преобразования, дискретизация и квантование

приводят к погрешности, которая проявляется в виде неточностей в выходных данных.

На рисунке 1 представлен пример аналого-цифрового преобразования. На вход системы с шагом ступеньки 0,5 В подается сигнал. На 4 отсчете истинное значение сигнала соответствует примерно 0,25 В. На выходе для данного отсчета система выдаст цифровой код, соответствующий уровню 0. Погрешность измерения в рассмотренном случае составляет 0,25.

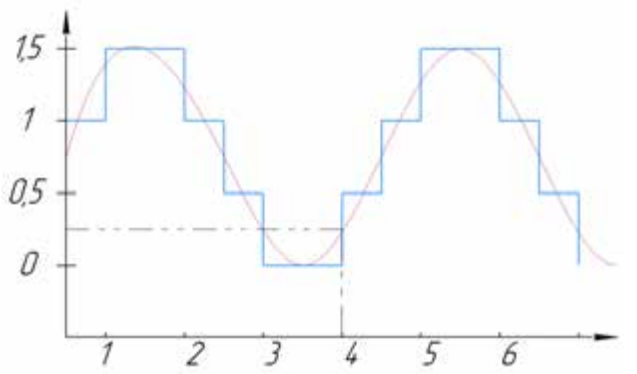


Рисунок 1 – Иллюстрация неточности преобразования аналогового сигнала с помощью АЦП: по оси абсцисс – номер отсчета; по оси ординат – действующее значение сигнала, красная кривая – входной аналоговый сигнал; синяя кривая – оцифрованный (дискретный) сигнал на выходе АЦП

Кроме этого, АЦП характеризуется динамическим диапазоном, который задает минимальный порог «видимости» сигнала. Слишком слабый аналоговый сигнал не может достичь этого порога, и АЦП просто не увидит его, так же выдав на выходе ноль.

2 Влияние намеренно добавленных шумов на точность преобразования

Считается, что шум – случайный процесс, который создает помехи полезному сигналу. Однако использование шумов может быть полезным для достижения повышенной точности АЦП и обнаружения на его выходе сигналов малой амплитуды [1].

В результате моделирования построены графики входных и выходных сигналов в зависимости от количества усреднений сигнала.

На рисунке 2 представлен график входных и выходных сигналов при количестве накоплений $N = 10$ без добавления шумов.

К слабому сигналу добавляется определенный уровень случайного шума (с нормальным распределением). В те моменты, когда амплитуда шума складывается с амплитудой полезного сигнала, их суммарная мощность превышает порог АЦП. Таким образом сигнал с шумами преодолевает минимальный порог. Далее создаем многократность подачи одного и того же сигнала. После усреднения большого количества реализаций случайный шум «уничтожается», а полезный сигнал четко проявляется.

Существует оптимальный уровень шума, при котором среднеквадратическая ошибка (СКО) между восстановленной и истинной формами сигнала минимальна.

Ниже рассматривается зависимость СКО измерения системы от амплитуды добавленного шума при различных значениях накопления.

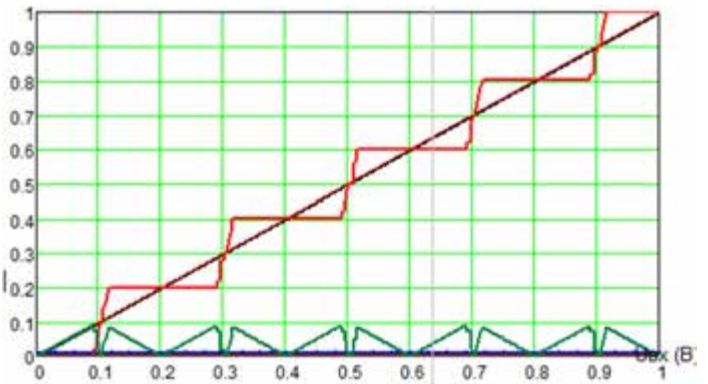


Рисунок 2 – Графическое представление сигналов без добавления шумов. По оси x – амплитуда входного сигнала. Черная кривая – сигнал на входе АЦП (эталонный сигнал); утолщенная красная кривая – сигнал на выходе реального АЦП; тонкая красная кривая – сигнал на выходе идеального АЦП; зеленая линия – ошибка измерения между показаниями идеального и реального АЦП

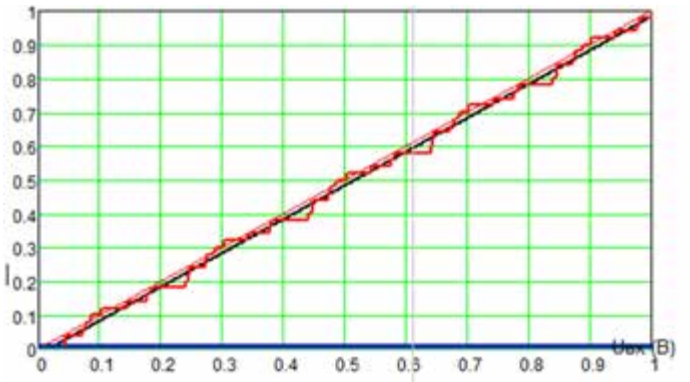


Рисунок 3 – Графическое представление сигналов при наличии шумов. По оси x – амплитуда входного сигнала. Черная кривая – сигнал на входе АЦП, усредненный по шуму (эталонный сигнал); утолщенная красная кривая – сигнал на выходе реального АЦП, усредненный по шуму; тонкая красная кривая – сигнал на выходе идеального АЦП, усредненный по шуму

Пусть амплитуда сигнала 0,135 В, пороговое значение соответствует 0,2 В.

На рисунках 4-6:

Красная кривая – СКО усредненного сигнала на входе АЦП (эталонный вариант); синяя кривая – СКО сигнала на выходе АЦП.

Из рисунков 4-6 видно, что при нулевом значении амплитуды шума погрешность измерения максимальна. Слабый сигнал не преодолеет порог квантования АЦП, выходной сигнал будет отсутствовать (цифровой код 0). При определенной амплитуде шума наблюдается минимум погрешности, и в этом случае на выходе АЦП будет

виден сигнал. При N = 10 оптимальное значение амплитуды шума составляет примерно 0,5 В, при N = 100 – 0,3, при N = 1000 – 0,1. Таким образом, чем больше число накоплений, тем ближе выходной результат к эталонному.

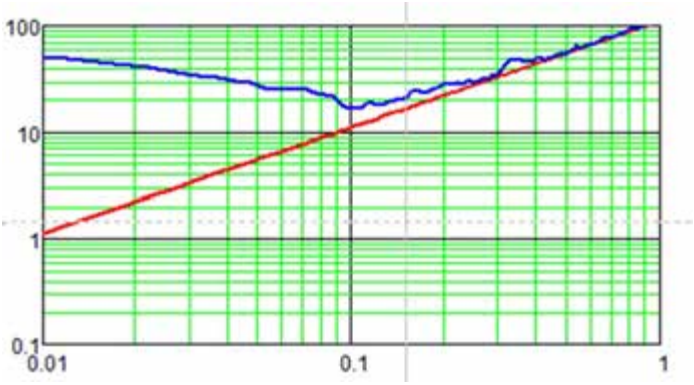


Рисунок 4 – График зависимости СКО измерения системы от амплитуды добавленного шума при количестве накоплений N = 10

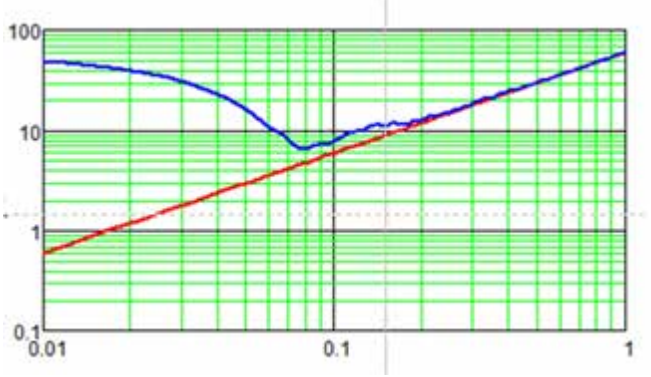


Рисунок 5 – График зависимости СКО измерения системы от амплитуды добавленного шума при количестве накоплений N = 100

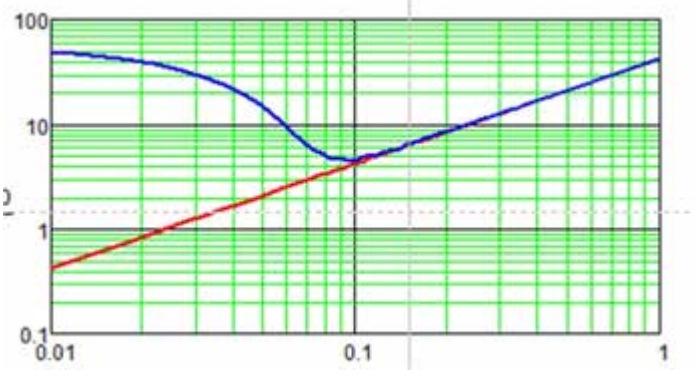


Рисунок 6 – График зависимости СКО измерения системы от амплитуды добавленного шума при количестве накоплений N = 1000

Более детально влияние шума на точность преобразования видно на рисунке 7.

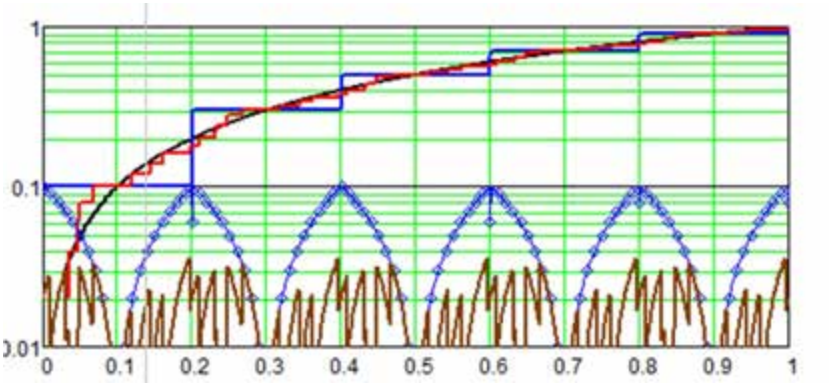


Рисунок 7 – Графическое представление сигналов на входе и выходе АЦП и ошибки работы системы в логарифмическом масштабе. По оси x – амплитуда входного сигнала. Черная кривая – эталонный сигнал; утолщенная синяя кривая – сигнал на выходе АЦП при отсутствии шума; красная кривая – сигнал на выходе АЦП, усредненный по шуму; тонкая синяя кривая с отметками – ошибка работы АЦП без шумов; коричневая кривая – ошибка работы АЦП при наличии шумов

Из рисунка 7 видно, что добавление расчетного шума снижает максимальную ошибку измерения в 3 раза.

Заключение

Таким образом, в статье показана возможность использования низкоразрядного АЦП в случаях, где требуется повышенная точность. Это возможно за счет намеренного использования шумов, которые, в совокупности с основным сигналом, позволяют преодолеть пороговое значение преобразователя, а за счет накопления сигналов позволяет минимизировать ошибку выходного результата. Как видно из рисунков 2-3, исчезает влияние дискреты АЦП на преобразование сигнала. При этом остается только влияние шума.

Литература

1 Кестер У. Входной шум АЦП: хороший, плохой и опасный. Хорошо ли, когда его нет? // Компоненты и технологии. 2008. №9. С. 42-46.

2 Кууз Р.А., Суслов В.Н., Фирсов Г.И. Выбор параметров аналого-цифрового преобразования в задачах компьютерной стабилографии // Р.А. Кууз, В.Н. Суслов, Г.И. Фирсов – Аппаратные и программные средства медицинской диагностики и терапии. С. 53-58.

3 Райс В. Как работают аналогово-цифровые преобразователи // В. Райс – Компоненты и технологии. 2005. №3. С.116-121.

Яковлев Виктор Тимофеевич – доктор технических наук, главный научный специалист, АО «НПО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: радионавигация, радиолокация.
Email: v.yakovlev@goz.ru

Плеханова Лада Алексеевна – специалист, АО «НПО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: радионавигация, радиолокация.

Email: l.plekhanova@goz.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

INFLUENCE OF NOISE ON QUANTUM SIGNALS IN ANALOG-DIGITAL CONVERTER

The article provides an analysis of the influence of noise on the accuracy of analog-digital conversation with low-power analog-digital converter. The results of the performed analysis are shown in the form of graphs of the dependence of the system’s standard-square measurement error on the amplitude of noise and the amount of savings.

Keywords: analog-device conversation, signal accumulation, noise, conversation accuracy.

Yakovlev Viktor Timofeevich – doctor of technical sciences, chief scientific specialist, JSC "RPA "Obukhovsky plant", St. Petersburg.
Research interests: radio navigation, radiolocation.

Plekhanova Lada Alekseevna – specialist, JSC "RPA "Obukhovsky plant", St. Petersburg.
Research interests: radio navigation, radiolocation.

УДК 681.518, 004.052

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ВНЕДРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО КОНТЕНТА В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Русина А.А.

Статья посвящена разработке комплексного метода управления рисками внедрения электронного контента в информационно-измерительные системы аэрогеофизического назначения. Актуальность исследования определяется критической потребностью в модернизации информационного обеспечения систем подготовки операторов ИИС АН при росте номенклатуры беспилотных авиационных систем. Предложена модель итеративной оценки рисков с применением нечетких множеств и лингвистических переменных, позволяющая иерархически структурировать риск-показатели. Разработаны алгоритмы хеджирования и локализации рисков, основанные на использовании баз визуальных программных компонент. Предложенный метод позволяет реализовать системный контроль качества информационного обеспечения при сохранении оперативности в условиях цифровой трансформации.

Ключевые слова: управление рисками; электронный контент; информационно-измерительные системы; аэрогеофизика; риск-менеджмент; нечеткие множества; лингвистические переменные; хеджирование рисков; локализация рисков; визуальные программные компоненты; беспилотные авиационные системы.

Введение

Развитие беспилотных авиационных систем (БАС) стимулирует рост спроса на необходимые для их успешного функционирования высокотехнологичные информационно-измерительные системы аэрогеофизического назначения (ИИС АН). Эти системы применяются для магниторазведки, гравиразведки, электроразведочных исследований, гамма-спектрометрии, геохимических методов обследования и экологического мониторинга. В соответствии с Указом Президента РФ от 18 июня 2024 г. № 529 интеллектуальные транспортные и телекоммуникационные системы, включая беспилотные и автономные технологии, отнесены к критическим направлениям научно-технологического развития России [1].

Модернизация алгоритмического и программного обеспечения ИИС АН сопровождается интеграцией электронного контента: справочных материалов, инструкций по эксплуатации, нормативных документов и обучающих модулей. Однако такая интеграция объективно несет риски снижения качества аэрогеофизических исследований и подготовки операторов: можно констатировать противоречие между существующей потребностью в учете рисков при внедрении электронного контента и эмпирическим характером текущей интеграции без научно-методического обоснования.

1 Проблема интеграции электронного контента в ИИС АН

Рост числа специальностей, типов БАС и тематических блоков подготовки приводит к лавинообразному увеличению объемов требуемого электронного контента и усложнению его сопровождения. Одновременно снижается уровень исходной подготовленности потенциальных операторов и усиливаются требования к интенсивности и качеству обучения.

Риск снижения качества информационного обеспечения систем подготовки операторов ИИС АН от интеграции электронного контента определяется как факт недостижения целей мероприятий подготовки операторов при использовании автоматизированных систем обучения. Этот риск может проявляться в неполном усвоении критически важных процедур, ошибках в работе с приборной продукцией или неверной интерпретации результатов аэрогеофизических измерений.

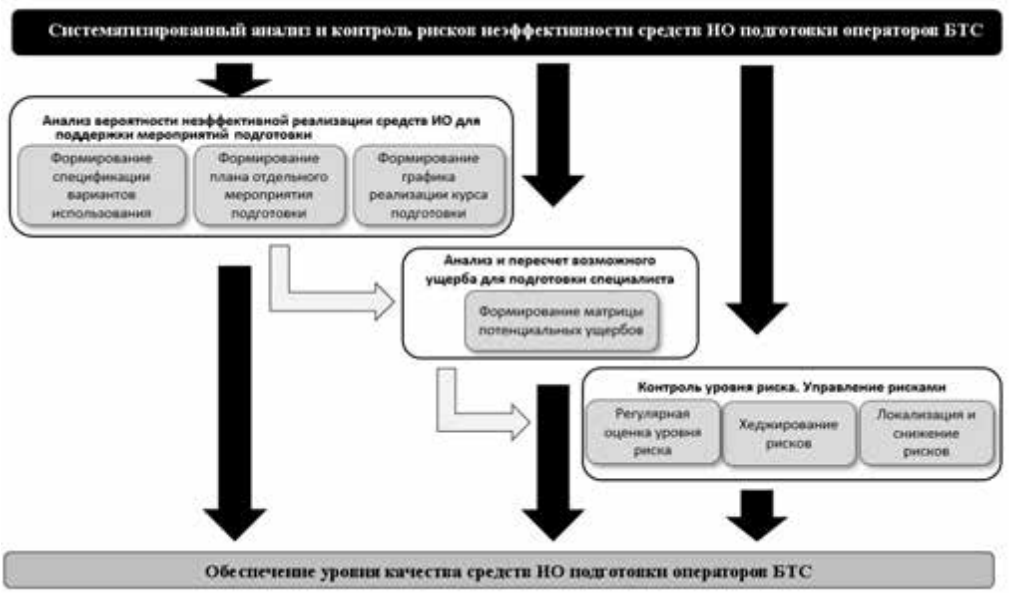


Рисунок 1 – Существо взаимосвязи управления рисками неэффективности с качеством средств информационного обеспечения систем подготовки операторов ИИС АН

Объективная необходимость управления такими рисками требует разработки комплексного научно-методического инструментария, позволяющего выявлять их на ранних этапах, оценивать значимость, выбирать стратегии хеджирования и локализации, а также сохранять оперативность разработки средств информационного обеспечения (ИО) [2-5].

2 Модель итеративной оценки рисков

Разработанная модель итеративной оценки рисков предполагает многократное проведение процедур оценки над одними и теми же элементами информационного обеспечения на протяжении всего жизненного цикла системы. Оценка охватывает стадии проектирования, разработки, валидации и верификации средств ИО на базе

электронного контента.

Структурно модель включает пять функциональных логических блоков, реализующих процедуры итеративной оценки [6].

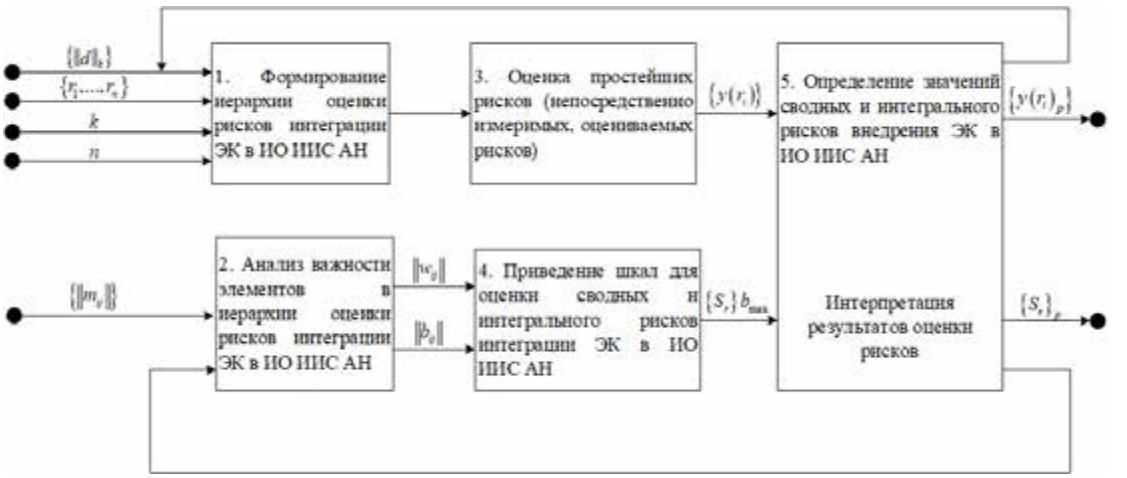


Рисунок 2 – Блоки модели оценки рисков и информационно-логические связи между ними

Модель служит инструментом оперативного анализа причин высокого уровня интегрального риска и выявления аномалий программно-информационного обеспечения мероприятий подготовки.

В основе модели лежит древовидная иерархия риск-показателей, которая строится в нескольких уровнях. На базовом уровне располагаются простейшие риски $\{r_i\}$, описывающие недостижение целей элементарных функций средств ИО при использовании конкретных фрагментов электронного контента.

На промежуточных уровнях формируются сводные риск-показатели $\{r_{ij}\}$, представляющие объединения нескольких простейших показателей и отражающие риск по более крупным функциональным блокам обучения. На вершине иерархии находится интегральный риск-показатель R_0, характеризующий риск снижения качества обеспечения систем подготовки операторов ИИС АН за счет интеграции электронного контента.

Мера доминантного агрегирования любого показателя r_i для расчета значения интегрального риск-показателя R_0 будет разной. Для численного представления удельной важности каждого риск-показателя r_i в агрегационном объединении ближайшего сводного риск-показателя согласно структуре древовидной иерархии оценки применяются локальные коэффициенты доминантного агрегирования w_i. Расчетная формула определения оценки W имеет вид

$$W' = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} v_{ij}}}{\sum_{i=1}^{n}\left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} v_{ij}}\right)}, \qquad (1)$$

где n – размерность матрицы парных сравнений,

v_{ij} – экспертная оценка попарной важности включения -го риск показателя перед j-м.

Коэффициенты доминантного агрегирования риск-показателей r_i для расчета значения интегрального риск-показателя R_0 в модели определены как глобальные b^*_m. На базе значений локальных коэффициентов w_i доминантного агрегирования в каждой текущей композиции агрегирования сложного риск-показателя рассчитываются значения глобальных коэффициентов агрегирования b^*_m в интегральный риск-показатель путем мультипликативной свертки и специализированного нормирования

$$b_i = \prod_{i=1}^{T} w_{ij}\,; \quad b''_i = \frac{b_i \times n''_i}{p}; \quad b^*_m = \frac{b''_i}{\sum_i b''_i}\,, \qquad (2)$$

где T – число уровней стратифицированной древовидной иерархии показателей между i-ым риск-показателем и интегральным риск-показателем снижения качества информационного обеспечения систем подготовки операторов ИИС АН за счет интеграции электронного контента в их состав.

Иерархическая система показателей оценки риска снижения качества ИО формируется с использованием математического аппарата мягких вычислений и шкал оценки простейших (непосредственно измеряемых) рисков, а также приведением шкал для оценки сводных и интегрального рисков интеграции ЭК в ИО систем подготовки операторов.

Оценка по каждому простейшему риск-показателю r_i интеграции ЭК в ИО информационно-измерительных систем аэрогеофизического назначения заключается в обоснованном построении матрицы оценки риска. По указанным входным параметрам в матрице оценки риска определяется соответствующий элемент этой матрицы u_{ij} – уровень риска $r_к$ для реализации проекта разработки рассматриваемых средств с использованием данных из ЭК по текущему $к$-му риск-показателю $r_к$.

Каждый элемент u_{ij} риск-матрицы, в рамках предложенной модели, логически увязан с соответствующим планом хеджирования и/или стратегией локализации рисков интеграции ЭК в ИО информационно-измерительных систем аэрогеофизического назначения. В рамках предложенной модели каждый уровень риска принято идентифицировать не только численно, но и цветом, как правило, в следующей гамме – от наиболее интенсивного цвета (наибольший риск) к прозрачному (наименьший риск). Количество таких идентифицируемых уровней риска определяется существом самого исследования рисков.

В предложенной модели реализована пятиуровневая шкала градуирования уровней риска снижения качества ИО с цветовой идентификацией по интенсивности серого цвета: от черного (наибольший риск) к белому (наименьший риск). Эта шкала показана и пояснена в таблице 1.

Именно на базе этой шкалы становится возможным сопоставить каждому простейшему риск-показателю матрицу последствий и вероятностей оценки рисков, а также добиться градуирования уровней всех сводных $\{r_{ij}\}$ и интегрального R_0 риска с соответствующим дифференциально-цветовым представлением для целей итеративной оценки рисков интеграции ЭК в информационно-измерительных систем аэрогеофизического назначения. В результате выше описанных преобразований древовидная иерархия риск-показателей оценки интеграции ЭК в ИО информационно-измерительных систем аэрогеофизического назначения приводится к итоговой форме логико-математического представления, позволяющего производить расчет значений сводных и интегрального показателей качества, на основании не инструментальных

измерений (непосредственных экспертных оценок) выше указанных составляющих p_{ij} и y_{ij} для каждого из простейших рисков.

Таблица 1 – Шкала градуирования уровней риска снижения качества ИО информационно-измерительных систем аэрогеофизического назначения

Название уровней риска и их идентификационное обозначение	Описание отличительного существа, соответствующих граничных признаков	Быстрая цветовая идентификация, условное обозначение терма лингвистической переменной
Критически опасный, аварийный $r_k(u_{ij})$: *«АВАРИЙНЫЙ»*	Требует незамедлительных и массированно-решительных корректирующих воздействий с привлечением всех доступных ресурсов (от руководителей подготовки до разработчиков средства ИО подготовки специалистов ИИС АН).	
Опасный, требующий срочного реагирования $r_k(u_{ij})$: *«ОПАСНЫЙ»*	Требует срочных корректирующих воздействий с частичным и плановым привлечением внешних ресурсов, а также информирования разработчика средства ИО, для устранения недостатков.	
Контролируемый, управляемо-компенсируемый $r_k(u_{ij})$: *«КОНТРОЛИРУЕМЫЙ»*	Требует плановых корректирующих воздействий с частичным привлечением дополнительных ресурсов, а также проработки полноты реализации всех функциональных возможностей средства ИО боевой подготовки специалистов БАС ВН, заложенных в него разработчиком.	
Локализуемый, низкий $r_k(u_{ij})$: «НИЗКИЙ»	Хеджируется и/или локализуется в рамках типовых схем повседневного функционирования, ущерб предотвращается в объеме планово-обязательных процедур индивидуализации подготовки	
Незначимый, не влияющий $r_k(u_{ij})$: «НЕЗНАЧИМЫЙ»	Контролируется периодически с целью своевременного выявления фактов изменений, несоответствий, ошибок и пр.	

Необходимость математической свертки значений простейших рисков в значения u_{ij} сводных $r_к$ и интегрального R_0 риск-показателей оценки исследуемой интеграции определила потребность в количественном выражении градаций составляющих риска p_{ij} и y_{ij} на основе применения алгебры лингвистических переменных, использующей теорию нечетких множеств [7-8]. Для этого на базе числовых значений шкал градуирования составляющих исследуемого риска, т.е. шкал уровней вероятности p_{ij} и

потенциального ущерба y_{ij} от снижения качества ИО информационно-измерительных систем аэрогеофизического назначения из-за интеграции в их состав материалов ЭК, могут быть заданы соответствующие лингвистические переменные:

- L_1=<вероятность снижения качества контента ИО>; (3)
- L_2=<ущерб от снижения качества контента ИО>. (4)

Значения термов этих лингвистических переменных задаются как функции принадлежности μ_T^L в форме (L-R)-функций. Произведение указанных лингвистических переменных (3) и (4) позволяет осуществить последовательное нечеткое шкалирование сводных r_k и интегрального R_0 риск-показателей, согласно правил умножения нечетких чисел, а также получать значения оценок r_k и R_0 в виде значения лингвистической переменной

L^*ij=<значение оценки по данному риск показателю>. (5)

Параметры функций принадлежности μ_T^L, рассчитываются в виде

$$\mu_T^{\,L}(U) = \exp(-a(T-U)^2),$$

где $a = 4Ln\dfrac{0,5}{b\wedge^2}$; (6)

T – срединное значение терма для μ_T^L равной единице, применительно к шкалам переменных L_1 и L_2;

a – согласующий коэффициент;

$b\wedge$ – расстояние между точками перегиба – точками, в которых μ_T^L принимает значение 0,5.

Параметры расчета терм-градаций лингвистических переменных L_1 и L_2 сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные параметры расчета терм-градаций лингвистических переменных L_1 и L_2

Термы для L_1	Значение при μ_T^{L1}=1	Термы для L_2	Значение при μ_T^{L2}=1	Уточненный вид аналитического расчета функции принадлежности термов
Отсутствие вероятности	0	Отсутствие ущерба	0	$\mu_T^L(U)$= 1-2U
Крайне редко	1	Сверхмалый	1	$\mu_T^L(U) = e^{-13,1(1-U)^2}$
Маловероятно	3	Видимый	3	$\mu_T^L(U) = e^{-1,46(1-U)^2}$
Ожидаемо	5	Средний	5	$\mu_T^L(U) = e^{-0,35(1-U)^2}$
Очень вероятно	7	Сильный	7	$\mu_T^L(U) = e^{-0,27(1-U)^2}$
Непременно	9	Оч. сильный	9	$\mu_T^L(U) = e^{-0.16(1-U)^2}$

Произведение переменных L_1 и L_2 позволяет сформировать нечеткую оценку вида L_{ij}^{*} = {"ОПАСН "/0,4;"КОНТРЛ"/0,9}, что означает частичную принадлежность одновременно двум уровням рисков. На основе такой оценки выбирается адекватная стратегия реагирования, в том числе переход от хеджирования к полноценной локализации.

К примеру, если электронный модуль по работе с гамма□спектрометрической аппаратурой имеет умеренную вероятность ошибок, но высокую потенциальную тяжесть последствий, итоговая нечеткая оценка может отнести его к пограничной зоне между «ОПАСНЫМ» и «КОНТРОЛИРУЕМЫМ» уровнем, что требует усиленного контроля и доработки.

3 Алгоритмы локализации и хеджирования рисков

Хеджирование рисков понимается как формирование программ организационно-технических и технологических мероприятий на случай реализации негативных сценариев использования электронного контента. При этом необходимо подчеркнуть объективизацию хеджирования и отказа от сугубо интуитивных решений. Основные принципы организации хеджирования:

- линейно-последовательная структура процесса;
- использование прямой (от текущей ситуации к целевой) и обратной (от желаемого состояния к текущему) разработки;
- опора на количественные оценки риска.

Алгоритм хеджирования рисков интеграции ЭК в информационное обеспечение ИИС АН представляет собой последовательность работ по оценке и купированию рисков интеграции ЭК. Такой процесс выступает базовым алгоритмом получения вывода о регистрируемом уровне интегрального и сводных рисков, а также синтеза рациональной программы их уменьшения [9, 10]:

1) Формулирование задачи оценивания рисков;
2) Уточнение номенклатуры критериев риск-оценки;
3) Конкретизация шкал риск-оценивания;
4) Оценивание рисков интеграции ЭК и характера их изменений;
5) Разработка программы хеджирования по результатам анализа риск-оценок;
6) Предметная интерпретация результатов хеджирования.

Алгоритм разработки программы хеджирования может быть сведен к обоснованному выбору наиболее рациональной программы хеджирования на базе совокупности предварительных альтернатив с использованием графа древовидной иерархии искомой риск-оценки [11, 12], а также к дальнейшей адаптации выбранной программы к конкретным условиям реализации и возможностям группы её исполнителей.

Выбранная с применением алгоритма программа хеджирования устанавливает варианты действий разработчиков исследуемого ИО с использованием ЭК по недопущению низкого качества создаваемого средства подготовки по каждому из частных показателей риска.

На практике это может выглядеть как заранее разработанный набор сценариев: например, при выявлении высокой доли ошибок в тестировании по модулю навигации БАС автоматически запускается программа усиленного инструктажа, дополнительного контроля и обновления контента.

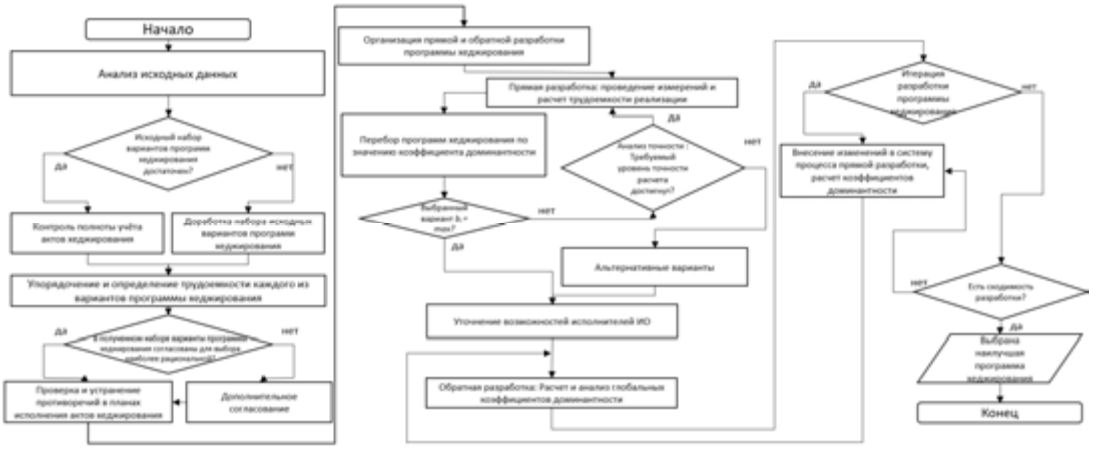


Рисунок 3 – Алгоритм хеджирования рисков интеграции ЭК в ИИС АН

Ключевым элементом локализации рисков является использование единого технолого□информационного пространства визуальных программных компонент, представляющих собой повторно используемый и предварительно верифицированный программный код.

Компоненты упорядочиваются по трем критериальным показателям:

- видам представления и демонстрации контента об осваиваемой предметной области, т.е. по видам представляемого контента;

- типам программных и программно-информационных решений, технологий исполнения и интеграции в более сложные программные системы, т.е. по программным технологиям реализации;

- тематическим направлениям подготовки, освоения соответствующих предметных областей устройства, применения и эксплуатации информационно-измерительных систем аэрогеофизического назначения, т.е. по предметным областям.

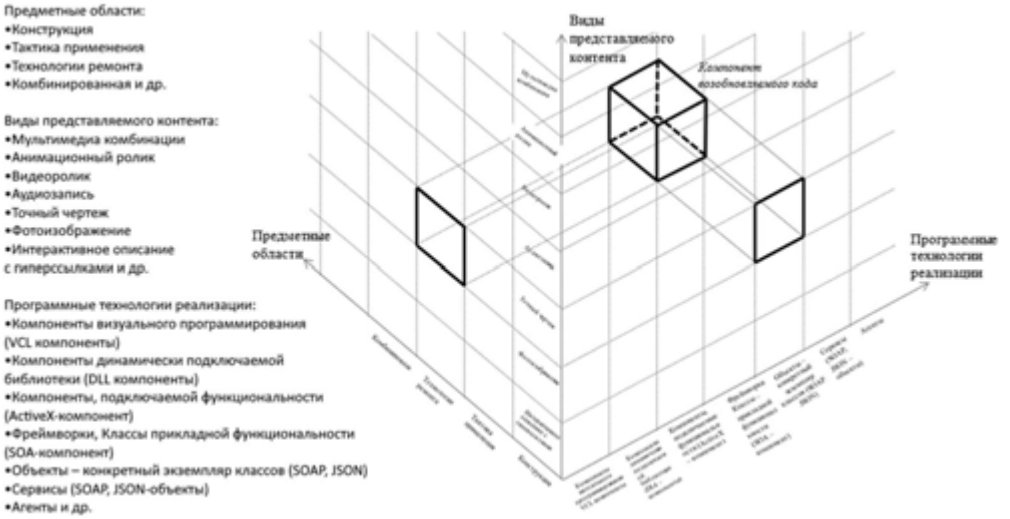


Рисунок 4 – Единое технолого-информационное пространство визуальных программных компонент повторно используемого (возобновляемого) кода программных компонент

Подпроцессы локализации включают в себя:

- анализ цифрового контента на соответствие требованиям безопасности, надежности и совместимости;

- синтез средств ИО с использованием уже проверенных визуальных компонент вместо разработки нового кода «с нуля».



Рисунок 5 – Алгоритм локализации рисков интеграции ЭК в ИО ИИС АН за счет баз визуальных программных компонент

Такая организация позволяет снизить вероятность ошибок, связанных с программной реализацией модулей обучения, и существенно сократить сроки разработки.

Так, если в процессе эксплуатации тренажера для операторов БАС выявлена ошибка в модуле моделирования отказов датчиков, локализация может заключаться в замене этого модуля на ранее протестированную компоненту из базы, уже успешно применяемую в другом комплексе.

4 Практическое применение и требования к внедрению

Предложенный метод применим в следующих контекстах:

- системы подготовки операторов ИИС АН;

- информационно-измерительные системы для решения задач аэрогеофизиче-

ских исследований, мониторинга природной среды и техногенных объектов;

- системы поддержки принятия решений в критических приложениях;

- образовательные программы в условиях цифровой трансформации инженерного образования.

Для эффективного внедрения метода необходимы:

- наличие экспертной группы для построения и актуализации иерархии риск показателей;

- инструментальные средства для автоматизации расчетов, включая поддержку нечетких вычислений;

- формализация процедур хеджирования и локализации рисков в регламентирующей документации;

- регулярное пополнение и ревизия баз визуальных программных компонент.

Пример оценки интегрального риска интеграции устаревшей инструкции по эксплуатации в электронный учебный комплекс ИИС АН по предложенной модели приведен на рисунке 6. Оценка осуществлялась 8 экспертами и включала в себя 4 простейших риск-фактора: Р1: Риск освоения неверного порядка запуска оборудования, Р2: Риск некорректной самодиагностики прибора, Р3: Риск снижения мотивации из-за противоречий в документации, Р4: Риск избыточных затрат на переобучение. Для определения важности элементов в иерархии оценки рисков применялся метод анализа иерархий Саати.



Рисунок 6 – Модель оценки интегрального риска интеграции устаревшей инструкции по эксплуатации в электронный учебный комплекс ИИС АН

Заключение

Учет рисков при внедрении электронного контента в информационно-измерительные системы аэрогеофизического назначения является не частной задачей улучшения качества программного обеспечения, а необходимым условием устойчивого функционирования всей инфраструктуры аэрогеофизических исследований и подготовки операторов. Игнорирование или формальное рассмотрение рисков приводит не только к снижению эффективности отдельных учебных модулей, но и к накоплению системных ошибок, которые могут проявиться в критических режимах эксплуатации беспилотных авиационных систем и измерительного оборудования.

Итеративная модель оценки рисков, основанная на иерархической системе риск-показателей и мягких вычислениях, демонстрирует, что систематический, формализованный учет рисков позволяет перейти от реактивного устранения последствий к проактивному управлению причинами. Это особенно важно в условиях роста номенклатуры авиарототехники и усложнения задач мониторинга, когда ручной, интуитивный контроль качества информационного обеспечения становится заведомо недостаточным. Представленная модель позволяет упростить процедуры оценки рисков сложных программно-информационных систем, повысить достоверность принимаемых решений по разработке средств подготовки специалистов, снизить неоправданную цикличность проектных решений. Практические результаты показывают снижение затрат на 10-20% и рост эффективности на 15-20% при внедрении предложенного подхода в реальных организациях.

Формализованный учет рисков создает основу для осмысленного использования повторно применяемых программных компонент, стандартизации процедур разработки и сопровождения контента, а также для выстраивания диалога между разработчиками и заказчиками на языке количественных оценок и допускаемых уровней риска. В результате управление рисками перестает быть вспомогательной функцией и превращается в ключевой элемент архитектуры систем подготовки операторов и эксплуатации аэрогеофизических комплексов, напрямую влияющий на безопасность, экономическую эффективность и технологическую независимость.

Литература

1 Указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529 «О приоритетных направлениях научно-технологического развития Российской Федерации» // Официальный интернет-портал правовой информации.

2 Боэм Б. Спиральная модель разработки программного обеспечения // IEEE Computer. 1988. № 5.

3 ДеМарко Т. Управление проектами в условиях неопределенности. М.: Компьютер Пресс, 1997.

4 Мирющенко Н. А. Обзор методов разработки программного обеспечения / Н.А.Мирющенко, Д.А.Мананков, В.А.Малафеев // Вестник новой ЭРЫ: Сборник статей. 2024. С. 115-127.

5 Русина А.А., Балашов В.М. Риски модернизации информационного обеспечения подготовки операторов беспилотных авиационных систем // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2025. Вып. 1. С. 77-81.

6 Балашов В.М., Русина А.А., Семенова Е.Г. Разработка модели итеративной оценки рисков интеграции электронного контента в информационно-измерительные системы // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2025. Вып. 2. С. 94-102.

7 Русина А.А. Представление и оценка рисков внедрения электронного контента в информационно-измерительные системы аэрогеофизического назначения на базе мягких вычислений // Сибирский аэрокосмический журнал. 2025. Т. 26, № 2. С. 202-214.

8 Семенова Е.Г., Ивакин Я.А., Смирнова М.С., Фролова Е.А. Метод многопараметрического оценивания на основе мягких вычислений // Вопросы радиоэлектрони-

ки. 2019. Вып. 7. С. 15-30.

9 Русина А.А., Семенова Е.Г., Смирнова М.С. Алгоритм локализации рисков внедрения электронного контента в информационно-измерительные системы аэрокосмического назначения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2025. № 3. С. 127-138.

10 Балашова К.В., Ивакин Я.А., Балашов В.М. Методика хеджирования рисков интеграции интерактивных электронных технических руководств в информационное обеспечение систем подготовки операторов и эксплуатантов беспилотных авиационных систем // Системы управления и обработки информации. 2024. Вып. 1 (64). С. 55-60.

11 Печенкин В.В., Королев М.С., Дмитров Л.В. Прикладные аспекты использования алгоритмов ранжирования для ориентированных взвешенных графов // Труды СПИИРАН. 2018. №6 (61). С.94-119.

12 Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационной неопределенности. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. 196 с.

Русина Алена Андреевна – старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Область научных интересов: беспилотные авиационные системы, управление рисками, информационно-измерительные системы, подготовка кадров
E-mail: rusina_aa@voenmeh.ru

Почтовый адрес: 190005, Санкт-Петербург ул. 1-я Красноармейская, д.1

THE ANALYSIS OF THE USE OF GEOMAGNETIC SYSTEMS IN NAVIGATION WHEN USING AIRCRAFT

The article is devoted to the development of a comprehensive method for managing risks of implementing electronic content in aerospace geophysical information-measuring systems (AMS AGP). The relevance of the research is determined by the critical need to modernize information support for AMS AGP operator training systems in the context of growing nomenclature of unmanned aerial vehicles. An iterative risk assessment model is proposed using fuzzy sets and linguistic variables, allowing hierarchical structuring of risk indicators. Algorithms for hedging and localizing risks based on visual software component databases have been developed. The proposed method enables systematic quality control of information support while maintaining operational efficiency in digital transformation conditions.

Keywords: risk management, electronic content, information-measuring systems, airborne geophysics, fuzzy sets, linguistic variables, risk hedging, risk localization, visual software components, unmanned aerial systems.

Rusina Alena Andreevna – Senior Lecturer at the Department of Aircraft Engines and Power Plants, Baltic state technical university «VOENMEKH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg
Research interests: risk management, unmanned aerial systems, information measuring systems

УДК 621.391.822

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Лобовко К.В., Серова Е.А.

Осуществлен обзор текущего состояния квантовых стандартов частоты (КСЧ) класса глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Приведены используемые на борту ГНСС квантовые стандарты частоты, а также их отечественные и зарубежные производители. Сделаны выводы по имеющимся показателям нестабильности частоты, а также перспективным направлениям повышения точностных характеристик. Рассмотрены существующие цезиевые и рубидиевые стандарты частоты с применением лазерных технологий, стандарты частоты на основе эффекта когерентного пленения населенности и оптические стандарты Приведены известные инновационные разработки с улучшенными характеристиками, а также перспективные направления применения атомных часов.

Ключевые слова: квантовые стандарты частоты, системы синхронизации и единого времени, глобальные спутниковые навигационные системы, лазерная накачка и детектирование, когерентное пленение населенностей, оптические стандарты частоты.

Введение

Квантовые стандарты частоты – устройства, в которых для точного измерения колебаний, или для генерирования колебаний с весьма стабильной частотой, используются квантовые переходы частиц (атомов, молекул, ионов) из одного энергетического состояния в другое. В ГНСС квантовые бортовые стандарты частоты являются ключевым компонентом, посредством которого формируются временные и навигационные сигналы. Точность бортовых КСЧ является одним из главных факторов, определяющих точность ГНСС. Выбор типа КСЧ для конкретной системы является компромиссом между надёжностью, стабильностью частоты, массой и стоимостью. Таким образом, важной и актуальной является задача синхронизации шкал времени различных потребителей, для решения которой применяются КСЧ. Предлагаемый доклад содержит обзор КСЧ, используемых в ГНСС, их отечественных и зарубежных производителей проблемы современных бортовых стандартов и перспективные решения этих проблем.

1 Квантовые стандарты частоты класса ГНСС

До сих пор большинство промышленных и ориентированных на космос разработок опирается на «классическую тройку» квантовых стандартов частоты: цезиевый, рубидиевый и водородный (пассивный). В «большой четверке» ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou) используются эти виды стандартов, причем сразу по несколько

устройств разных видов.

Для американской системы GPS были первыми сертифицированы КСЧ на рубидиевой газовой ячейке (КСЧ-РГЯ) и КСЧ на основе цезиевых атомно-лучевых трубок. На каждом из действующих спутников *GPS* серии *Block IIR*/*IIR*-M установлены три рубидиевых КСЧ; серии Block IIF, цезиевый КСЧ и два других рубидиевых КСЧ.

В европейской ГНСС *Galileo*, на борту космических аппаратов используются КСЧ-РГЯ и пассивный водородный стандарт частоты. Рубидиевые стандарты являются второй базовой линией бортовых стандартов для системы *Galileo*. Фирма «*SpectraTime*» (Швейцария) производит рубидиевые КСЧ для европейской и китайской спутниковых систем [1].

На спутниках китайской ГНСС *BeiDou* используются рубидиевые и водородные стандарты частоты. На следующем поколении спутников планируется использовать КСЧ на основе ловушки с ионами ртути. В настоящее время на космических аппаратах *BeiDou* установлены КСЧ-РГЯ, разработанные Физико-математическим институтом Китайской академии наук («*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences*»). По суточной нестабильности частоты эти КСЧ сравнимы с бортовыми стандартами системы *GPS Block IIR* и системы *Galileo*[2,3].

В РФ на борту спутников ГЛОНАСС-К1 используются по два цезиевых и два рубидиевых стандарта частоты.

В таблице 1 приведены ведущие компании-производители КСЧ, а на рисунке 1 – количество БСЧ, выведенных в космос на 2020 год [2].

Т а б л и ц а 1 – Ведущие компании-производители квантовых стандартов частоты

Зарубежные производители	Отечественные производители
«Microsemi», США	ЗАО «РУКНАР», Н. Новгород
«SpectraTime», Швейцария	АО «ВРЕМЯ-Ч», Н. Новгород
«Excelitas Technologies», США	ОАО «ФПНЦ «ННИПИ «Кварц», Н. Новгород
«AccuBeat Ltd», Израиль	АО «НПО «Обуховский завод», Санкт-Петербург

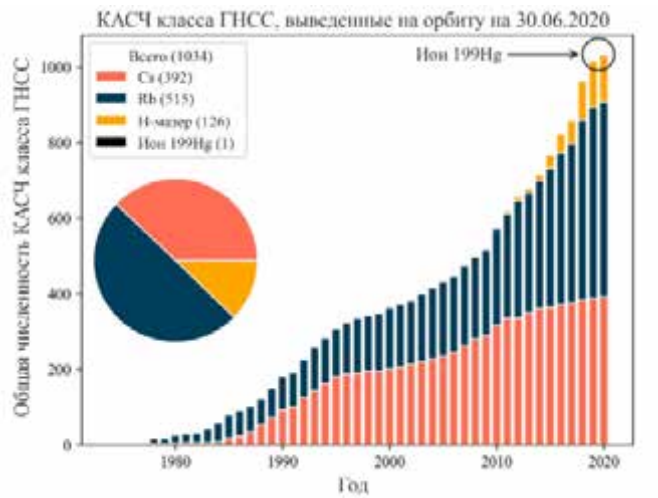


Рисунок 1 – Оценочное количество БСЧ класса ГНСС, выведенных в космос на 30 июня 2020 года

Из графика видно, что наиболее распространенным стандартом частоты на борту спутников является РСЧ, при этом водородный *Н*-мазер все чаще применяется к 2020 году. Появляются первые стандарты частоты на линейной радиочастотной ловушке с использованием иона Hg+.

Поскольку нестабильность частоты стандарта является одной из ключевых точностных характеристик ГНСС, ниже приведена таблица 2 с долговременной стабильностью стандартов частоты.

Т а б л и ц а 2 – Нестабильность частоты БСЧ космического применения

Стабильность частоты	ГЛОНАСС К1 (цезий, рубидий)	*GPS Block IIF* (цезий, рубидий)	*Galileo IOV* (рубидий, водород)	*BeiDou* 3 (рубидий, водород)
t = 1 сут	5×10^{-14}	2×10^{-14}	5×10^{-14}	$(2\text{-}5)\times10^{-14}$

Из таблицы 2 видно, что отечественная разработка практически не уступает зарубежным аналогам, принятым в эксплуатацию в соответствующих ГНСС. В тоже время, в текущих бортовых стандартах были достигнуты предельные характеристики (суточная стабильность порядка $(1\text{-}5)\times10^{-14}$) [4].

2 Инновационные разработки квантовых стандартов частоты

Известно, что стандарты частоты, основанные на классических принципах, достигли своих теоретических пределов. Дальнейшим повышением метрологических характеристики является использование новых физических принципов. Одним из таких является использование лазерных технологий.

На сегодняшний день можно выделить следующие перспективные разработки стандартов частоты космического применения с повышенными точностными характеристиками:

- стандарт частоты на цезиевой атомно-лучевой трубке с лазерной накачкой и детектированием («*Microsemi*», *NIST*, США);

- рубидиевый стандарт частоты на газовой ячейке с импульсной лазерной накачкой на основе двойного радиооптического резонанса (*ESA*, ЕС; *INIRIM*, Италия);

- рубидиевый стандарт частоты на основе двухфотонного поглощения с переносом частоты с помощью фемтосекундной гребенки (*DARPA*, США; «*Vescent Photonics LLC*», США);

Следующие направления развития квантовых частоты активно исследуются и разрабатываемые образцы являются перспективными для внедрения в космический сегмент:

- оптические стандарты частоты на одиночных ионах;

- стандарты частоты с использованием эффекта когерентного пленения населенности.

2.1 Квантовые стандарты частоты на цезиевой атомно-лучевой трубке с лазерной накачкой и детектированием

В последнее время стало востребованным новое направление квантовой стабилизации частоты, связанное с использованием лазеров для оптической накачки и за-

медления атомных пучков [5,6]. Принцип работы КСЧ на атомах цезия с лазерной накачкой и детектированием во многом сходится с традиционным цезиевым КСЧ, физический принцип работы которого подробно описан в [7,8].



Рисунок 2 – Упрощенная схема КСЧ на атомах 133Cs с лазерной накачкой и детектированием

В данной модели лазерные технологии применяются для замены традиционных элементов первичных цезиевых эталонов. В классической схеме цезиевого стандарта традиционная спектральная лампа с парами цезия заменяется полупроводниковым диодным лазером, осуществляющим как оптическую накачку, так и оптическое детектирование сигнала резонанса. Такая конструкция отличается большими габаритами, высоким энергопотреблением и сложностью эксплуатации.

Принцип работы модифицированного классического цезиевого стандарта основан на следующем [7]: лазерное излучение на длине волны D2-линии цезия (~852 нм) модулируется и направляется в газовую ячейку с парами цезия и буферным газом. При совпадении микроволновой частоты со сверхтонким переходом F=4↔F=3 в основном состоянии $6S_{1/2}$ изменяется населённость энергетических уровней, что приводит к изменению поглощения (или флуоресценции) лазерного излучения. Этот сигнал используется в петле обратной связи для стабилизации частоты кварцевого генератора.

Главным отличием от классической схемы является замена широкополосной лампы узкополосным лазером, что обеспечивает:

- более высокий контраст резонанса,
- уменьшение светового сдвига за счёт возможности управления интенсивностью и поляризацией излучения,
- снижение энергопотребления и габаритов,
- улучшение стабильности за счёт меньшей чувствительности к температурным колебаниям (лазер не требует прогрева, в отличие от лампы).

Таким образом, применение лазерной накачки и детектирования в цезиевых стандартах позволяет достичь кратковременной частотной нестабильности на уровне нескольких единиц $10^{-13}\tau^{-1/2}$, что сопоставимо с характеристиками традиционных ламповых цезиевых стандартов частоты, но с улучшенной долговременной стабильностью и меньшими массогабаритными показателями.

Данные разработки находят применение в перспективных компактных эталонах, ориентированных на использование в стационарных и мобильных системах точного времени, а также ведутся опытно-конструкторские работы для дальнейшего внедрения космический сегмент.

2.2 Рубидиевый стандарт частоты на газовой ячейке с импульсной лазерной накачкой на основе двойного радиооптического резонанса

В стандартах частоты на основе газовых ячеек с буферным газом и непрерывной ламповой оптической накачкой долговременный дрейф частоты часового перехода обусловлен его температурной зависимостью, а также нестабильностью светового сдвига. С целью повышения частотной стабильности за счёт существенного снижения величины светового сдвига около пятнадцати лет назад была предложена и реализована методика импульсной оптической накачки (ИОН), основанная на применении лазерных и цифровых технологий, в рубидиевых стандартных частотах (РСЧ) с газовой ячейкой, содержащей буферный газ. Суть методики ИОН заключается в временном разделении трёх функциональных этапов работы РСЧ: оптической накачки, импульсного микроволнового зондирования по схеме Рэмси и оптического детектирования. Такой подход обеспечивает реализацию микроволнового часового перехода в отсутствие лазерного излучения внутри ячейки, что приводит к значительному подавлению светового сдвига. Использование импульсного микроволнового зондирования по схеме Рэмси позволяет получать узкие линии Рэмси (150–200 Гц) с контрастом центрального пика, превышающим 40 %. Отношение сигнал/шум в оптически детектируемом часовом сигнале РСЧ с ИОН может достигать нескольких десятков тысяч, что обеспечивает достижение практически реализуемого уровня кратковременной нестабильности на уровне нескольких единиц $10^{-13}\tau^{-1/2}$ – показателя, ранее недостижимого для РСЧ с ламповой накачкой [8-10].

В качестве примера современной реализации стандарта частоты предлагается рассмотреть, собранный во ВНИИФТРИ прототип РСЧ с ИОН [9], экспериментальная схема которого представлена рисунке 3.

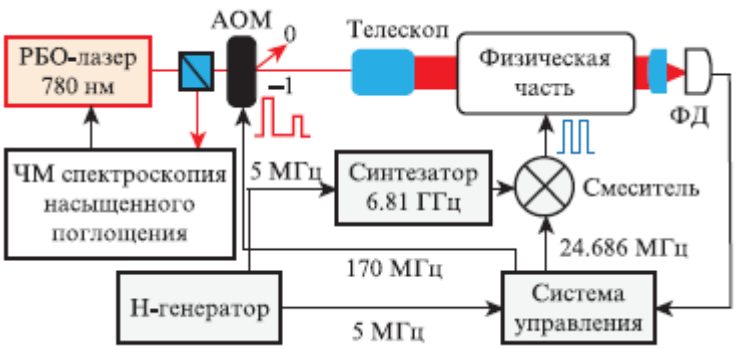


Рисунок 3 – Схема РСЧ с ИОН: AOM – акустооптический модулятор в анизотропном брэгговском режиме дифракции; ФД – фотодетектор; РБО – лазер с распределенным брэгговским отражением

В данную схему входят: 1) физическая часть, содержащая 87Rb-ячейку со сме-

сью буферных газов Ar-N_2, помещенную в цилиндрический СВЧ резонатор; 2) лазерная система, формирующая излучение на длине волны D2-линии поглощения Rb-атома, с конструктивным узлом спектроскопии насыщенного поглощения в контрольной Rb-ячейке и с акустооптическим модулятором (АОМ), выполняющим функции частотного смесителя и генератора оптических импульсов; 3) система формирования СВЧ сигнала на частоте 6,834 ГГц и цифровая система управления, формирующая все оптические и электрические сигналы прототипа, включая сигнал автоматической подстройки частоты кварцевого генератора.

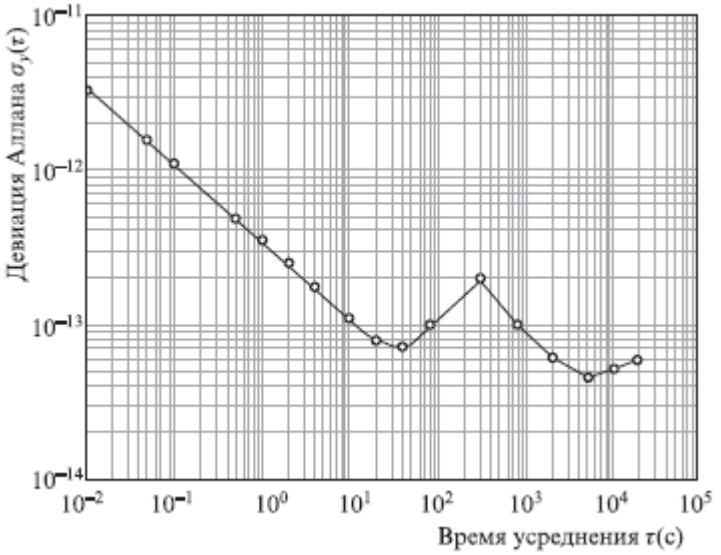


Рисунок 4 – Долговременная нестабильность РСЧ с ИОН

Таким образом, в исследованиях экспериментально подтверждено достижение кратковременной нестабильности частоты на уровне $2.5\times10^{-13}\tau^{-1/2}$ (рисунок 4), что является конкурентоспособным результатом для компактных рубидиевых стандартов частоты. При этом долговременная стабильность ограничена не фундаментальными, а техническими факторами, что открывает путь к её улучшению за счёт оптимизации электроники и термостабилизации.

2.3 Квантовые стандарты частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей

Наиболее перспективными малогабаритными высокостабильными квантовыми стандартами частоты (КСЧ) являются устройства, основанные на эффекте когерентного пленения населённостей (КПН) [11, 12]. Эффект КПН возникает под воздействием резонансного лазерного излучения: атом переводится в специфическое квантовое состояние, представляющее собой долгоживущую когерентную суперпозицию магнитных подуровней основного энергетического состояния. В данном состоянии атомы прекращают рассеивать резонансное излучение, вследствие чего поглощение света в среде резко снижается. Одновременно наблюдается подавление атомной флуоресценции, что обусловило в научной литературе устоявшееся наименование таких

резонансов как «тёмных» [7, 13]. Одной из ключевых характеристик «тёмных» резонансов является их спектральная ширина, определяемая временем жизни «тёмного» состояния и способная оказаться значительно уже естественной ширины спектральной линии – вплоть до значений в сотни и единицы герц.

Преимуществом квантовых стандартов частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей (КСЧ КПН) по сравнению с малогабаритными рубидиевыми стандартами частоты заключается в отсутствии необходимости применения громоздкого сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора, а также спектральной лампы, заполненной парами щелочного металла (рубидия или цезия), которая характеризуется значительным энергопотреблением (порядка 0,5 Вт). Это позволяет при сохранении высокого уровня метрологических характеристик существенно снизить как габаритные размеры устройства, так и его энергопотребление.

Для исследования влияния режимов работы составных частей КСЧ КПН на действительное значение и нестабильность частоты КСЧ КПН в работе [14] был проведен эксперимент с использованием установки, представленной на рисунке 5.

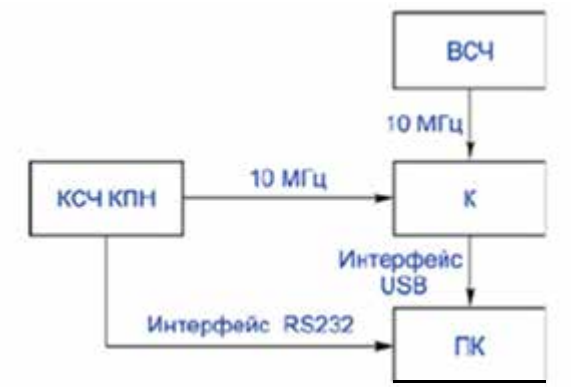


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки

В данной установке частота выходного сигнала КСЧ КПН 10 МГц сравнивается с опорной частотой водородного стандарта частоты Ч1-1006 с помощью компаратора Ч7-315. Данные с компаратора поступают на персональный компьютер и записываются в файл в соответствии со значениями исследуемых параметров КСЧ КПН, такими как абсолютное значение температуры ячейки с парами щелочного металла и буферными газами, ток инжекции лазера, выходная мощность и девиация частоты СВЧ-генератора.

Выполненные исследования позволили разработать алгоритм, с помощью которого нестабильность частоты достигает нескольких единиц 10^{-13}(рисунок 6).

Таким образом, квантовые стандарты частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей представляют собой перспективное направление для повышения метрологических характеристик стандартов частоты. Вместе с тем, на данном этапе требуется решение ряда сложных научных и технологических задач, препятствующих практическому внедрению данной технологии в промышленное производство.

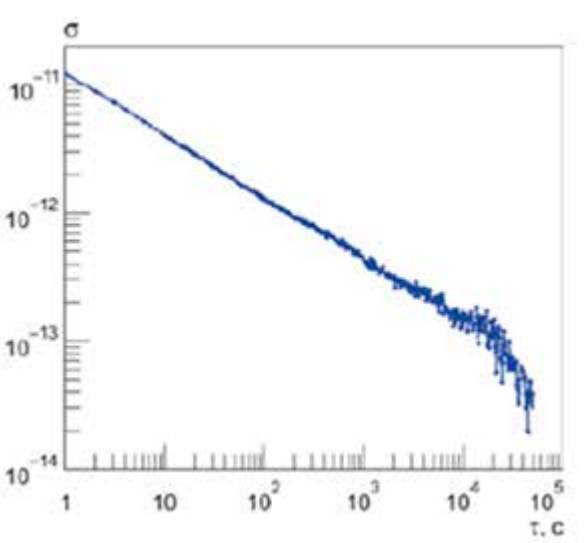


Рисунок 6 – Нестабильность частоты σ КСЧ КПН, выраженная в СКДО, обеспеченная с помощью алгоритмов управления; τ – интервал усреднения

2.4 Оптические стандарты частоты

В настоящее время значительное количество исследований сосредоточено на системах с ионными ловушками [15-17], что обусловлено рядом существенных преимуществ: возможностью удержания практически любого иона, наличием узких спектральных переходов, слабо чувствительных к статическим электрическим полям и излучению чёрного тела, отсутствием доплеровского сдвига первого порядка, а также минимизацией влияния внешних возмущающих полей внутри ловушки. В современных оптических стандартах частоты на одиночных ионах достигается уровень частотной нестабильности от ~10^{-15} (кратковременная, при $\tau < 100$ с) до ~10^{-18} при усреднении в течение $\tau = 10$□ с. Одними из наиболее распространенных одиночных ионов, используемых в оптических часах, являются ртуть (Hg+), алюминий (Al^+), стронций (Sr^+) и иттербий (Yb^+). На рисунке 7 приведена структура оптического стандарта частоты (ОСЧ) на одиночных ионах иттербия, предлагаемая в работе [18].

Для оценки частотных характеристик оптического стандарта на ионе ^{171}Yb (рисунок 8, а) была измерена нестабильность частоты сигнала биений между зондирующим лазером с длиной волны 871 нм и одной из компонент спектра фемтосекундного генератора, стабилизированного по частоте опорного Yb:YAG/I2-стандарта [18]. Полученное значение параметра Аллана для сигнала биений составило 3×10^{-15} при времени усреднения 10^5 с.

Оценка долговременной стабильности ^{171}Yb-стандарта выполнена на основе моделирования параметра Аллана с использованием экспериментально определённых характеристик: ширины линии и скорости дрейфа частоты зондирующего лазера, ширины резонанса квадрупольного перехода, а также вероятности его возбуждения. Согласно проведённой оценке, уровень суточной частотной нестабильности стандарта достигает 10^{-17} (рисунок 8, б).

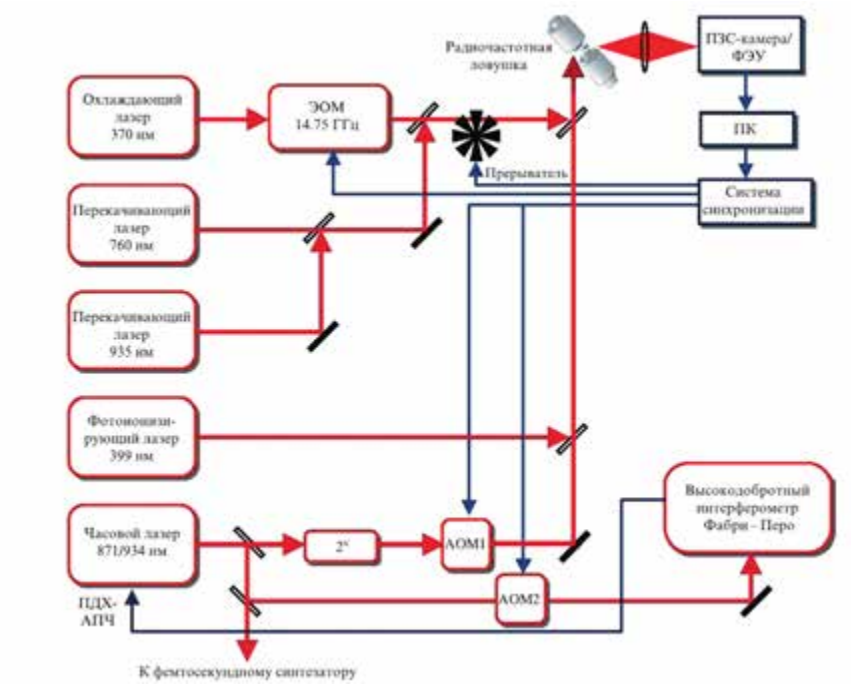


Рисунок 7 – Схема ОСЧ на одиночном ионе иттербия

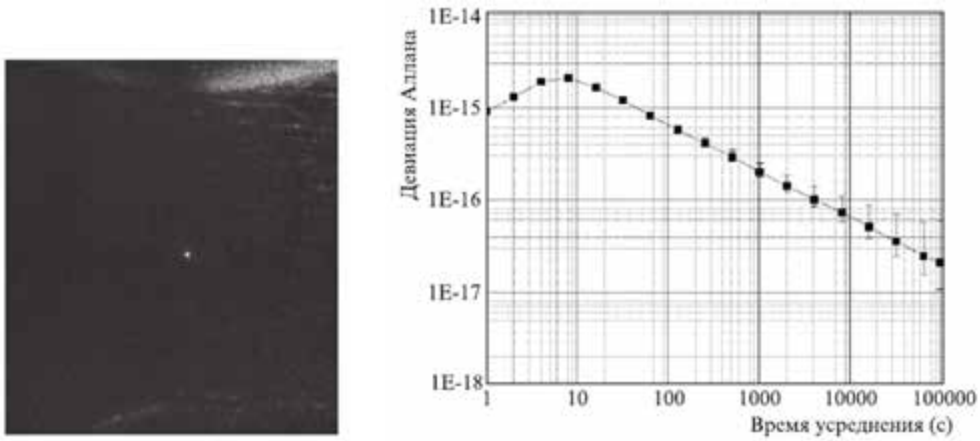


Рисунок 8 – Изображение одиночного иона 171Yb (а); оценка долговременной стабильности 171Yb-стандарта (б)

В качестве ещё одного показательного примера, иллюстрирующего потенциал оптических часов, следует отметить особенности реализации часов на ионе алюминия, в которых впервые были применены элементы методологии квантовых вычислений. Ион Al+ обладает часовым переходом на длине волны 267 нм (естественная ширина линии 8 МГц), отличающимся крайне низкой чувствительностью к систематическим сдвигам частоты, в первую очередь к сдвигу, обусловленному излучением чёрного тела, что делает его особенно привлекательным для использования в оптических стандартах частоты. Однако охлаждающий переход на длине волны 167 нм практически недоступен для современных лазерных систем вследствие расположения в глубо-

ком ультрафиолетовом диапазоне. Если задача охлаждения иона решается относительно просто посредством симпатического охлаждения с использованием вспомогательного иона, то проблема считывания квантового состояния после возбуждения часового перехода требует специального подхода. Впервые эта задача была решена Дэвидом Вайлендом с применением метода квантовой логики, изложенного в работе [19].

Анализ рассмотренных примеров оптических стандартов частоты показывает, что их техническая реализация зачастую отличается значительной громоздкостью. В связи с этим в настоящее время актуальным направлением исследований является миниатюризация таких систем вплоть до соответствия требованиям, предъявляемым к бортовым установкам космических аппаратов. Одним из таких разрабатываемых решений является оптический стандарт на одиночном ионе иттербия, создаваемый в Физическом институте имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН). Заявленные характеристики установки, имеющей габариты порядка 1 м3 и массу около 300 кг, обеспечивают частотную нестабильность на уровне 5×10^{-16} с последующим переносом опорной частоты в радиочастотный диапазон (1 ГГц) при помощи фемтосекундного оптического синтезатора частот. Дальнейшее совершенствование массогабаритных параметров подобных систем откроет новые возможности для применения в релятивистской геодезии, а также позволит решать перспективные задачи, связанные с развитием спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС.

3 Другие перспективные направления применения и развития КСЧ

Эталонные стандарты времени и частоты в последнее время находят все более широкий круг потребителей [20]. Если десять лет назад основное применение они находили в навигационных системах, в сфере обороны и безопасности, в радиоастрономии и научных исследованиях, то сейчас с высочайшими требованиями к точности и стабильности тактовых сигналов выходят операторы связи, единые энергетические системы и даже банки и биржи.



Рисунок 8 – Сферы применения атомных часов

Развитие квантовых стандартов частоты открывает новые возможности как в космическом, так и наземном сегменте. Отдельно стоит отметить важность навигационного обеспечения в Арктической зоне, поскольку в последние годы происходит значительное увеличение деятельности Российской Федерации в этом регионе. Это обусловлено необходимостью обеспечения безопасности морской навигации защиты и охраны государственной границы [21].

Заключение

Проведенный анализ нестабильности частоты бортовых КСЧ отечественного и зарубежного производства, используемых в ведущих мировых ГНСС показывает, что характеристики находятся на одном уровне и на борту каждой из рассмотренных ГНСС установлены рубидиевые стандарты частоты. В работе была обоснована тенденция перехода от классических КСЧ к стандартам на новых физических принципах. Тем не менее, осуществленный обзор существующих разработок указывает на необходимость значительной технологической оптимизации перед их возможным внедрением в серийное производство и космический сегмент. Помимо космического сегмента атомные часы находят все больше сфер применения.

Литература

1 Performance Evaluation and Analysis of Galileo Satellite Clock in Orbit / Y. Yang [et al.] // *CSNC*. 2020. Proc., vol. II. pp. 422–431.

2 GNSS-grade space atomic frequency standards: Current status and ongoing developments / E. Batori [et al.] // Advances in Space Research. 2021.

3 Space Rubidium Atomic Frequency Standard for BeiDou Navigation Satellite System / G. Mei [et al.] // Proceedings of the 29th European Frequency and Time Forum, joined with the IEEE Frequency Control Symposium. 2015.

4 Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) ФГУП ЦНИИмаш. Прикладной потребительский центр. URL: http://www.glonass-iac.ru/ (дата обращения: 30.11.2025).

5 Faraday-laser-pumped cesium beam clock / H. Shi [et al.] // Phys. Rev. Appl. 2025. 23, 034018.

6 Schmittberger B. L., Scherer D. R. A Review of Contemporary Atomic Frequency Standards // IEEE. 2020.

7 Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения : пер. с англ. Н.Н. Колачевского. М.: Физматлит, 2009. 511 с.

8 Введение в квантовые стандарты частоты : учебное пособие / А.В. Клюев [и др.]. Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2023. 43 с.

9 Рубидиевый стандарт частоты с импульсной оптической накачкой и нестабильностью частоты $2.5\times10^{-13}\ \tau^{-1/2}$ / В.Н. Барышев [и др.] // Квантовая электроника. 2022. Том 52. № 6. с. 538–543.

10 Рубидиевый стандарт частоты с импульсной лазерной накачкой: состояние и перспективы / С.А. Волков [и др.] // Труды Института прикладной астрономии РАН, 2019. вып. 49. с. 17–22.

11 Characterization of coherent population-trapping resonances as atomic frequency references / K. Svenja [et al.] // Journal of the Optical Society of America B, 2001, vol. 18,

no. 11, pp. 1545–1553.

12 Vishnyakov V.I., Brazhnikov D.V., Svortsov M.N. Reduction of magnetic-field-induced shift in quantum frequency standards based on coherent population trapping // J. Appl. Phys. 2025. vol. 137, 164402.

13 Esnault F., Kitching J., A. Donley E. A Compact Cold-Atom Frequency Standard Based on Coherent Population Trapping // IFCS. 2012. Proceedings. pp. 697–699.

14 Парёхин Д.А. Алгоритмы управления в квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей // Измерительная техника. 2021. № 1. С. 27-31.

15 Хабарова К.Ю., Заливако И.В., Колачевский Н.Н. Методы квантовой логики в ионных стандартах частоты, квантовых вычислителях и современной спектроскопии // Успехи физических наук. 2022. Том 192. №12. С.1305-1312.

16 Frequency ratio measurements at 18-digit accuracy using an optical clock network / Boulder Atomic Clock Optical Network (BACON) Collaboration // Nature. 2021. vol. 591. pp. 564-569.

17 Quantum-amplified global-phase spectroscopy on an optical clock transition / L. Zaporski [et al.] // Nature. 2025. vol. 646. pp. 309-314.

18 Toward a New Generation of Compact Transportable Yb+ Optical Clocks / K. Y. Khabarova [et al.] // Symmetry. 2022. vol. 14. 2213.

18 Оптический стандарт частоты на одиночном ионе иттербия-171 / С.В. Чепуров [и др.] // Квантовая электроника. 2021. Том 51. № 6, 473-478.

19 Spectroscopy using quantum logic / Schmidt P. O. [et al.] // Science. 2005. vol. 309. 749.

20 Перспективы развития квантовых стандартов частоты и прецизионных измерительных средств точного времени АО «Время-Ч» / Б.А. Сахаров [и др.] // КВНО. 2025. Тезисы докладов.

21 Бакурский К.В., Макаров А.А., Никитин Р.Г. Проблемы навигационного обеспечения в Арктической зоне. // 76-я научно-техническая конференция СПб НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная дню радио. 2021. С. 54-56.

Лобовко Константин Владимирович – аспирант, АО «НПО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: квантовые стандарты частоты, контроль работоспособности бортовых стандартов частоты, мониторинг и диагностика состояния бортовых стандартов частоты
E-mail: kesar2000@mail.ru

Серова Екатерина Александровна – аспирант, АО «НПО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: постоянные магниты, изделия из ферритов, СВЧ-соединители и антенные элементы
Email: kameshekmozg@mail.ru
Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

CURRENT STATUS AND PROSPECTS OF QUANTUM FREQUENCY STANDARDS FOR SPACE APPLICATIONS

This article reviews the current state of quantum frequency standards (QFS) for global navigation satellite systems (GNSS). It presents the quantum frequency standards used onboard GNSS, as well as their domestic and international manufacturers. Conclusions are drawn on existing frequency instability indicators, as well as promising areas for improving accuracy. Existing cesium and rubidium frequency standards using laser technology, frequency standards based on coherent population trapping, and optical standards are considered. Known innovative developments with improved characteristics are also presented, along with promising applications for atomic clocks.

Keywords: quantum frequency standard, synchronization and time synchronization systems, global navigation satellite systems.

Lobovko Konstantin Vladimirovich – postgraduate student of JSC «NPO «Obukhovsky plant», St. Petersburg city.
Research interests: quantum frequency standards, control of the operability of on-board frequency standards, monitoring and diagnostics of the state of on-board frequency signals

Serova Ekaterina Aleksandrovna – postgraduate student of JSC «NPO «Obukhovsky plant», St. Petersburg city.
Research interests: permanent magnets, ferrite products, microwave connectors and antenna elements.

УДК 621.01:623

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЛОКАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

Геворкян А.Г., Сайбель А.Г.

Выполнен анализ направлений исследований в области систем коммуникационного назначения. Показано, что интерференция волн в радиоэфире и в других физических сферах является важным предметом перспективных исследований. Рассмотрены варианты дистанционного взаимодействия конечных пунктов линии связи. Показаны различия процессов передачи радио- и гравитационных сигналов. Предложен способ формирования пространственно локальных сигналов заданной формы.

Ключевые слова: интерференция; волновой процесс; источник излучения; время распространения; тестируемая масса.

Введение

Волновые процессы занимают внимание исследователей на протяжении нескольких веков. Академик РАН А.В.Гапонов-Грехов характеризовал предмет радиофизики следующим образом: «Это – наука о колебаниях и волнах разной физической природы. Она включает в себя возбуждение колебаний и волн в неравновесных средах и системах, их излучение и распространение, взаимодействие со средой, регистрацию и обработку колебательных и волновых сигналов. Радиофизика исследует колебания и волны разной физической природы: электро-магнитные, звуковые, сейсмические, гравитационные и т. д.».

В современном мире применение радиосистем получило самое широкое распространение, поэтому вопросы, связанные с формированием, приемом и анализом радиосигналов занимают видное место в технических науках.

Со временем радиофизические методы проникли и в другие диапазоны: от очень низких частот до γ-излучения, а также в область исследований волновых процессов неэлектромагнитной природы (например, в акустику). При этом наблюдается активное взаимопроникновение радиофизических представлений в другие области знания, и наоборот.

Задолго до появления радио колебательные процессы присутствовали в жизни человека. Наиболее очевидно волновые эффекты наблюдаются в водной среде: морские и речные волны, волновое стекание воды по наклонной поверхности (бара), разделение тонкой струи жидкости на отдельные капли – наглядные примеры волновых процессов, обусловленных одновременным действием нескольких сил.

Волновые процессы можно наблюдать и в биологических системах: рост числа травоядных приводит к росту популяции хищников, следствием чего является снижение численности тех, на кого они охотятся. Цикличность времен года и погодных явлений, качающиеся под натиском ветра деревья, трепещущая ветка, с которой вспорхнула птица, – наблюдаемые явления, воспринимаемые как данность нашего

мира.

Какая от этого польза? Между кострищами неандертальцев и сегодняшним днем было множество моментов, когда кто-то первым находил способ извлечения пользы из результатов наблюдений окружающей действительности и собственных размышлений.

Спущенная тетива лука отправляет стрелу на расстояние, недоступное безоружной руке. При этом порождается бесполезный звук. Если же натянуть рядом несколько струн, то уже получится музыкальный инструмент.

Взаимосвязи вращательного и поступательного движений позволила человеку освоить энергию кипящей воды – линейные перемещения поршня парового двигателя вращают колеса. Часовой механизм стал возможным благодаря разработке способа преобразования линейной силы, формируемой естественно (гравитация) или искусственно (пружина), в циклические движения маятника, управляющего вращением стрелок. Электромагнетизм дал возможность использовать взаимосвязь колебательных процессов в магнитном и электрическом полях для создания технологий беспроводной связи.

Единство и борьба противоположностей содержатся в колебательных движениях как основополагающий механизм. Силы поверхностного натяжения и инерции заставляют волноваться возмущенную водную поверхность. Сила трения совместно с инерцией делают колебательный процесс затухающим.

Еще в 18 веке было установлено, что разряд лейденской банки представляет собой колебательный процесс. Именно такие опыты легли в основу исследований резонанса и его свойств.

Поскольку при распространении радиоволны энергия распределяется по все большей поверхности, то в удаленных точках пространства напряженность электромагнитного поля снижается. Для получения возможности извлекать информацию из радиосигнала на значительном удалении от источника существует несколько путей усовершенствования технических средств:

- повышать мощность передающего модуля;
- эффективнее канализировать излученную энергию в заданном направлении;
- повышать чувствительность приемного оборудования;
- эффективнее бороться с шумами и помехами;
- рационально обрабатывать принимаемое излучение.

Каждый из перечисленных путей имеет свои ограничения и ситуационные особенности.

В частности, повышение мощности передатчика ограничивается параметрами электрического пробоя используемых электрических узлов, и в ряде случаев увеличение излучаемой энергии возможно только за счет многоканальности (а, следовательно, и многопозиционности) передающей системы. В таком случае представляют теоретический и прикладной интерес вопросы, обусловленные интерференцией излученных сигналов.

1 Модель интерференции

Если ввести в рассмотрение волновой гармонический процесс, порождаемый в фиксированной точке пространства, описываемый уравнением вида

$$s(t) = A \cdot cos(\omega t + \varphi_0),$$

где A – амплитуда колебания,

ω – частота колебаний,

φ_0 – начальная фаза колебания,

которое описывает процесс как значение некоторого физического параметра в каждый момент времени, то данный процесс обобщенно может быть охарактеризован временными и энергетическими параметрами T – длительность временного интервала, в течение которого процесс осуществляется, и $E = \int_0^T s^2(t)\,dt$ – энергия. Широко используемая характеристика $P = E/T$ – мощность несет информацию о средней энергии процесса в единицу времени, что является следствием того, что если рассмотреть энергию как функцию от времени, то $E(t) = \int_0^t s^2(t)\,dt,\ t \le T$, для гармонического процесса будет иметь вид нелинейной функции.

В точке, расположенной в однородном пространстве на расстоянии r от источника рассматриваемого волнового процесса будет наблюдаться его задержанная и уменьшенная копия, описываемая уравнением

$$s'(t) = A \cdot k(r^2) \cdot cos(\omega(t - \Delta t) + \varphi_0),$$

где k – коэффициент пропорциональности, связывающий ослабление сигнала с протяженностью канала передачи,

$\Delta t = r/v_{\text{р}}$ – задержка доставки сигнала в точку приема со скоростью $v_{\text{р}}$.

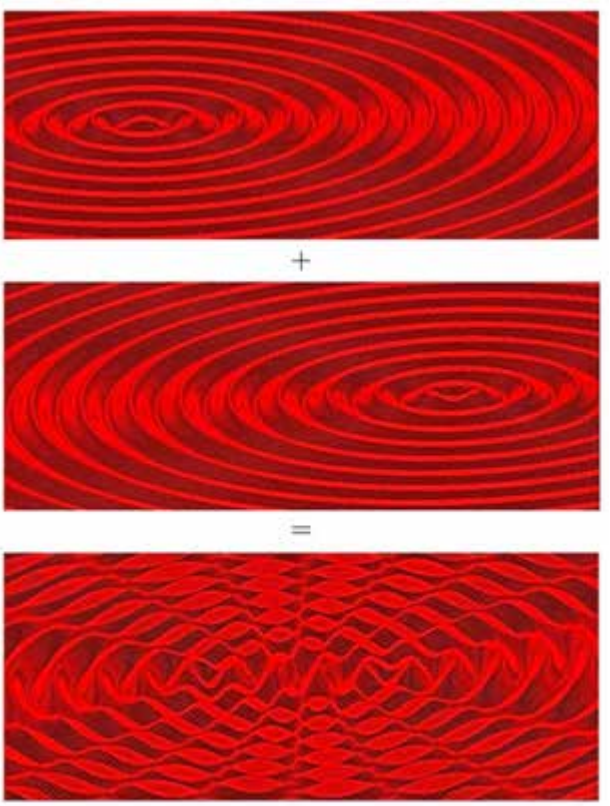


Рисунок 1 – Интерференция волн от двух источников

Приведенные рисунки иллюстрируют мгновенный результат воздействия на точки пространства двумя гармоническими колебательными процессами, анализ которого показывает, что суммарное воздействие на различные точки неодинаково, множество точек разделимо на два подмножества: первое содержит точки узлов, в которых колебательный процесс не проявляется, второе – точки, в которых колебательный процесс проявляется с различной степенью.

Данное явление представляет широкий практический интерес, поскольку требует учета при реализации систем связи и локации, а также используется в системах радионавигации.

Радиоинтерференционный метод связан с именем Николая Дмитриевича Папалекси. Его работы хорошо известны радиофизикам всего мира, и трудно переоценить его вклад, внесенный лично и в содружестве с Л.И.Мандельштамом в разработку проблем колебаний в нелинейных системах, параметрического генерирования и усиления колебаний, в разработку радиоинтерферометрических методов и в решение многих задач практической радиотехники.

В 1929-1935 гг. Н.Д.Папалекси начинает цикл работ по радиоинтерферометрии. В ЦРЛ, а позднее и в ЛЭФИ совместно с Л.И.Мандельштамом начинает разработку радиоинтерференционной методики и создает интерференционный радиодальномер с фазовыми измерениями когерентных сигналов на соизмеримых частотах, излучавшихся задающей и удаленной от нее управляемой («отражающей») станциями. Проведенные в полевых условиях испытания радиодальномеров с перестраиваемой частотой и проверка некоторых других вариантов радиоинтерференционной методики показали их реальную практическую ценность для геодезии и навигации. Эти натурные испытания проводились на постоянной полевой базе в Луге и в ходе экспедиций, в которых Николай Дмитриевич принимал неизменное участие. Однако эффективное практическое использование радиоинтерференционных дальномеров требовало точного знания величины скорости распространения радиоволн вдоль земной поверхности, так как реальное измерение расстояний производилось через определение измеряемой дистанции в масштабе длины волны используемого радиоизлучения. Поэтому в ходе исследований, возглавлявшихся Н.Д.Папалекси в ЦРЛ, ЛЭФИ, а в дальнейшем и в Физическом институте АН СССР, одной из центральных задач стало изучение фазовой структуры и скорости распространения радиоволн вдоль земной поверхности.

В 1931 г. Н. Д. Папалекси был избран членом-корреспондентом АН СССР, и с этого времени начинается его участие в работе Академии наук. В конце 1934 г. он принимает на себя руководство вновь организованной лабораторией колебаний ФИАНа, в которой развертываются работы по исследованию распространения радиоволн радиоинтерференционными методами.

В радиотехнику интерференционный метод пришел из оптики. Попытки Исаака Ньютона объяснить наблюдаемые неоднородности пятен света еще в 17 веке не дали положительного результата. В 18 веке Томас Юнг объяснил явление интерференции на основе волновой теории света. Н.Д.Папалекси с процессе получения образования принимал активное участие в проведении исследований в области оптики, что стало отправной точкой и фундаментом для применения полученного опыта в новом приложении к радиоволнам.

Проводимые в период с 1935 по 1941 г. экспедиционные и полевые работы на

озере Ильмень, на Черном море (в Одессе и под Новороссийском), Белом море, в Карских воротах, в степном районе Северного Крыма, в Заволжье (г. Пугачев), в Подмосковье (Павловская Слобода и Звенигород) дали богатейший экспериментальный материал, касающийся как физической стороны проблемы распространения радиоволн вдоль суши и морской поверхности, так и определения возможностей и методики использования радиоинтерференции для решения навигационных, гидрографических и геодезических задач. Этот блестящий цикл работ внес исчерпывающую ясность в проблему распространения радиоволн вдоль земной поверхности, позволил определить скорость их распространения в реальных условиях, явился основой для решения проблемы береговой рефракции и ряда других эффектов, связанных с изменением свойств земной поверхности, и заложил фундамент для радиогеодезии и фазовой радионавигации.

Во второй половине 20 века теория интерференции получила прикладное развитие в антенной технике. Примером применения интерференционного способа формирования поля заданной формы является фазированная антенная решетка, в которой за счет управления фазами колебаний, излучаемых отдельными элементами решетки, формируется заданная пространственная область, в которой суммарный сигнал имеет максимальную амплитуду.

В задачах связи явление интерференции при многолучевом распространении играет роль мешающего фактора, для борьбы с которым используют специальные методы и средства.

Любопытным направлением развития интерференционного способа формирования локального сигнала является рассмотрение модели, в которой имеется множество точек излучения, позволяющих сформировать в заданной точке суммарный сигнал, удовлетворяющий предъявленным требованиям.

При этом можно рассматривать два различных варианта:

- в множестве точек, заданных координатами, формируются сигналы заданной формы и излучаются с задержками, обеспечивающими одновременность прихода сигналов в заданную точку;

- в множестве точек, заданных координатами, формируются гармонические сигналы с заданными параметрами и излучаются с задержками, обеспечивающими одновременность прихода сигналов в заданную точку, что позволит получить в данной точке сигнал заданной формы, определяемой суммарным комплексным спектром интерференции гармонических колебаний.

На пути практической реализации такого подхода стоят следующие мешающие факторы:

- поскольку амплитуда, частота и фаза генерируемого колебания претерпевают случайные изменения под воздействием факторов реального физического мира, реальный сигнал не соответствует модельному уравнению;

- условия распространения сигнала на трассе источник-приемник являются переменными и не подлежат определению с высокой точностью, что приводит к изменению формы принимаемого сигнала относительно излученного.

Перечисленные реализационные сложности позволяют заключить, что в настоящих условиях данная оригинальная методика представляет в основном теоретический интерес, и может рассматриваться как направление развития электросвязи в от-

даленной перспективе. Но аналогичный подход может быть рассмотрен и в контексте формирования фундамента для развития альтернативных каналов связи, построенных на свойствах гравитационного поля.

2 Способ гравитационной связи

В соответствии с законом всемирного тяготения сила взаимодействия двух масс на расстоянии r описывается выражением

$$F_{\text{П}} = \gamma \frac{M_1 M_2}{r^2}.$$

В силу того, что сила взаимодействия двух масс зависит от квадрата расстояний между ними, то для формирования гармонического воздействия на M_2 необходимо изменять массу M_1 по гармоническому закону или перемещать массу M_1 по периодическому негармоническому закону. Изменение массы объекта не представляется возможным. Поэтому, для того чтобы подвергнуть массу M_2 гармоническому силовому воздействию нужно определенным образом перемещать массу M_1.

С учетом, что

$$F_1 = \gamma \frac{M_1 M_2}{r_1^2},$$

можно записать

$$r_1^2 = \frac{\gamma M_1 M_2}{F_1}.$$

Запишем рассматриваемое положение в виде системы уравнений

$$\begin{cases} F_{\text{П}}(t) = F_1 + \Delta F(t) = \frac{\gamma M_1 M_2}{\left(r_1 + \Delta r(t)\right)^2}, \\ \Delta F_{\text{П}}(t) = A \cdot \cos(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

где A – амплитуда гармонического колебания,

ω – частота гармонического колебания,

t – время.

Решением данной системы уравнений является равенство

$$\Delta r(t) = r_1 \left(\frac{\sqrt{\gamma M_1 M_2}}{\sqrt{\gamma M_1 M_2 + r_1^2 \cdot A \cdot \cos(\omega t)}} - 1 \right). \quad (2)$$

Т.е., если изменять положение массы M_1 по закону, описываемому уравнением (2), то в точке расположения массы M_2 (на расстоянии r_1 от M_1) будет сформирована сила, изменяющаяся по гармонического закону $\Delta F_{\text{П}}(t)$.

На рисунке 2 приведен график, иллюстрирующий характер необходимых перемещений массы M_1 (красная кривая) для получения гармонической силы воздействия на массу M_2 (синяя кривая). Моделирование выполнено для единичных значений исходных данных, масштаб изображенных кривых выбран для наглядности иллюстрации нелинейного характера перемещений массы M_1.

Изменяя период перемещений массы M_1 можно изменять частоту воздействующей на массу M_2 силы и таким образом реализовать аналог передачи радиосигналов с частотной модуляцией. Амплитуда сформированной силы зависит от массы M_1 и расстояния r_1.

Существенным недостатком описанных вариантов воздействия одной массы на вторую с целью передачи информации является зависимость от присутствия в окру-

жающем пространстве значительных масс, в том числе подвижных, что приводит к необходимости использования методов приема в условиях влияния шумов и помех.

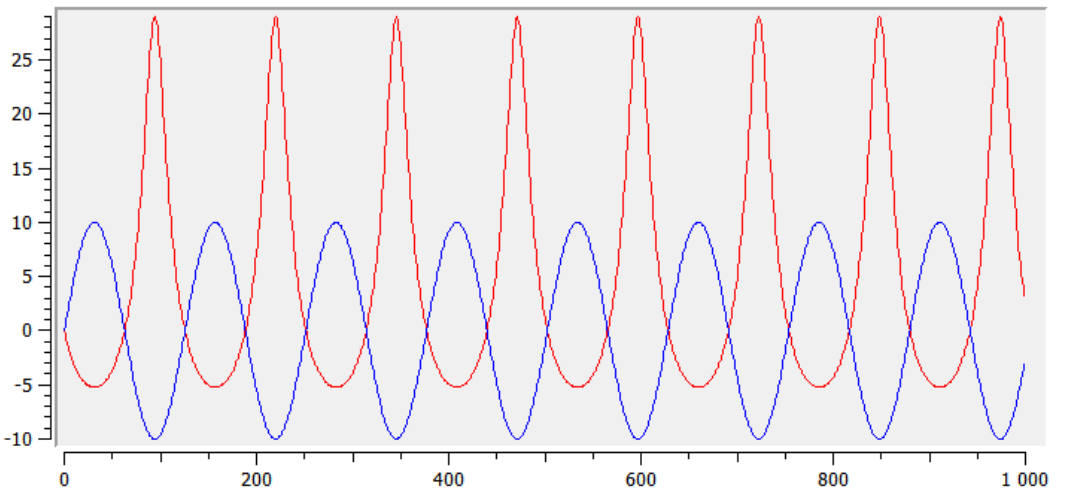


Рисунок 2 – Перемещение тестирующей массы и формируемая сила

В радиотехнике для таких ситуаций применяют сложные сигналы и методы оптимального обнаружения [10], обеспечивающие обнаружение сигнала известной формы даже в случае, если его уровень ниже шумов. В качестве сигнала широко используются последовательности Баркера или М-последовательность [10], имеющие низкий уровень боковых лепестков автокорреляционных функций.

В простейшем случае, для того чтобы масса M_2 перемещалась по закону, описываемому последовательностью Баркера, нужно осуществлять перемещение M_1 таким образом, чтобы к массе M_2 прикладывалась соответствующая сила. Вид закона перемещения массы M_1 может быть вычислен аналогично приведенному выше.

Другим вариантом приложения к массе M_2 знакопеременной силы, описываемой кодом Баркера, является формирование в точке расположения массы M_2 суммы гармонических составляющих, образующих спектр кода Баркера.

На рисунке 3 представлено в табличной форме как суперпозиция (наложение) ста гармонических колебаний позволяет сформировать суммарное воздействие, описываемое инверсным кодом Баркера $B_3 = \langle +1 + 1 - 1 \rangle$. Каждое слагаемое характеризуется частотой, амплитудой и начальной фазой, значения которых получены на основании преобразования описывающей код Баркера бинарной функции в спектральное представление с помощью прямого дискретного преобразования Фурье [10].

Следовательно, расположив на расстоянии R от центра масс пробного тела M_2 множество масс M_{1i}, $i \in \{1, N\}$ (рисунок 4) и согласованно перемещая массы M_{1i} по периодическим негармоническим законам, можно сформировать суммарную силу $F_{\Pi}(t)$, изменение которой во времени описывается функцией, использованной для формирования массива значений и параметров движения масс M_{1i}.

Массы M_{1i} могут быть размещены как представлено на рисунке 4,а, где на оси x расположена масса M_{11}, а остальные массы попарно размещены зеркально-симметрично относительно оси x. При такой конфигурации размещения масс M_{1i} за-

кон движения массы M_{11} рассчитывается на основании выражения (2), а остальные массы должны двигаться попарно одинаково таким образом, чтобы в точке x_1 формировалась суммарная сила, изменяющаяся по гармоническому закону с требуемыми параметрами.

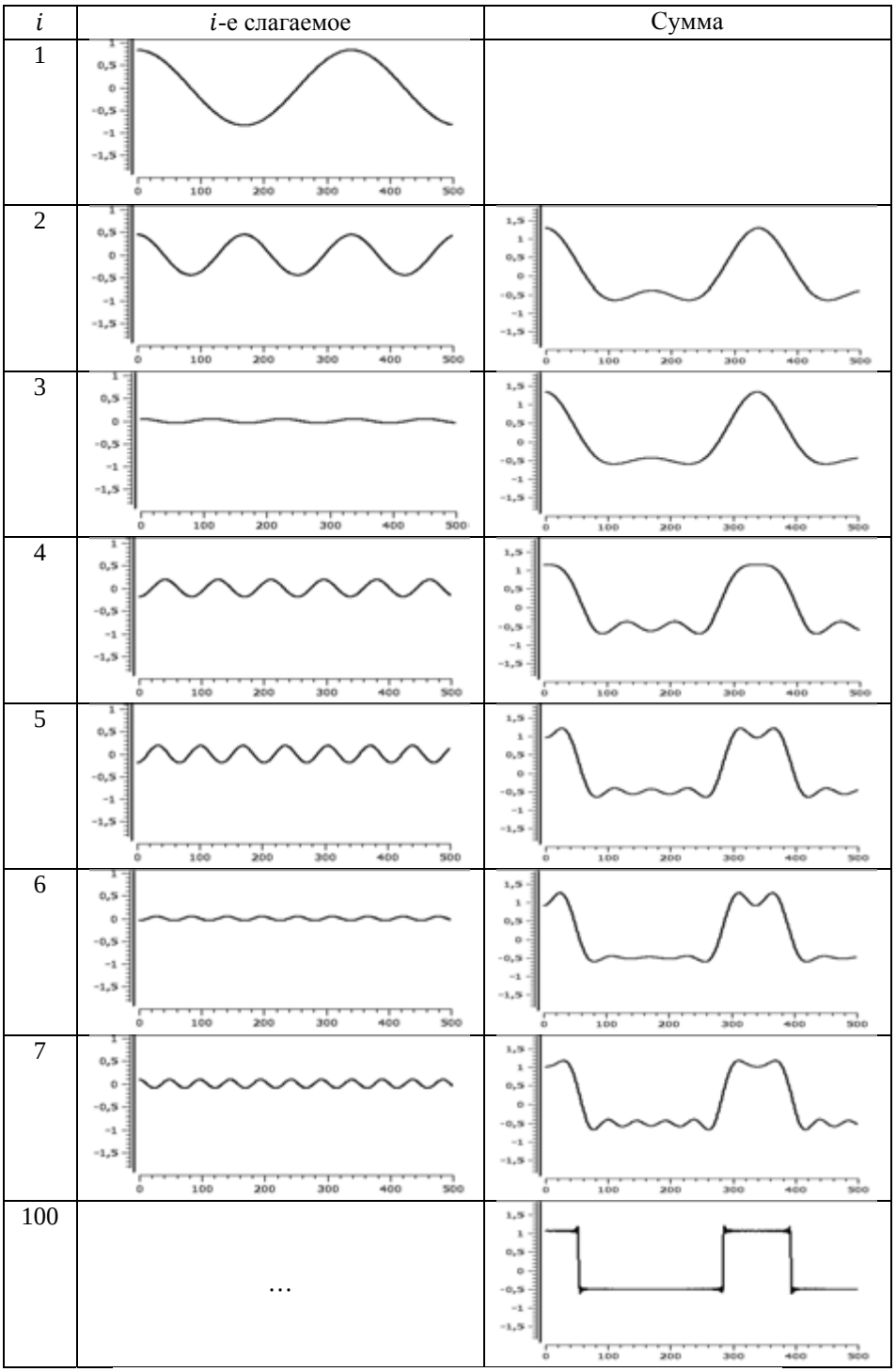
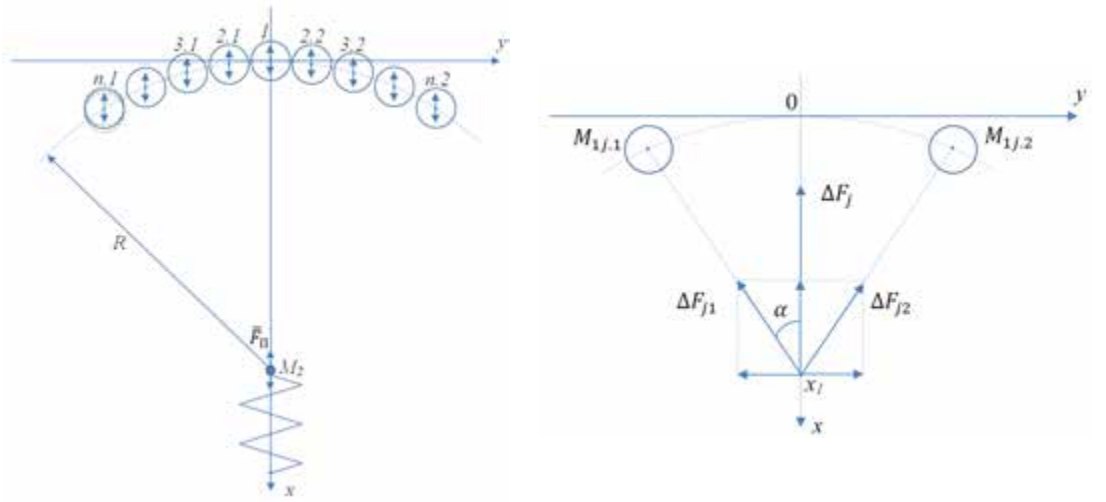


Рисунок 3 – Сборка сигнала из гармоничесих компонент

Вторым вариантом размещения масс M_{1i} является симметричное размещение четного числа масс зеркально-симметрично относительно оси x. В этом случае гармоническая сила $\Delta F_j(t)$, $j \in \{1, N/2\}$, формируемая в точке x_1 парой симметрично расположенных масс $M_{1j.1}$ и $M_{1j.2}$, рассчитывается с учетом того, что формируемые ими силы складываются векторно (рисунок 4,б).



а б

Рисунок 4 – Иллюстрация векторного сложения сил

Перемещение массы $M_{1j.1}$ приводит к формированию в точке x_1 переменной силы ΔF_{j1}, раскладываемой на две составляющие, направленные вдоль и перпендикулярно оси x. Сонаправленные составляющие сил, формируемых массами $M_{1j.1}$ и $M_{1j.2}$, формируют силу

$$\Delta F_{\text{j}} = 2\Delta F_{\text{j1}}\cos(\alpha),$$

а противоположно направленные – компенсируются.

Периодическое негармоническое перемещение масс M_{1i} может осуществляться различными способами. Например, с помощью управляемого электропривода, когда закон перемещения определяется программой, управляющей электродвигателем. Другим вариантом является перемещение массы за счет использования эксцентрика нужной формы.

Предложенный способ генерирования гравитационных сигналов позволяет сформировать в точке размещение тестируемой массы (детектора изменений гравитационного поля) малые изменения гравитационного поля, имеющие вид, описываемый заданной функцией на заданном временном интервале. Фиксация параметров положения или перемещений тестируемой массы (или определение параметров гравитационного поля другим образом) в виде временного ряда измеренных значений позволяет применить алгоритмы корреляционного обнаружения переданного сигнала известной формы.

Существенным вопросом, подлежащим обсуждению, является зависимость влияния силы на тестируемое тело при его смещении под воздействием этой силы из

заданной точки. Однако в технике известны решения, позволяющие дать на этот вопрос удовлетворительный ответ, суть которого состоит в том, что можно не допускать перемещение тела, размещенного, например, на крутильных весах, а компенсировать его движение изменением угла поворота нити за счет контроля микроскопических передвижений пробного тела. При этом сигнал управления в устройстве компенсации будет иметь форму передаваемого сигнала.

Заключение

Рассмотренные варианты формирования пространственно локальных сигналов в радио и гравитационных системах имеют существенное отличие от традиционных решений, широко используемых в системах передачи информации. Предложенный подход может стать новым направлением исследований, направленных на преодоление известных в электросвязи ограничений.

Описанные процедуры интерферометрической методики за пределами радиотехники характеризуют общий принцип грависвязи и предназначены для обеспечения экспериментальной проверки и отработки работоспособности предложенного способа. Полезность описанных действий соизмерима с полезностью первых опытов в области радиосвязи, когда передавались короткие радиограммы на небольшие расстояния, или, несколько позже, передавалась единственная буква через Атлантический океан. Для выполнения более сложных исследований необходимо выполнение ряда дополнительных экспериментов, которые должны позволить определить скорость распространения гравитационных волн, выявить ее зависимость от наличия и параметров среды и др.

Интерференционная методика может расширить диапазон целей экспериментов в области гравитации, традиционно ограниченный в современном научном мире повторением опыта Кавендиша с рекордно малыми массами и уточнением значения гравитационной постоянной.

Геворкян Арвид Грайрович – доктор технических наук, профессор, АО «НПО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: квантовые стандарты частоты и времени.
Email: noc.rnv@goz.ru

Сайбель Алексей Геннадиевич – доктор технических наук, доцент, профессор, АО «НПО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: радиокоординатометрия, моделирование и оптимизация сложных системы.
Email: saybel_ag@mail.ru

INTERFEROMETRIC SYNTHESIS OF LOCAL SIGNALS

This article analyzes research trends in the field of communication systems. It is shown that wave interference in radio waves and other physical environments is an important subject for future research. Options for remote interaction between end points of a communication line are considered. Differences in the transmission processes of radio and gravitational signals are demonstrated. A method for generating spatially local signals of a given shape is proposed.

Keywords: interference; wave process; radiation source; propagation time; test mass.
Gevorkyan Arvid Grayrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, JSC "Obukhov Plant", St. Petersburg.
Research interests: quantum standards of frequency and time.

Saybel Alexey Gennadievich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, JSC "Obukhov Plant", St. Petersburg.
Research interests: radio coordinatemetry, modeling and optimization of complex systems.

РАДИОНАВИГАЦИЯ
И ВРЕМЯ

№19 (27) – 2025

Подписано в печать 21.11.2025 Формат 84×108 1/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Объем 12,6 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 300-2025

АО НПО «Обуховский завод»
191124, Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, дом 120, литера Е.

Отпечатано в ООО «Издательство «Балтийская печать».
191119, Санкт-Петербург, ул. Звенигородская, д. 9-11, лит. К, пом. 17Н, ком. 130.