

ISSN 2224-1159

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»

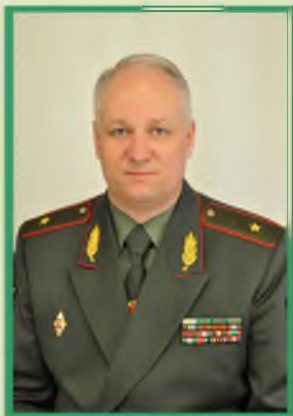
ВЕСТНИК ВОЕННОЙ АКАДЕМИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

№ 1 (58) 30 марта 2018 г.

65 лет



ВОЕННЫЙ НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



ОБРАЩЕНИЕ
начальника учреждения образования
□ Военная академия Республики Беларусь □

Уважаемые читатели
военного научно-теоретического журнала
□ Вестник Военной академии Республики Беларусь □

Данный номер журнала выходит в преддверии знаменательного праздника – 65-летия со дня образования Военной академии.

Наше учебное заведение является наследником традиций двух ведущих вузов военного профиля – Минского высшего зенитного ракетного училища ПВО и Минского высшего командного училища. В стенах данных учебных заведений за годы их существования были сформированы базовые военно-научные школы, деятельность которых послужила фундаментом создания и развития белорусской национальной системы подготовки военных кадров. Мы гордимся созданным руками наших предшественников богатейшим наследием, являющимся теоретической базой наших нынешних достижений и моральным ориентиром для дальнейшего развития.

Сегодня Военная академия Республики Беларусь является многопрофильным учреждением образования, обеспечивающим подготовку военных специалистов для Министерства обороны и других силовых ведомств. Высокий авторитет академии как ведущего военного учебного заведения государства базируется на успехах наших выпускников, которые в настоящее время несут ратную службу во всех точках Беларуси и являются основой ее Вооруженных Сил.

Предметом особой гордости личного состава академии являются наши достижения в науке, направленные на повышение обороноспособности государства. Они реализуются на основе создания новых и совершенствования существующих систем вооружения, развития форм и способов ведения боевых действий на стратегическом и оперативно-тактическом уровнях. Во взаимодействии с предприятиями оборонно-промышленного сектора государства ученые академии участвуют в создании передовых технологий в области ракетостроения, роботизированных беспилотных систем, военной радиоэлектроники и кибернетики.

Мы не стоим на месте. Осознавая нарастающую остроту военно-политической конкуренции между государствами в современном мире и обусловленную этим особую востребованность нашего труда, мы несем ответственность за опережающее развитие системы военного образования в целях обеспечения высокой обороноспособности государства.

Поздравляю Вас со знаменательным юбилеем нашей академии. Желаю творческого роста, новых успехов и самореализации в деле подготовки военных специалистов, крепкого здоровья и личного счастья. Выражаю твердую уверенность в достижении новых вершин в науке на благо нашей любимой Родины – Республики Беларусь.

Начальник учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь»
генерал-майор

В.А.Лисовский

ВЕСТНИК ВОЕННОЙ АКАДЕМИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

№ 1 (58) 30 марта 2018 г.

Военный научно-
теоретический журнал

Издается с 2003 года

Адрес редакции:

220057, г. Минск-57, учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», главный корпус, комн. № 264 А.
Тел: 287-45-15.

Издатель:

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь».

Свидетельство

о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/224 от 19.03.2014.

№ 2/81 от 19.03.2014.

Набор и верстка:

Демидова А. К.

Дизайн обложки:

Мацкевич А. Н.

Печать:

ЛП № 02330/76

от 27.03.2014 г.

Подписано в печать 20.03.18 г.

Формат 60×84/8. Бумага писчая.

Гарнитура «Таймс». Печать

ризография. Усл. печ. л. 13,95.

Тираж 100 экз. Зак. 117.

Отпечатано в типографии

учреждения образования

«Военная академия

Республики Беларусь».

220057, Минск-57.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Лапука О. Г., *главный редактор*, доктор технических наук, профессор;

Малкин В. А., *заместитель главного редактора*, доктор технических наук, профессор;

Гришкевич М. М., *секретарь*, кандидат военных наук, доцент;

Белько В. М., кандидат технических наук, доцент;

Вашкевич В. Р., кандидат технических наук, доцент;

Гринюк В. И., кандидат военных наук, профессор;

Калитин С. Б., кандидат технических наук, доцент;

Колодяжный В. В., доктор военных наук, профессор;

Ксенофонтов В. А., кандидат философских наук, доцент;

Куренёв В. А., доктор технических наук, профессор;

Лебёдкин А. В., доктор военных наук, профессор;

Осипов Г. А., кандидат военных наук, доцент;

Павлович В. С., доктор физико-математических наук, профессор;

Седышев С. Ю., кандидат технических наук, доцент;

Чубрик В. Г., кандидат военных наук, доцент.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь научный журнал «Вестник Военной академии Республики Беларусь» включен в перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований по военной, технической (информатика, вычислительная техника и управление; оружие и военная техника; радиотехника, связь, электроника и микроэлектроника) и педагогической (воинское обучение и воспитание, военная педагогика) отраслям науки.

СОДЕРЖАНИЕ

Основы военной науки и военного строительства

Лисовский В. А. Военная академия как научно-методический центр национального военного образования: история создания, состояние и перспективы развития.....	3
Избаш М. Ю., Рябоконт В. В., Душеина Л. В. Математическое моделирование противоборства оперативно-тактических группировок войск и распределение ресурсов по задачам боевых действий.....	13

Системный анализ и информационные технологии в военном деле

Косачев И. М., Чугай К. Н. Аналитическая математическая модель контура наведения зенитной телеуправляемой ракеты зенитного ракетного комплекса с комплексированной информационной системой	23
--	----

Общетеоретические вопросы разработки и совершенствования вооружения и военной техники

Крейдик Е. Л. Вероятностная характеристика селекции по времени прихода станции ответных помех при подавлении систем радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.....	35
Кузьмичев Н. К., Чигирь И. В., Горшков С. А. Анализ известных способов защиты моноимпульсных пеленгаторов от воздействия кросс-поляризационных помех.....	44
Лапука О. Г., Рахоцкий Д. А. Аналитический способ приближенной сепарации матричных сигналов.....	52
Сахарук Д. А., Шабанов В. П., Шаболтиев В. В. Обоснование технического облика беспилотных авиационных комплексов как этапа жизненного цикла изделий.....	59
Сидоренко С. Т., Кудерко В. В. Минимизация эффективной площади рассеяния логопериодической антенны коммутацией ее элементов.....	64
Чигирь И. В., Кузьмичев Н. К., Горшков С. А. Анализ воздействия комбинированной имитирующей и маскирующей помехи на системы сопровождения по дальности и скорости радиолокаторов точного измерения координат.....	71
Шашок В. Н., Коноплицкий А. С. Переходные фильтры с повышенной вариативностью функции передачи.....	82

Разработка, модернизация и эксплуатация вооружения и военной техники

Кривонос О. К., Ильющенко А. Ф., Петюшик Е. Е., Конопляник В. А. Основные направления развития неуправляемых авиационных ракет типа С-8.....	89
Макаревич Н. А., Богданович Н. И., Третьяков С. И., Лагунова Е. А., Шутова А. А. Изучение адсорбции органических веществ на наноуглеродном адсорбенте для средств индивидуальной защиты органов дыхания.....	98

Проблемы военной педагогики, воинского обучения и воспитания

Ксенофонтов В. А., Верлуп С. В., Тицкий А. Г. Информация как средство насилия.....	108
--	-----

ОСНОВЫ ВОЕННОЙ НАУКИ И ВОЕННОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 355.23

ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ КАК НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР НАЦИОНАЛЬНОГО ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ: ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В. А. Лисовский, кандидат военных наук, доцент*

В статье рассматриваются история создания национальной высшей военной школы, современное состояние высшего, послевузовского и дополнительного военного образования в главном военном учебном заведении страны, раскрываются направления дальнейшего развития этих компонентов и в целом системы непрерывного образования офицеров.

The article describes the historical outline of the national higher military education. It deals with the contemporary developments in graduate, postgraduate, and further military education at the leading military education establishment in the country, as well as prospects for development of the three component parts of the continuous officer training system.

Система подготовки офицерских кадров в национальной высшей военной школе является главным инструментом формирования кадрового потенциала Вооруженных Сил (ВС). Базовым военным учебным заведением в этой системе является учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», в котором сосредоточены ведущие в военном деле специалисты, ключевые военно-научные школы и костяк научных работников высшей квалификации [1].

Военная академия создана в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь № 192 от 17 мая 1995 г. на базах и территориях двух училищ – Минского высшего военного инженерного (МВВИУ) и Минского высшего военного командного.

История МВВИУ уходит своими корнями в начало 50-х годов XX в., когда в Гомеле было сформировано Гомельское высшее инженерное радиотехническое училище. Занятия в нем начались 4 мая 1953 г. Спустя год, 9 мая, училищу было вручено Боевое Знамя, а в августе 1954 г. высшее военное учебное заведение (далее – вуз) перевели в Минск. В 1968 году радиотехнический профиль училища меняется на зенитно-ракетный, и до 1992 г. оно именуется Минским высшим инженерным зенитным ракетным училищем противовоздушной обороны.

Минское высшее военное командное училище стало преемником Минского высшего военно-политического училища (МВВПОУ), которое начало отсчет своей истории 10 мая 1980 г.

После того, как Беларусь обрела статус самостоятельного государства, МВВПОУ было преобразовано в Минское высшее военное командное училище.

Создание Военной академии на базах и территориях двух вузов с целью усовершенствования системы военного образования и подготовки офицерских кадров Республики Беларусь [2] было обусловлено необходимостью полного перехода на самостоятельную подготовку офицеров тактического уровня для всех видов Вооруженных Сил и других силовых структур, а также создания командно-штабного факультета для подготовки офицерских кадров оперативно-тактического уровня с высшим военным образованием.

Для повышения престижа Военной академии и воспитания личного состава на исторических традициях военных училищ, на базе которых она была создана, приказом Министра обороны Республики Беларусь № 267 от 30 апреля 1998 г. был установлен День Военной академии – 4 мая. В связи с этим 4 мая 2018 г. будет отмечаться 65 лет со дня образования Военной академии Республики Беларусь.

В 2006 г. с открытием в Военной академии факультета Генерального штаба

Вооруженных Сил было завершено создание в белорусской национальной высшей военной школе системы подготовки офицерских кадров на всех уровнях военного образования: тактическом, оперативно-тактическом и оперативно-стратегическом (стратегическом). Военная академия стала единственным и уникальным вузом на постсоветском пространстве по количеству реализованных уровней и профилей подготовки офицерских кадров с высшим образованием в одном учреждении военного образования.

В нашей стране Военная академия имеет особый статус – она является научно-методическим центром по направлению образования «Военное дело» [3,4]. На базе академии функционирует учебно-методическое объединение учреждений высшего образования Республики Беларусь по военному образованию. Созданная в вузе многоуровневая система подготовки офицерских кадров (рисунок 1) позволяет осуществлять двухступенчатую подготовку офицеров на уровнях как высшего, так и послевузовского военного образования, а также повышение их квалификации.



Рисунок 1. – Многоуровневая система подготовки офицерских кадров

Подготовка офицеров с высшим образованием осуществляется:

на I ступени высшего образования – по 24 специальностям;

II ступени высшего образования – по 16 специальностям, в том числе:

в магистратуре с углубленной подготовкой специалистов (практико-ориентированной) – по 8 специальностям;

магистратуре по подготовке к научно-педагогической деятельности (научно-ориентированной) – по 8 специальностям.

На I ступени высшего образования очно обучаются курсанты (будущие офицеры тактического уровня) на факультетах общевойсковом, связи и автоматизированных систем управления, противовоздушной обороны, военной разведки, авиационном, внутренних войск, ракетных войск и артиллерии и ракетно-артиллерийского вооружения. Срок обучения составляет 4 года. Выпускникам присваивается квалификация «специалист по управлению» или «инженер» (в зависимости от специальности) и первичное офицерское звание «лейтенант».

На II ступени высшего образования:

в магистратуре с углубленной подготовкой специалистов (практико-ориентированной) с 1 сентября 2015 года начато обучение офицеров оперативно-тактического уровня (ОТУ) для сухопутных войск, военно-воздушных сил и войск противовоздушной обороны (срок обучения – 2 года) и оперативно-стратегического уровня (ОСУ) для ВС, других министерств и ведомств, а также иностранных государств (срок обучения с 1 сентября 2017 года – 1,5 года) с присвоением степени магистра управления и магистра государственного и военного управления соответственно (рисунок 2);

магистратуре по подготовке к научно-педагогической деятельности (научно-ориентированной) обучаются офицеры в течение 1 года в очной (по специальности «Тактика» с 1 сентября 2017 года – 2 года) и 1,5 года в заочной форме обучения, выпускнику присваивается степень магистра по отрасли наук (военных, технических).

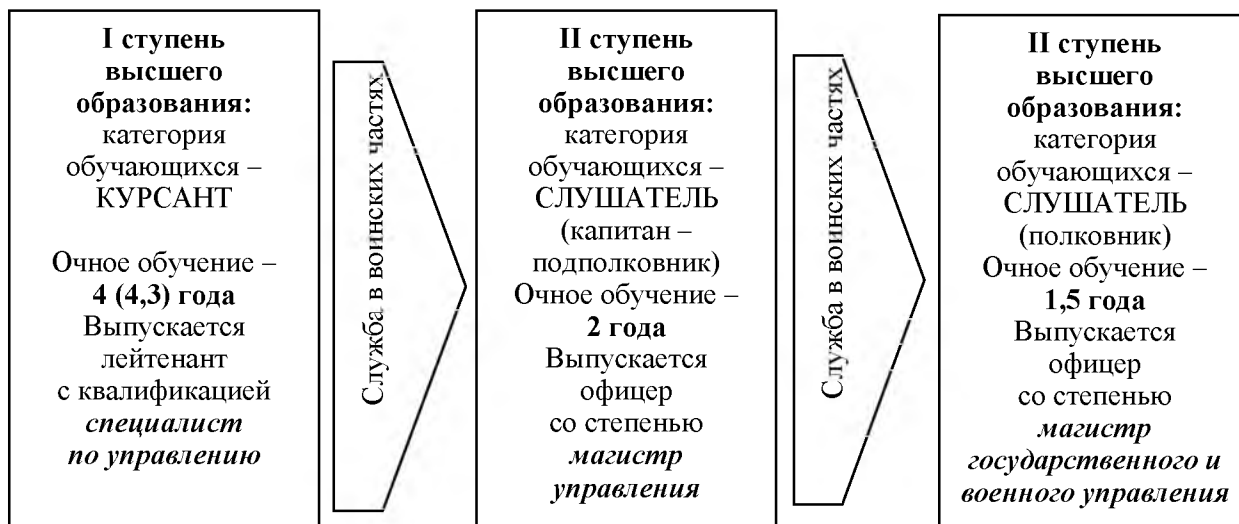


Рисунок 2. – Подготовка офицерских командных кадров с высшим образованием

Послевузовское военное образование офицеров (рисунок 3) реализуется на 2 ступенях – в адъюнктуре и докторантуре; в адъюнктуре – в дневной, заочной формах получения образования и форме соискательства; в докторантуре – в дневной форме и форме соискательства.

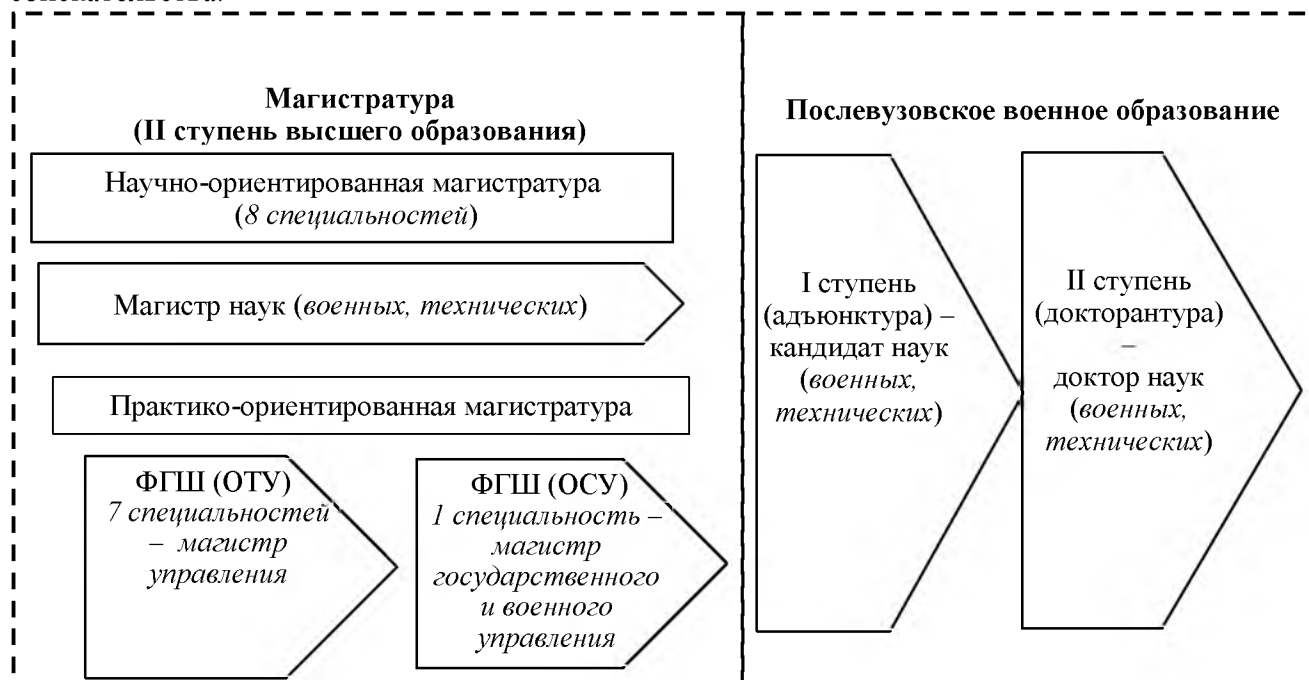


Рисунок 3. – Подготовка офицерских кадров высшей научной квалификации

Подготовка в адъюнктуре открыта по 11 научным специальностям, а в докторантуре – по 7 научным специальностям.

Сроки получения послевузовского образования составляют: дневная форма – не более 3 лет; заочная форма – не более 4 лет; форма соискательства – не более 5 лет. Образовательная программа адъюнктуры обеспечивает получение научной квалификации «исследователь» [5].

Для защиты диссертаций в академии функционируют 2 специализированных совета: докторский СД 04.01.01 по техническим наукам и кандидатский СК 04.01.02 по военным наукам.

Сотрудниками академии в 2013–2017 г. защищены 1 докторская и 34 кандидатских диссертации, получено 3 ученых звания «профессор» и 33 – «доцент».

Важную роль в непрерывном образовании офицерских кадров играет их дополнительное образование, которое включает переподготовку и повышение квалификации.

На базе факультета повышения квалификации и переподготовки кадров осуществляется повышение квалификации офицеров более чем на 45 различных видах курсов тактического, оперативно-тактического, оперативно-стратегического уровней управления, которые позволяют обеспечить необходимую профессиональную подготовку обучающихся и используются при назначении офицеров на командные либо инженерные должности, а также при освоении новых образцов вооружения, военной и специальной техники.

Образовательный процесс в академии организован на 44 кафедрах, из которых 16 – общеакадемические, а 28 кафедр закреплены за факультетами.

Для реализации задач подготовки офицерских кадров в академии сформирован достаточный педагогический и научный потенциал. Среди ППС, работающего на постоянной основе, 225 человек имеют ученые степени и звания (из них 12 докторов наук, 213 кандидатов наук, 9 профессоров).

Научно-методическое обеспечение образовательного процесса в академии осуществляется в соответствии с современными требованиями. Для этого за последние 5 лет разработаны по специальностям высшего образования I ступени 31 образовательный стандарт и типовые учебные планы и 8 образовательных стандартов и типовых учебных планов по специальностям высшего образования II ступени.

Сегодня курсантам и слушателям преподается более 700 учебных дисциплин, которые обеспечены учебниками, учебными и учебно-методическими пособиями, кроме того, 510 дисциплин (за исключением секретных и для служебного пользования) обеспечены электронными учебно-методическими комплексами в локальной сети академии.

В течение 2013–2017 гг. в академии разработано и издано 835 наименований учебно-методических разработок, в том числе: учебники с грифом Минобразования, Минобороны – 24; учебные пособия с внешним рецензированием – 154; учебно-методические и другие материалы – 657.

В образовательном процессе академии принимают участие руководящий состав ВС и представители заказчика военных кадров по различным направлениям, включая:

разработку и уточнение квалификационных требований к выпускникам, уточнение и согласование учебных планов и программ обучения, в том числе повышения квалификации на офицерских, академических и высших академических курсах;

проведение анализа прохождения военной службы выпускниками Военной академии, составление отзывов и заключений с предложениями по совершенствованию образовательного процесса;

обеспечение проведения и контроль прохождения войсковых стажировок (практик) с курсантами и слушателями, стажировок профессорско-преподавательского состава;

проведение учебных занятий;

обеспечение Военной академии необходимыми учебно-тренировочными, тренажерными и другими материальными средствами.

В настоящее время учебно-материальная база академии включает 15 учебных корпусов, размещенных в 5 городках, 30 лекционных аудиторий, более 300 специализированных учебных помещений (в том числе 28 компьютерных классов, 1 лингафонный кабинет и 215 специализированных классов, лабораторий, кабинетов, мастерских), учебные библиотеки, учебный научно-исследовательский полигон, войсковое стрельбище, тир, спортзалы, спортгородки, стадион.

В учебных корпусах созданы локальные компьютерные сети.

Сегодня в академии эксплуатируется 2438 современных ПЭВМ (в том числе 366 ноутбуков), более 170 копировально-множительных устройств, около 380 современных принтеров, 100 сканеров, 356 мультимедийных проекторов. Компьютерные классы построены по принципу локальных вычислительных сетей. В корпоративной компьютерной сети академии зарегистрировано 1568 пользователей. Оборудованы 2 локальные вычислительные сети для доступа в Интернет, включающие 61 ПЭВМ.

В процессе обучения курсантов и слушателей используются 1231 программный продукт, разработанный собственными силами, и 142, полученных через довольствующий орган или закупленных у производителей программного обеспечения.

В целях обеспечения образовательного процесса в академии содержится более 450 единиц вооружения и военной специальной техники (ВВСТ), размещенных на кафедрах и в лабораториях, в парках, на полигонах и аэродромах, в центре обеспечения учебного процесса. Для формирования практических навыков при освоении образцов ВВСТ используется более 50 тренажеров. В ходе обучения применяется также учебная база воинских частей и предприятий. В настоящее время практическая составляющая подготовки – в среднем 62,3 % от общего бюджета времени на обучение.

В соответствии с Уставом Военной академии [4] наряду с образовательной деятельностью основной задачей учреждения образования является осуществление научной деятельности в области обеспечения национальной безопасности Республики Беларусь, в том числе укрепления обороноспособности государства.

Основными направлениями научной деятельности академии в настоящее время являются:

развитие теории подготовки и применения видов Вооруженных Сил, родов войск, специальных войск, вооружения и тыла;

совершенствование системы всестороннего обеспечения боевых действий Вооруженных Сил, их повседневной деятельности, повышение их боеспособности и живучести;

развитие системы управления и автоматизация ее процессов за счет использования современных информационных технологий;

изучение новых возможностей по противодействию современным средствам высокоточного оружия;

разработка нормативных технических документов системы общих технических требований к комплексам (системам) ВВСТ и методам (методикам) их испытаний;

разработка тактико-технических требований к перспективным образцам (системам) вооружения, военной и специальной техники, предложений по созданию новых и модернизации существующих образцов ВВСТ, а также по их боевому применению;

разработка математических моделей боевых действий группировок, оценка эффективности боевых действий. Разработка предложений по использованию современных информационных технологий в практике оперативной и боевой подготовки войск;

разработка специального программного обеспечения, программно-аппаратных средств, обеспечивающих функционирование комплексов (систем) ВВСТ (оборудования);

совершенствование системы технической эксплуатации, технического обслуживания и ремонта ВВСТ;

научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций, разработка базовых военных технологий;

совершенствование системы комплектования войск (сил) и подготовки военных кадров в соответствии с современными требованиями;

исследование вопросов военной психологии, педагогики и социальных наук.

О масштабах проводимых научных исследований свидетельствуют цифры. Так, за период 2013–2017 гг. преподавательским и научным составом выполнено 327 научно-исследовательских (НИР) и 7 опытно-конструкторских работ (ОКР), из них:

по заказу управлений и служб Генерального штаба Вооруженных Сил, Министерства обороны Республики Беларусь, видов Вооруженных Сил, Министерства внутренних дел Республики Беларусь – 156;

в рамках двух государственных научно-технических программ и двух госпрограмм научных исследований – 9 НИР;

по договорам с предприятиями и научными организациями республики – 22, инициативных – 231.

Результаты 209 завершенных НИОКР внедрены в практику войск и образовательный процесс с оформлением актов внедрения при модернизации существующих и разработке новых образцов вооружения и военной техники, в проекты нормативных документов, при совершенствовании организационно-штатной структуры подразделений, воинских частей.

Сотрудники академии в 2013–2017 гг. привлекались к военно-научному сопровождению 118 проектов НИР и ОКР по созданию комплексов средств автоматизации и автоматизированных систем управления, модернизации существующих, а также разработке 6 новых образцов ВВСТ в интересах Министерства обороны в рамках государственных программ, по распоряжениям Главы государства и в соответствии с приказами Министра обороны Республики Беларусь. Ученые академии приняли активное участие в создании принятой на вооружение ВС страны реактивной системы залпового огня «Полонез», постоянно демонстрируют свои научно-исследовательские разработки на международных форумах и выставках вооружения и военной техники.

По результатам военно-научных и научно-технических исследований, проводимых преподавательским и научным составом, в Военной академии 5 раз в год выпускается военный научно-теоретический журнал «Вестник Военной академии Республики Беларусь» и 2 раза в год «Сборник научных статей Военной академии Республики Беларусь».

Научно-педагогическим составом академии в 2013–2017 гг. изданы 23 монографии, 82 сборника научных статей (включая сборники тезисов докладов), получено 90 патентов на полезные модели и изобретения.

В общей системе научной работы вуза осуществляется военно-научная работа курсантов и слушателей, которая тесно увязана с образовательным процессом, плановыми научными исследованиями, изобретательской и рационализаторской работой.

Военно-научная работа курсантов и слушателей осуществляется в рамках функционирования военно-научного общества (ВНО) академии, которое состоит из 8 военно-научных обществ факультетов и 47 научных кружков кафедр.

Курсанты – участники ВНО успешно участвуют в республиканских конкурсах студенческих научных работ и в международных олимпиадах. Так, в 2013–2017 гг. курсанты академии представили на республиканские конкурсы научных работ студентов вузов 177 научных работ, из которых были удостоены диплома Лауреата – 1, 1-й степени – 28, 2-й степени – 70 и 3-й степени – 30 научных работ; участвовали в 17 международных олимпиадах (64 человека). В 2017 году курсанты академии успешно выступили на финальном (международном) этапе олимпиады курсантов образовательных организаций высшего образования. По итогам олимпиады команды академии заняли в абсолютном командном первенстве среди команд государств – участников СНГ по дисциплинам «Военная история» и «Информатика» 2-е место, «Математика» и «Иностранный язык» – 3-е место.

Результатами научно-образовательной деятельности академии стали:

аккредитация ее в 2013 году в качестве научной организации в Государственном комитете по науке и технологиям Республики Беларусь и Национальной академии наук Беларуси;

признание победителем среди организаций, осуществляющих научные исследования и разработки, и занесение на республиканскую Доску почета;

награждение в марте 2015 года Премией Правительства Республики Беларусь за достижения в области качества.

В ноябре 2017 года комиссия Департамента контроля качества образования Министерства образования подтвердила государственную аккредитацию Военной академии на соответствие заявленному виду и по специальностям, а также аккредитовала по 12 новым открытым специальностям высшего образования (3 специальности I ступени и 9 специальностей II ступени). Комиссия признала, что Военная академия:

соответствует критериям, установленным для учреждений образования вида профильный университет (академия);

обеспечивает соответствие ресурсного, научно-методического обеспечения образовательного процесса по специальностям высшего образования I и II ступеней установленным требованиям;

обеспечивает соответствие содержания и качества образования по специальностям высшего образования I ступени требованиям образовательных стандартов и учебно-программной документации.

Следует отметить также международное признание и авторитет Военной академии, что подтверждается возрастающей заинтересованностью зарубежных стран в подготовке своих военнослужащих в научно-методическом центре белорусского военного образования.

В настоящее время в академии не прекращается работа над совершенствованием образовательного процесса и развитием системы подготовки офицеров с учетом процесса непрерывного строительства и развития национальных ВС, их технического переоснащения, анализа и привнесения положительного международного опыта [6–8] в сферу высшего военного образования.

В современных условиях главное военное учебное заведение страны связывает перспективы своего дальнейшего развития со следующими направлениями [9]:

1) совершенствование структуры и содержания высшего, послевузовского и дополнительного военного образования;

2) повышение педагогической и научной квалификации преподавательского и управленческого состава факультетов и кафедр;

3) совершенствование научно-методического обеспечения образовательного процесса;

4) повышение мотивации участников образовательного процесса;

5) совершенствование материально-технического обеспечения образовательного процесса;

6) повышение эффективности управления образовательным процессом и его обеспечением;

7) развитие нормативной правовой базы военного образования.

Каждое из приведенных направлений развития может быть реализовано и уже реализуется посредством комплекса мер и мероприятий.

Первое направление, имеющее целью совершенствование структуры и содержания высшего, послевузовского и дополнительного военного образования, предполагает:

уточнение перечня специальностей подготовки военных кадров на I и II ступенях высшего образования по направлению образования «Военное дело», в том числе с учетом перевода обучения курсантов по группе специальностей «Военно-инженерная деятельность» с 5 лет на 4 года;

открытие подготовки в адъюнктуре (в системе послевузовского образования) по новым специальностям, соответствующим профилю подготовки специалистов на

отдельных факультетах и кафедрах: «Общие основы военной науки, военное строительство, строительство Вооруженных Сил»; «Стратегия, военные аспекты безопасности государства, военная политология»; «Радиоэлектронная борьба (способы и средства»);

введение в номенклатуру специальностей научных работников Республики Беларусь новых актуальных для ВС специальностей, в том числе на основе зарубежного опыта [10], таких как 20.02.27 – информационное противоборство в военной сфере.

Для реализации второго направления, имеющего целью повышение педагогической и научной квалификации, научного потенциала преподавательского и управленческого состава факультетов и кафедр, предусматривается реализация следующих мер:

совершенствование процесса отбора кандидатов из органов военного управления и войск для выдвижения их на преподавательскую работу путем создания резерва офицеров, склонных к педагогической и научно-исследовательской деятельности, и проведения по соответствующей методике профессионально-психологического отбора кандидатов из резерва для замещения должностей ППС;

повышение эффективности процесса становления начинающих преподавателей, не имеющих педагогического образования, не обучавшихся в адъюнктуре (аспирантуре) и впервые назначенных на должности ППС, путем направления их в течение первого года на переподготовку по специальности «Педагогическая деятельность в высшей военной школе» в целях всесторонней подготовки к педагогической деятельности с получением дополнительной квалификации «преподаватель высшей школы»;

активизация работы с выпускниками адъюнктуры, своевременно не представившими результаты диссертационных исследований на предварительную экспертизу;

расширение форм стимулирования преподавательского и управленческого состава по повышению педагогической и научной квалификации, в том числе совершенствование методики оценки педагогической и научной деятельности ППС, кафедр и факультетов;

совершенствование процесса военно-научного образования преподавательского и управленческого состава на основе:

– разработки и реализации программ сети курсов повышения научной квалификации в области методологии и методики проведения военно-научных исследований (военно-теоретических, военно-технических, военно-педагогических и др.);

– открытия подготовки по новым специальностям отрасли «Военные науки» в адъюнктуре (в том числе в заочной форме и путем соискательства) и научно-ориентированной магистратуре, соответствующих профилю образовательной деятельности отдельных кафедр и факультетов;

– формирования, с использованием зарубежного опыта [11], военно-исследовательских школ (на базе кафедр и научных подразделений) по открытым и открываемым в адъюнктуре специальностям («Военная разведка», «Военные системы управления, связи и навигации», «Радиоэлектронная борьба (способы и средства)») и организации подготовки в них специалистов по преемственным интегрированным образовательным программам научно-ориентированной магистратуры и адъюнктуры [12];

– создания кандидатских диссертационных советов по новым военно-научным специальностям (первый совет по специальностям «Военная разведка», «Военные системы управления, связи и навигации», «Радиоэлектронная борьба (способы и средства)»; второй совет по специальностям «Общие основы военной науки, военное строительство, строительство Вооруженных Сил», «Стратегия, военные аспекты безопасности государства, военная политология»).

По третьему направлению, предусматривающему совершенствование научно-методического обеспечения образовательного процесса, необходимо осуществить:

повышение уровня обеспечения учебниками и учебными пособиями с грифом Минобороны и Минобразования преподаваемых дисциплин, а также научно-исследовательской работы обучающихся в магистратуре и адъюнктуре [13];

разработку на основе опыта советской [14] и зарубежной высшей школы [15]

в дополнение к действующим программам кандидатского минимума программ подготовки адъюнктов как специалистов высшей научной квалификации.

Реализация четвертого направления, имеющего целью повышение мотивации участников образовательного процесса, предусматривает расширение форм стимулирования педагогов и обучающихся за достигнутые результаты, включая:

финансовое поощрение и чествование лучших преподавателей (в том числе за внедрение в образовательный процесс инновационных педагогических технологий), а также обучающихся за их достижения;

присвоение почетных званий лучшим педагогам и популяризацию их опыта;

совершенствование рейтинговой оценки деятельности преподавателей и обучающихся (курсанты, магистранты и адъюнкты);

установление стипендий Министра обороны курсантам, магистрантам, адъюнктам и докторантам, добившимся значительных показателей в учебе и научной работе.

По пятому направлению в целях совершенствования материально-технического обеспечения образовательного процесса предусмотрены следующие меры:

получение современных образцов вооружения, военной и специальной техники, тренажеров и учебно-тренировочных средств;

внедрение разработок научно-исследовательского центра моделирования военных действий и отдела информационных технологий в образовательный процесс;

обновление и совершенствование учебно-лабораторной базы;

проведение ремонта аудиторного фонда факультетов и кафедр.

Шестое направление развития, предусматривающее повышение эффективности управления образовательным процессом и его обеспечением, предполагает:

оптимизацию организационно-штатной структуры академии и ее подразделений;

уточнение задач структурных подразделений, обязанностей должностных лиц и их закрепление в Уставе академии, ведомственных и вузовских правовых актах;

совершенствование системы электронного документооборота на всех уровнях вуза;

развитие кадрового резерва в соответствии с управленческими должностями академии.

По седьмому направлению для развития нормативной правовой базы военного образования предусмотрено (до вступления в силу Закона Республики Беларусь «О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Беларусь «О научной деятельности» и Кодекс Республики Беларусь об образовании») своевременно и качественно осуществить переработку и разработку нормативных правовых актов системы военного образования на межведомственном, ведомственном и вузовском уровнях.

Подводя итог, необходимо отметить, что для осуществления перспективного развития системы подготовки офицерских кадров в научно-методическом центре национального военного образования потребуется реализация комплекса мер, сосредоточенных на конкретных практических мероприятиях, приоритетными из которых должны стать: совершенствование военного образования на всех уровнях (высшего, послевузовского, дополнительного); повышение педагогической и научной квалификации преподавательского и управленческого состава факультетов и кафедр; улучшение мотивации всех участников образовательного процесса; усиление практической направленности образовательного процесса; расширение базы материально-технического обеспечения; использование положительного опыта развития систем образования других стран с учетом экономической целесообразности и эффективности.

Руководство и ППС Военной академии с высоты своего 65-летнего опыта подготовки военных специалистов, несмотря на многие объективные и субъективные трудности, способны и готовы реализовать намеченные планы в дальнейшем развитии системы подготовки офицерских кадров.

Список использованных источников

1. Пузиков, М.В. Система военного образования в Республике Беларусь : актуальные вопросы функционирования и направления совершенствования / М. В. Пузиков // Армия. – 2013. – №1–2. – С. 26 – 31.
2. Об образовании Военной академии Республики Беларусь: Указ Президента Респ. Беларусь, 17 мая 1995 г., № 192.
3. Инструкция о порядке организации работы военно-учебного заведения : постановление М-ва обороны и М-ва образования Респ. Беларусь, 5 марта 2008 г., № 20/20 (в ред. 23/23).
4. Устав учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» : Указ Президента Респ. Беларусь, 25 марта 2003 г., № 127: в ред. Указа Президента Респ. Беларусь от 16 апр. 2013 г. № 195.
5. Кодекс Республики Беларусь об образовании: с изм. и доп. по состоянию на 21 сент. 2016 г. – Минск: Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь, 2016.
6. Румынов, Д. Система подготовки офицеров вооруженных сил ФРГ / Д. Румынов // Зарубеж. воен. обозрение. – 2014. – № 9. – С. 24–34.
7. Вылугин, В. В. Особенности подготовки военных кадров за рубежом / В. В. Вылугин, Г. П. Куприянов, С. Г. Чекинов // Вестн. Акад. воен. наук. – 2011. – № 4. – С. 89–96.
8. Фаличев, О. Военные вузы – обратный ход / О. Фаличев // Воен.- промышл. курьер. – 2013. – 16–22 окт. – № 40 (508).
9. Лисовский, В. А. Современное состояние и перспективы развития системы подготовки офицерских кадров в национальной высшей военной школе / Сб. науч. ст. Междунар. воен.-науч. конф. «Обеспечение военной безопасности государства: проблемы и перспективы», Минск, 23–24 марта 2017 г. // Воен. акад. Респ. Беларусь; под общ. ред. В. А. Лисовского, М. Ю. Избаша. – Минск, ВА РБ, 2017. – Ч. 1. – С. 23–30.
10. Инструкция о порядке организации и осуществления образовательной деятельности по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в адъюнктуре. – СПб. : Воен.-косм. акад. им. А. Ф. Можайского, 2016.
11. Бедный, Б. И. Подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре: исследовательские школы / Б. И. Бедный, В. Б. Казанцев, Е. В. Чупрунов // Высш. образование в России. – 2014. – № 6. – С. 34–42.
12. Бедный, Б.И. Интегрированные образовательные программы «Академическая магистратура – аспирантура» / Б.И. Бедный, О.А. Кузенков // Высш. образование в России. – 2016. – № 5. – С. 21–32.
13. Исследование системы научно-методического обеспечения организации и ведения образовательного процесса в военных учебных заведениях, на военных кафедрах и выработка предложений по ее совершенствованию и развитию : отчет о НИР (шифр «Методика») / Воен. акад. Респ. Беларусь ; науч. рук. В. М. Белько. – Минск, 2015. – 248 с.
14. Типовые учебные программы подготовки адъюнктов военных учебных заведений и научно-исследовательских учреждений Министерства обороны СССР. – М., 1988. – 143 с.
15. Муратова, Е. И. Особенности разработки учебного плана аспирантов / Е. И. Муратова, С. И. Дворецкий, А. Ю. Иванов // Высш. образование в России. – 2015. – № 2. – С. 40–48.

*Сведения об авторе:

Лисовский Виктор Александрович,
 УО «Военная академия Республики Беларусь».
 Статья поступила в редакцию 06.02.2018 г.

УДК 358.1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТИВОБОРСТВА ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКИХ ГРУППИРОВОК ВОЙСК И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ ПО ЗАДАЧАМ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ

М. Ю. Избаш, кандидат военных наук, доцент;

В. В. Рябоконт;

Л. В. Душеина, кандидат технических наук*

Данной публикацией продолжается цикл статей, посвященных формированию возможного подхода к математическому моделированию вооруженного противоборства оперативно-тактических группировок войск и распределению ресурсов по решаемым войсками задачам. В первой части был представлен общий подход к математическому описанию процесса боевых действий. Вашему вниманию в рамках рассматриваемого примера показаны результаты прогнозирования боевых действий.

This publication the cycle of articles devoted to formation of the possible approach to mathematical modelling of the armed antagonism of operational and tactical groupings of armies and distribution of resources on problems solved by armies proceeds. In the first part the general approach to the mathematical description of process of operations has been presented. Your attention within the limits of a considered example accepts results of forecasting of operations.

Введение

Уточнение подходов к математическому моделированию вооруженного противоборства является актуальной и важнейшей из задач.

Научно обоснованные организационные формы, стиль и методы работы командования и штабов применительно к конкретным условиям подготовки и ведения боевых действий должны, во-первых, вооружить должностных лиц органов управления исходными положениями по осуществлению управления, во-вторых, внести строгость и четкость в творческий процесс управления, обеспечить рациональную последовательность и высокое качество решения стоящих перед ним задач, распределение усилий и средств при их выполнении, в третьих, создать благоприятные условия для работы при решении каждой задачи. Вместе с тем крайне важно иметь инструмент для поддержки (обоснования) управленческих решений. Рассмотрим пример, демонстрирующий порядок такого обоснования.

Пример моделирования боевых действий.

Исходные данные и постановка задачи

Сторона А созданной группировкой войск готовит наступательные боевые действия против стороны В. Сторона В планирует проведение оборонительных боевых действий. Решение стороны В предполагает достижение поставленных целей путем решения двух последовательных оборонительных задач. Продолжительность выполнения первой составляет 1 сутки, второй – 1 сутки (в рамках каждой из задач свойства взаимодействующих элементов меняются с течением времени незначительно). На боевые действия стороне В выделен определенный ресурс боеприпасов. Боевые действия ведутся до 10 часов в сутки. В таблицах 1–3 представлены исходные данные о количественно-качественном составе противоборствующих группировок.

Таблица 1. – Значения ролевых коэффициентов k_{pi} ($i=1, 2, 3, 4$) подсистем группировки войск стороны А

Наименование подсистемы, I	Решаемые задачи боевых действий	
	первая	вторая
1. Подсистема управления, k_1	0,4	0,2
2. Подсистема полевой артиллерии, k_2	0,3	0,3
3. Подсистема ближнего боя, k_3	0,1	0,3
4. Подсистема МТО, k_4	0,2	0,2

Стороне В необходимо последовательным решением двух задач при установленном боевом составе группировки войск и выделенном ресурсе боеприпасов обеспечить максимальное снижение боевых возможностей противостоящей группировки стороны А путем рационального распределения ресурсов боеприпасов по задачам боевых действий, объектам и средствам поражения [1, 2].

Таблица 2. – Объекты противоборствующей стороны А

Наименование подсистемы	Состав группировки				
			ПУ объед.	ПУ соед.	ПУ частей
1. Подсистема управления	Группы однотипных объектов, J_1				
	количество, n_{1j}	3	6	24	32
	коэффициент важности, q_{1j}	0,5	0,3	0,15	0,05
	дальность размещения, d_{1j} , км	20	8	5	1
	норма расхода боеприпасов, H_{1j} , условных боеприпасов	1200	800	600	200
2. Подсистема полевой артиллерии	Группы однотипных объектов, J_2	тип 1	тип 2	тип 3	
	количество батарей, n_{2j}	6	9	15	
	коэффициент важности, q_{2j}	0,6	0,25	0,15	
	дальность размещения, d_{2j} , км	8	4	2	
	норма расхода боеприпасов, H_{2j} , условных боеприпасов	400	200	600	
3. Подсистема ближнего боя	Группы однотипных объектов, J_3	тр	мпр	пр	
	количество рот, n_{3j}	24	42	30	
	коэффициент важности, q_{3j}	0,45	0,4	0,15	
	дальность размещения, d_{3j} , км	0	0	0	
	боевой состав, N_{3j} , ед.	14	23	10	
	Группы однотипных объектов, J_1	ПУ объед.	ПУ соед.	ПУ частей	ПУ подр.
	боевая мощь, P_{3j} , ед./10 мин	0,417	0,311	0,072	
норма расхода боеприпасов, H_{3j} , условных боеприпасов	1200	600	200		
4. Подсистема МТО	Группы однотипных объектов, J_4	скл. объед.	скл. соед.	скл. частей	
	количество, n_{4j}	2	4	16	
	коэффициент важности, q_{4j}	0,5	0,35	0,15	
	дальность размещения, d_{4j} , км,	40	15	8	
	норма расхода боеприпасов, H_{4j} , условных боеприпасов	600	600	400	

Выделенные ресурсы максимальны на начало боевых действий и со временем уменьшаются (расход ресурсов, потери в бою). Пополнение ресурсов в рамках данной задачи не предусматривается (как допущение). Таким образом, при моделировании операции величины n_{ij} , b_{ab} являются переменными, изменяющимися во времени:

$$n_{ij} = n_{ij}(t), \quad b_{ab} = b_{ab}(t).$$

Будем полагать, что объекты стороны А, входящие в 1, 2 и 4-ю подсистемы, поражаются только дальним огневым воздействием стороны В. Объекты трех подсистем противоборствующих сторон А и В ведут дуэльный бой. Реально объекты 3-й подсистемы стороны А также могут быть поражены и средствами огневого поражения стороны В, но этим воздействием на них будем пренебрегать, полагая, что основной целью все же являются объекты 1, 2 и 4-й подсистем стороны А. Кроме того, в целях упрощения задачи результаты дальнего огневого поражения стороны А по объектам стороны В также не учитываются.

Общее количество боеспособных объектов трех подсистем противоборствующих сторон А и В в дуэльном бою будет определяться следующим образом:

$$n_3(t) = \sum_{j=1}^3 n_{3j}(t), \quad b_3(t) = \sum_{b=1}^3 b_{3b}(t).$$

Результаты прогнозирования противоборства сторон в дуэльном бою достаточно справедливо описываются следующей системой линейных дифференциальных уравнений [1]:

$$\begin{cases} \frac{dn_3(t)}{dt} = -(b_{31}(t)N_{31}P_{31} + b_{32}(t)N_{32}P_{32} + b_{33}(t)N_{33}P_{33}); \\ \frac{db_3(t)}{dt} = -(n_{31}(t)N_{31}P_{31} + n_{32}(t)N_{32}P_{32} + n_{33}(t)N_{33}P_{33}). \end{cases} \quad (9)$$

Решение этой системы уравнений определяется [3]:

$$\begin{cases} n_3(t) = \frac{1}{2} \left(\left(n_3 - b_3 \cdot \sqrt{\frac{A}{B}} \right) \cdot e^{\sqrt{A \cdot B} \cdot t} + \left(n_3 + b_3 \cdot \sqrt{\frac{A}{B}} \right) \cdot e^{-\sqrt{A \cdot B} \cdot t} \right); \\ b_3(t) = \frac{1}{2} \left(\left(b_3 - n_3 \cdot \sqrt{\frac{B}{A}} \right) \cdot e^{\sqrt{A \cdot B} \cdot t} + \left(b_3 + n_3 \cdot \sqrt{\frac{B}{A}} \right) \cdot e^{-\sqrt{A \cdot B} \cdot t} \right), \end{cases} \quad (10)$$

где $A = \frac{\sum_{j=1}^3 n_{3j}^2 N_{3j} P_{3j}}{n_3}$ – коэффициент, характеризующий боевую мощь стороны А;

$B = \frac{\sum_{b=1}^3 b_{3b}^2 N'_{3b} P'_{3b}}{b_3}$ – коэффициент, характеризующий боевую мощь стороны В.

С учетом допущения о том, что в бою объекты с большей боевой мощью поражаются в первую очередь, значения параметров $n_{3j} = n_{3j}(t)$, $j = \overline{1, 3}$; $b_{3b} = b_{3b}(t)$, $b = \overline{1, 3}$ могут быть определены как

$$\begin{cases} n_{3j}(t) = n_{3j} - (n_3 - n_3(t)) \frac{N_{3j} P_{3j}}{\sum_{j=1}^3 N_{3j} P_{3j}}, j = \overline{1, 3}; \\ b_{3b}(t) = b_{3b} - (b_3 - b_3(t)) \frac{N'_{3b} P'_{3b}}{\sum_{b=1}^3 N_{3b} P_{3b}}, b = \overline{1, 3}. \end{cases} \quad (11)$$

Таблица 3. – Объекты противоборствующей стороны В

Наименование подсистемы	Состав группировки			
2. Подсистема полевой артиллерии	Группы однотипных объектов, B_2	тип 1	тип 2	тип 3
	количество огневых ед., b_{2b}	1	2	3
	коэффициент важности, q_{2b}	0,6	0,25	0,15
	дальность действия, d_{2b} , км	30	18	12
	боев. напр., $V_{арт\ 2b}$, об/сут	2	5	5
	выд. ресурс боеприпасов $R_{выд\ 2b}$, условных боеприпасов	4000	8000	14000
3. Подсистема ближнего боя	Группы однотипных объектов, B_3	тр	мпр	пр
	количество рот, b_{3b}	12	30	30
	боевой состав, N'_{3b} , ед.	10	20	10
	боев. мощь, P'_{3b} , ед./10 мин	0,85	0,42	0,218

Возможность поражения объектов группировки стороны А (1 – если объект поражен, 0 – если нет) определяется значением I_{ijk2b} индикатора поражения k -го объекта j -й группы i -й подсистемы b -м огневым средством 2-го типа стороны В:

$$I_{ijk2b} = \begin{cases} 1, \text{ если } b_{2b} > 0, R_{ijk2b} \leq R_{2b}(t), d_{ijk2b} \leq D_{2b}; \\ 0. \end{cases} \quad (12)$$

При этом ограничения определяются условиями боевой обстановки:

$$b_{2b} > 0 - \quad (13)$$

наличие у стороны В средств поражения 2-го типа;

$$R_{ijk2b} = H_{ij} - \quad (14)$$

для поражения k -го объекта j -й группы i -й подсистемы стороны А используется установленная норма расхода боеприпасов;

$$R_{ijk2b} \leq R_{2b}(t) - \quad (15)$$

наличие боеприпасов для поражения k -го объекта j -й группы i -й подсистемы стороны А к b -му огневому средству поражения 2-го типа;

$$d_{ijk2b} \leq D_{2b} - \quad (16)$$

максимальная дальность стрельбы огневого средства поражения 2-го типа, позволяющая ему поражать k -й объект j -й группы i -й подсистемы стороны А;

$$L_{ij}(t) \leq \sum_{b=1}^B V_{арт2b} b_{2b} t - \quad (17)$$

количество пораженных объектов не может превышать боевого напряжения огневых средств 2-го типа стороны В;

$$R_{2b}(t) = R_{выд\ 2b} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{L_{ij}(t)-1} R_{ijk2b} - \quad (18)$$

остаток ресурса боеприпасов b -го огневого средства поражения 2-го типа на время t .

Суть решения сформулированной задачи будет заключаться в том, чтобы при известных условиях дуэльного противоборства сторон в ходе боевых действий определить объекты стороны А, поражение которых приводит к максимальному снижению боевых возможностей при решении 1-й и 2-й задач, после чего распределить по этим объектам выделенный ресурс боеприпасов таким образом, чтобы найти минимально возможное в данных условиях значение боевых возможностей группировки А.

Предполагая, что в ходе выполнения соответственно 1-й и 2-й задач боевых действий, в которых зависимости взаимодействующих элементов меняются с течением времени

незначительно, процесс решения сформированной задачи будет представлять собой композицию из трех последовательно решаемых задач линейного программирования по определению *минимального значения функции $\Psi(t)$ – степени реализации боевых возможностей противника для заданных условий и ограничений.*

Минимизация функции $\Psi = \Psi(t, \bar{X})$ для 1-й задачи боевых действий

Для удобства решения задачи математического программирования [1] (4)–(18) многоуровневую индексацию данных и переменных величин алгоритмизации заменим одноуровневой. Введем переменные векторы числа боеспособных (действующих) объектов в группах подсистем А и В соответственно

$$\bar{n}(t) = n'_i = (n_1, n_2, n_3, \dots, n_{13}), \quad \bar{b}(t) = b'_b = (b_1, b_2, \dots, b_{13}), \quad i = b = \overline{1, 13}$$

и вектор потерь объектов стороны А при огневом воздействии на них объектов стороны В

$$\bar{X}(t) = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_{39}).$$

Рассмотрим более подробно описание их координат $x_k = x_k(t) \geq 0$, $k = \overline{1, 39}$ (здесь k – порядковый номер группы однотипных объектов при их поражении различными огневыми средствами).

Потери групп объектов стороны А, нанесенные стороной В, обозначим следующим образом:

Потери стороны А, нанесенные объектам 1-й подсистемы:

x_1, x_2, x_3 – число пораженных объектов в группе ПУ объединения объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В);

x_4, x_5, x_6 – число пораженных объектов в группе ПУ соединений объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В);

x_7, x_8, x_9 – число пораженных объектов в группе ПУ частей объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В);

x_{10}, x_{11}, x_{12} – число пораженных объектов в группе ПУ подразделений объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В).

Потери стороны А, нанесенные объектам 2-й подсистемы:

x_{13}, x_{14}, x_{15} – число пораженных объектов в группе полевой артиллерии (тип 1) объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В);

x_{16}, x_{17}, x_{18} – число пораженных объектов в группе полевой артиллерии (тип 2) объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В);

x_{19}, x_{20}, x_{21} – число пораженных объектов в группе полевой артиллерии (тип 3) объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В).

Потери стороны А, нанесенные объектам 3-й подсистемы:

x_{22}, x_{23}, x_{24} – число пораженных объектов в группе тр объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В), причем здесь $x_{22}, x_{23}, x_{24} = 0$, так как по допущению эти объекты не поражаются средствами дальнего огневого поражения;

x_{25}, x_{26}, x_{27} – число пораженных объектов в группе мпр объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В), причем здесь $x_{25}, x_{26}, x_{27} = 0$, так как по допущению эти объекты не поражаются средствами дальнего огневого поражения;

x_{28}, x_{29}, x_{30} – число пораженных объектов в группе пр объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В), причем здесь $x_{28}, x_{29}, x_{30} = 0$, так как по допущению эти объекты не поражаются средствами дальнего огневого поражения.

Потери стороны А, нанесенные объектам 4-й подсистемы:

x_{31}, x_{32}, x_{33} – число пораженных объектов в группе склады объединения объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В);

x_{34}, x_{35}, x_{36} – число пораженных объектов в группе склады соединения объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В);

x_{37}, x_{38}, x_{39} – число пораженных объектов в группе склады части объектами подсистемы полевой артиллерии (тип 1, тип 2, тип 3 стороны В).

Потери, понесенные сторонами А и В в дуэльном бою 3 подсистем, обозначим: $y_i(t), z_b(t), i = b = 8, 9, 10$:

y_{22}, y_{23}, y_{24} – число пораженных объектов стороны А в группе тр объектами подсистемы тр, мпр, пр стороны В;

y_{25}, y_{26}, y_{27} – число пораженных объектов стороны А в группе мпр объектами подсистемы тр, мпр, пр стороны В;

y_{28}, y_{29}, y_{30} – число пораженных объектов стороны А в группе пр объектами подсистемы тр, мпр, пр стороны В;

z_{22}, z_{23}, z_{24} – число пораженных объектов стороны В в группе тр объектами подсистемы тр, мпр, пр стороны А;

z_{25}, z_{26}, z_{27} – число пораженных объектов стороны В в группе мпр объектами подсистемы тр, мпр, пр стороны А;

z_{28}, z_{29}, z_{30} – число пораженных объектов стороны В в группе пр объектами подсистемы тр, мпр, пр стороны А.

С учетом введенных обозначений, ограничений и предложенных в таблице 2 условий выражение [1] примет вид

$$M_i(t) = \frac{\sum_{k=3i-2}^{3i} x_k(t)}{n_i}. \quad (19)$$

Целевая функция [1] соответственно запишется как

$$\Psi(t, \bar{X}, \bar{Y}) = \sum_{i=1}^{13} k_{pi} q_i(t) \left(\frac{\sum_{k=3i-2}^{3i} (n_i - y_k(t)) - \sum_{k=3i-2}^{3i} x_k(t)}{n_i} \right). \quad (20)$$

Система (многогранник) ограничений будет иметь вид

$$x_k = \bar{x}_k(t), \quad k = \overline{1, 39}; \quad (21)$$

$$x_k \leq V_{apib} b_b t, \quad b = k - \left[\frac{k}{3} \right]; \quad (22)$$

$$\sum_{k=3i-2}^{3i} x_k(t) \leq n_i, \quad i = \overline{1, 13}; \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^l x_{3i-2}(t) = V_{apib} b_b t, \quad i = \overline{1, 13}, \quad b = \overline{5, 7}. \quad (24)$$

Рассмотрим детально последовательность поиска решения разработанной модели. До начала боевых действий, при $t_0 = 0$, потери $y_k(0), x_k(0)$ сторон отсутствуют и целевая функция (20) примет вид [1]

$$\Psi(t, \bar{X}, \bar{Y}) = \sum_{i=1}^{13} k_{pi} q_i(t) \frac{\sum_{k=3i-2}^{3i} n_i}{n_i}.$$

Согласно данным таблиц 1 и 2 имеем

$$\Psi(0) = \Psi_0 = 0,4(0,5 + 0,3 + 0,15 + 0,05) + 0,3(0,6 + 0,25 + 0,15) + 0,1(0,45 + 0,4 + 0,15) + 0,2(0,5 + 0,35 + 0,15) = 1.$$

Полученный результат свидетельствует, что степень реализации боевых возможностей ГВП до начала боевых действий является максимальной и равной 1, что косвенно подтверждает непротиворечивость рассматриваемой модели.

Установим зависимость целевой функции от времени t . Используя данные таблиц 1–3 и выражение (19), определим конкретный вид целевой функции для 1-й задачи боевых действий ($t_1 = 10$ часов):

$$\begin{aligned} \Psi(10, \bar{X}) = \Psi_1(\bar{X}) = & \frac{0,4 \cdot 0,5}{3} (3 - (x_1 + x_2 + x_3)) + \frac{0,4 \cdot 0,3}{6} (6 - (x_4 + x_5 + x_6)) + \\ & + \frac{0,4 \cdot 0,15}{24} (24 - (x_7 + x_8 + x_9)) + \frac{0,4 \cdot 0,05}{32} (32 - (x_{10} + x_{11} + x_{12})) + \frac{0,3 \cdot 0,6}{6} (6 - (x_{13} + x_{14} + x_{15})) + \\ & + \frac{0,3 \cdot 0,25}{9} (9 - (x_{16} + x_{17} + x_{18})) + \frac{0,3 \cdot 0,15}{15} (15 - (x_{19} + x_{20} + x_{21})) + \frac{0,1 \cdot 0,45}{24} (24 - (y_{22} + y_{23} + y_{24})) + \\ & + \frac{0,1 \cdot 0,4}{42} (42 - (y_{25} + y_{26} + y_{27})) + \frac{0,1 \cdot 0,15}{30} (30 - (y_{28} + y_{29} + y_{30})) + \frac{0,2 \cdot 0,5}{2} (2 - (x_{31} + x_{32} + x_{33})) + \\ & + \frac{0,2 \cdot 0,35}{4} (4 - (x_{34} + x_{35} + x_{36})) + \frac{0,2 \cdot 0,15}{16} (16 - (x_{37} + x_{38} + x_{39})). \end{aligned}$$

Далее для определения $\{y\}$ элементов составим задачу, описывающую общую убыль живой силы воюющих в дуэльном бою между третьими подсистемами сторон А и В. Количество действующих объектов 3-й подсистемы в дуэльном бою определяется из системы линейных дифференциальных уравнений (9), которая после подстановки данных таблиц 2 и 3 примет вид

$$\begin{cases} \frac{dn_3(t)}{dt} = -(8,5b_{31}(t) + 8,4b_{32}(t) + 2,18b_{33}(t)); \\ \frac{db_3(t)}{dt} = -(5,838n_{31}(t) + 7,153n_{32}(t) + 0,72n_{33}(t)), \end{cases}$$

где $n_3(t)$, $b_3(t)$ – количество объектов в 3-й подсистеме (ближнего боя) сторон А и В на время t ;

$n_{3j} = n_{3j}(t)$, $j = \overline{1, 3}$; $b_{3b} = b_{3b}(t)$, $b = \overline{1, 3}$ – количество объектов j -й, b -й групп 3-й подсистемы сторон А и В на время t .

С учетом выражения (10) для одного часа боевых действий коэффициенты боевой мощи сторон будут равны:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^3 n_{3j}^2 N_{3j} P_{3j}}{n_3} = 1039,28; \quad B = \frac{\sum_{b=1}^3 b_{3b}^2 N'_{3b} P'_{3b}}{b_3} = 895,5.$$

С учетом полученных выше результатов и данных таблиц 2 и 3 имеем:

$$\begin{cases} n_3(10) = \frac{1}{2} \left(\left(96 - 72 \sqrt{\frac{1039,28}{895,5}} \right) e^{\sqrt{1039,28 \cdot 895,5} \cdot 10} + \left(96 + 72 \sqrt{\frac{1039,28}{895,5}} \right) e^{-\sqrt{1039,28 \cdot 895,5} \cdot 10} \right) = 93,67 \\ b_3(10) = \frac{1}{2} \left(\left(72 - 96 \sqrt{\frac{895,5}{1039,28}} \right) e^{\sqrt{1039,28 \cdot 895,5} \cdot 10} + \left(72 + 96 \sqrt{\frac{895,5}{1039,28}} \right) e^{-\sqrt{1039,28 \cdot 895,5} \cdot 10} \right) = 69,31. \end{cases}$$

С учетом выражения (11) и допущения о том, что в бою объекты с большей боевой мощью поражаются в первую очередь, количество боеспособных объектов в группах однотипных объектов подсистемы ближнего боя стороны А определены как

$$n_{31}(10) = 24 - (96 - 93,67) \frac{14 \cdot 0,417}{(14 \cdot 0,417 + 23 \cdot 0,311 + 10 \cdot 0,072)} = 23,01;$$

$$n_{32}(10) = 42 - (96 - 93,67) \frac{23 \cdot 0,311}{(14 \cdot 0,417 + 23 \cdot 0,311 + 10 \cdot 0,072)} = 40,79;$$

$$n_{33}(10) = 30 - (96 - 93,67) \frac{10 \cdot 0,072}{(14 \cdot 0,417 + 23 \cdot 0,311 + 10 \cdot 0,072)} = 29,87.$$

Далее согласно условиям (21)–(24) составим линейную систему (многогранник) ограничений на возможные потери наступающей стороны А в пространстве изменения переменных. Для удобства сведем данные, касающиеся ограничений на возможные потери стороны А, в таблицу 4 (достаточно очевидно, что содержание таблицы будет меняться со временем и для решения 2-й боевой задачи ее элементы будут иметь иные значения).

Рассмотрим содержание таблицы 4. Во второй строке приведена исходная численность объектов n_0 подсистем стороны А до начала боевых действий, т. е. $t_0 = 0$. В третьем-пятнадцатом столбцах 3–5-й строк приведены значения вектора потерь объектов $\bar{X}(t)$ при огневом воздействии стороны В. Каждый из 39 элементов $x_k = x_k(t) \geq 0$, $k = \overline{1,39}$ (нумерация ведется сверху вниз по подсистемам) содержит ограничение на максимально возможные потери соответствующей категории объектов подсистем стороны А при огневом воздействии на них указанными огневыми средствами 1, 2, 3-го типов стороны В.

Таблица 4. – Ограничения на количество поражаемых объектов при выполнении 1-й задачи боевых действий

Поражаемые объекты	1-я подсистема				2-я подсистема			3-я подсистема			4-я подсистема			Макс. КОЛ-ВО
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
№ группы объектов, i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Нач. кол-во объект., n_0	3	6	24	32	6	9	15	24	42	30	2	4	16	213
Макс. кол-во объектов, поражаемых средствами	тип 1	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	2	2	2
	тип 2	0	6	10	10	6	9	10	0	0	0	0	10	10
	тип 3	0	6	15	15	6	9	15	0	0	0	0	15	15
Сум. ВОЗМОЖН., x_i	3	6	24	32	6	9	15	0	0	0	2	4	16	

Расчеты проводятся с использованием исходных данных таблиц 2 и 3 на основании ограничений (21)–(24). Если удаление объекта от огневого средства допускает его поражение, то соответствующий элемент таблицы рассчитывается как

$$x_k = \min\{10V_{\text{артб}} b_b; n_{0i}\}, \quad b = k - \left\lfloor \frac{k}{3} \right\rfloor, \quad k = \overline{1,39}, \quad i = \overline{1,13}.$$

В шестнадцатом столбце 3–5-й строк приведено максимально возможное количество объектов, пораженных огневыми средствами одного типа стороны В:

при этом следует учесть, что расчеты проводятся для условий максимальной огневой производительности средств поражения, а также без учета разведывательных возможностей, потерь огневых средств и ограничений на выделенный ресурс боеприпасов стороны В.

Заключение

Таким образом, сформулированная задача математического программирования решаема компьютерными средствами и дает ответ на вопрос о минимизации степени реализации боевых возможностей противника $\Psi(t)$ для конкретных заданных условий и ограничений. А так как операция не завершена, полученный оптимальный план позволяет составить задачу линейного программирования для следующего этапа боевых действий. Второму примеру моделирования боевых действий – «Рациональное распределение ресурсов огневых средств» – будет посвящена следующая статья.

Список используемых источников

1. Избаш, М. Ю. Математическое моделирование противоборства оперативно-тактических группировок войск и распределение ресурсов по задачам боевых действий / М. Ю. Избаш, Л. В. Душейна, В. А. Липницкий // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 3. – С. 3–7.
2. Избаш, М. Ю. Цель ОПП в операции и возможности по ее достижению в свете нового подхода к планированию огневых поражений / М. Ю. Избаш, В. В. Диордица // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2014. – № 3. – С. 17–30.
3. Марков, Л. Н. Основы исследования операций / Л. Н. Марков, П. А. Подкопаев. – Минск : ВА РБ, 2000. – Ч.1. – 256 с.
4. Костевич, Л. С. Математическое программирование. Информационные технологии оптимальных решений : учеб. пособие / Л. С. Костевич. – Минск : Новое знание, 2003. – 424 с.

*Сведения об авторах:

Избаш Михаил Юрьевич,
 Рябоконт Вадим Викторович,
 Душейна Людмила Вадимовна,
 УО «Военная академия Республики Беларусь».
 Статья поступила в редакцию 10.01.2018 г.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ВОЕННОМ ДЕЛЕ

УДК 623.46

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТУРА НАВЕДЕНИЯ ЗЕНИТНОЙ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОЙ РАКЕТЫ ЗЕНИТНОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА С КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ

И. М. Косачев, доктор технических наук, профессор;
К. Н. Чугай, кандидат технических наук, доцент*

В статье излагается методика построения аналитической математической модели системы телеуправления ЗУР ЗРК малой дальности с комплексированной (радиолокационно-лазерной) информационной системой.

The article describes the method for creating the analytical mathematical model for short-range air-defence systems' tele-control with complex (radiolocation and laser) information system.

Введение

В предыдущей статье [1] была разработана имитационная математическая модель контура наведения зенитной телеуправляемой ракеты (ЗУР) зенитного ракетного комплекса (ЗРК) с комплексированной (радиолокационно-лазерной) информационной системой (КИС).

В данной статье рассматривается методика построения аналитической математической модели исследуемой системы телеуправления (СТУ) ЗУР в классе нестационарных нелинейных стохастических динамических систем со случайно изменяющейся структурой (ДССС) [2, 3].

Разработка аналитической математической модели контура наведения телеуправляемой ЗУР

На первом этапе методики на основании системы стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) вида (1), приведенной в [1], составляется система интегродифференциальных уравнений (ИДУ) для центральных вероятностных моментов требуемого порядка вектора фазовых координат для каждого l -го состояния структуры ДССС.

Универсальные ИДУ для математического ожидания p -й $Y_p^{(l)}$ ($p = \overline{1, 12}$) фазовой координаты в l -м ($l = 1, 2$) состоянии структуры ДССС выглядят так [3]:

$$\dot{M}_p^{(l)} = \langle A_p^{(l)}(Y) \rangle^{(l)} - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^S \langle v^{(l,r)}(Y) \mathring{Y}_p^{(l)} \rangle^{(l)} + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^S \frac{P^{(r)}}{P^{(l)}} \langle v^{(r,l)}(Y) (QM_p^{(r,l)}(Y) - M_p^{(l)}) \rangle^{(r)}, \quad (1)$$

где $A_p^{(l)}(Y, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left\langle \frac{\Delta Y_p^{(l)}(t)}{\Delta t} \middle| y, t \right\rangle$ – p -я компонента вектора сноса $A(Y, t)$, характеризующая

среднее значение локальной скорости изменения p -й фазовой координаты во времени в l -м состоянии структуры ДССС, рассчитываемая известным образом исходя из вида СДУ (1) [2–5];

$v^{(l,r)}(Y)$ – эквивалентная интенсивность перехода ДССС из l -го состояния структуры в r -е;

$\mathring{Y}_p^{(l)} = Y_p^{(l)} - M_p^{(l)}$ – центрированное значение p -й фазовой координаты $Y_p^{(l)}$ в l -м состоянии структуры ДССС;

$\langle \cdot \rangle^{(l)}$ – операция усреднения (взятия математического ожидания) от нелинейной функции, стоящей в треугольных скобках, по условной плотности распределения

вероятностей (УПРВ) $f^{(l)}(y)$ в l -м состоянии структуры ДССС;

$P^{(r)}, P^{(l)}$ – вероятности нахождения ДССС в r -м и l -м состояниях структуры ДССС в текущий момент времени t соответственно;

$QM_p^{(r,l)}(y', t)$ – условное математическое ожидание начального значения p -й фазовой координаты в l -м состоянии структуры ДССС после перехода из r -го состояния.

Интегродифференциальные уравнения для взаимных центральных корреляционных моментов p -й и k -й фазовых координат (при $k = p$ – это дисперсия p -й фазовой координаты) имеют вид [3]:

$$\begin{aligned} \dot{D}_{pk}^{(l)} = & \left\langle A_p^{(l)}(Y) \dot{Y}_k^{(l)} + A_k^{(l)}(Y) \dot{Y}_p^{(l)} + B_{pk}^{(l)}(Y) \right\rangle^{(l)} - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^S \left\langle v^{(l,r)}(Y) (\dot{Y}_p^{(l)} \dot{Y}_k^{(l)} - D_{pk}^{(l)}) \right\rangle^{(l)} + \\ & + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^S \frac{P^{(r)}}{P^{(l)}} \left\langle v^{(l,r)}(Y) \left[QD_{pk}^{(r,l)}(Y) - D_{pk}^{(l)} + (QM_p^{(r,l)}(Y) - M_p^{(l)})(QM_k^{(r,l)}(Y) - M_k^{(l)}) \right] \right\rangle^{(r)}, \quad (2) \end{aligned}$$

где $B_{pk}^{(l)}(Y, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left\langle \frac{\Delta Y_p^{(l)}(t) \Delta Y_k^{(l)}(t)}{\Delta t} \middle| y, t \right\rangle$ – pk -я компонента диффузионной матрицы

$B^{(l)}(Y, t)$, характеризующая скорость изменения условного корреляционного момента p -й и k -й фазовых координат в l -м состоянии структуры ДССС, рассчитываемая известным образом исходя из вида СДУ (1) [2–5];

$QD_{pk}^{(r,l)}(y', t)$ – условный корреляционный момент восстановления p -й и k -й фазовых координат (при $k = p$ – это условная дисперсия восстановления начального значения p -й фазовой координаты) при переходе ДССС из r -го состояния структуры в l -е.

При необходимости (в случае негауссовой плотности распределения вероятностей (ПРВ) промаха ЗУР) также могут быть составлены ИДУ и для высших центральных вероятностных моментов вектора фазовых координат исследуемой ДССС произвольного R -го порядка, полученные в [3].

Например, универсальные ИДУ для центральных вероятностных моментов третьего порядка p, k и i -й фазовых координат ДССС в l -м состоянии структуры имеют следующий вид [3]:

$$\begin{aligned} \dot{\mu}_{pki}^{(l)} = & \left\langle A_p^{(l)}(Y) (\dot{Y}_k^{(l)} \dot{Y}_i^{(l)} - D_{ki}^{(l)}) + A_k^{(l)}(Y) (\dot{Y}_p^{(l)} \dot{Y}_i^{(l)} - D_{pi}^{(l)}) + A_i^{(l)}(Y) (\dot{Y}_p^{(l)} \dot{Y}_k^{(l)} - D_{pk}^{(l)}) \right\rangle^{(l)} + \\ & + \left\langle B_{pk}^{(l)}(Y) \dot{Y}_i^{(l)} + B_{pi}^{(l)}(Y) \dot{Y}_k^{(l)} + B_{ki}^{(l)}(Y) \dot{Y}_p^{(l)} \right\rangle^{(l)} - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^S \left\langle v^{(l,r)}(Y) \left[\dot{Y}_p^{(l)} \dot{Y}_k^{(l)} \dot{Y}_i^{(l)} - \mu_{pki}^{(l)} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \dot{Y}_p^{(l)} D_{ki}^{(l)} - \dot{Y}_k^{(l)} D_{pi}^{(l)} - \dot{Y}_i^{(l)} D_{pk}^{(l)} \right] \right\rangle^{(l)} + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^S \frac{P^{(r)}}{P^{(l)}} \left\langle v^{(r,l)}(Y) \left[Q_{pki}^{(r,l)}(Y) - \mu_{pki}^{(l)} - Q_p^{(r,l)}(Y) D_{ki}^{(l)} - \right. \right. \\ & \left. \left. - Q_k^{(r,l)}(Y) D_{pi}^{(l)} - Q_i^{(r,l)}(Y) D_{pk}^{(l)} \right] \right\rangle^{(r)}, \quad (3) \end{aligned}$$

где $Q_p^{(r,l)}(Y) = QM_p^{(r,l)}(Y) - M_p^{(l)}$ – условная вероятностная характеристика восстановления p -й фазовой координаты при переходе ДССС из r -го состояния структуры в l -е.

Универсальные ИДУ для центральных вероятностных моментов четвертого порядка p, k, i и j -й фазовых координат выглядят так [3]:

$$\begin{aligned}
\dot{\mu}_{pkij}^{(l)} = & \left\langle A_p^{(l)}(Y) (\dot{Y}_k^{(l)} \dot{Y}_i^{(l)} \dot{Y}_j^{(l)} - \mu_{kij}^{(l)}) + A_k^{(l)}(Y) (\dot{Y}_p^{(l)} \dot{Y}_i^{(l)} \dot{Y}_j^{(l)} - \mu_{pij}^{(l)}) + \right. \\
& + A_i^{(l)}(Y) (\dot{Y}_p^{(l)} \dot{Y}_k^{(l)} \dot{Y}_j^{(l)} - \mu_{pkj}^{(l)}) + A_j^{(l)}(Y) (\dot{Y}_p^{(l)} \dot{Y}_k^{(l)} \dot{Y}_i^{(l)} - \mu_{pki}^{(l)}) \left. \right\rangle^{(l)} + \left\langle B_{pk}^{(l)}(Y) \dot{Y}_i^{(l)} \dot{Y}_j^{(l)} + \right. \\
& + B_{pi}^{(l)}(Y) \dot{Y}_k^{(l)} \dot{Y}_j^{(l)} + B_{pj}^{(l)}(Y) \dot{Y}_k^{(l)} \dot{Y}_i^{(l)} + B_{ki}^{(l)}(Y) \dot{Y}_p^{(l)} \dot{Y}_j^{(l)} + B_{kj}^{(l)}(Y) \dot{Y}_p^{(l)} \dot{Y}_i^{(l)} + \\
& + B_{ij}^{(l)}(Y) \dot{Y}_p^{(l)} \dot{Y}_k^{(l)} \left. \right\rangle^{(l)} - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^S \left\langle v^{(l,r)}(Y) (\dot{Y}_p^{(l)} \dot{Y}_k^{(l)} \dot{Y}_i^{(l)} \dot{Y}_j^{(l)} - \mu_{pkij}^{(l)} - \dot{Y}_p^{(l)} \mu_{kij}^{(l)} - \dot{Y}_k^{(l)} \mu_{pij}^{(l)} - \right. \\
& - \dot{Y}_i^{(l)} \mu_{pkj}^{(l)} - \dot{Y}_j^{(l)} \mu_{pki}^{(l)}) \left. \right\rangle^{(l)} + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^S \frac{P^{(r)}}{P^{(l)}} \left\langle v^{(l,r)}(Y) \left[Q_{pkij}^{(l)}(Y) - \mu_{pkij}^{(l)} - Q_p^{(l,r)}(Y) \mu_{kij}^{(l)} - \right. \right. \\
& \left. \left. - Q_k^{(r,l)}(Y) \mu_{pij}^{(l)} - Q_i^{(r,l)}(Y) \mu_{pkj}^{(l)} - Q_j^{(r,l)}(Y) \mu_{pki}^{(l)} \right] \right\rangle^{(r)}. \tag{4}
\end{aligned}$$

При стрельбе по одиночной цели промахи ЗУР, как правило, распределены по нормальному закону, поэтому в дальнейшем при разработке аналитической математической модели исследуемого контура телеуправления ЗУР будем учитывать только первых два центральных вероятностных момента вида (1) и (2).

На втором этапе методики составляется граф смены состояний структуры исследуемой СТУ ЗУР в классе ДССС, который представлен на рисунке 1. Рисунок 1, а соответствует однократному невозвратному переходу в процессе наведения ЗУР с радиолокационной информационной системы ЗРК на лазерную. Граф на рисунке 1, б отображает возможность повторного перехода с лазерной информационной системы (в случае нарушения процесса ее нормального функционирования) на радиолокационную.

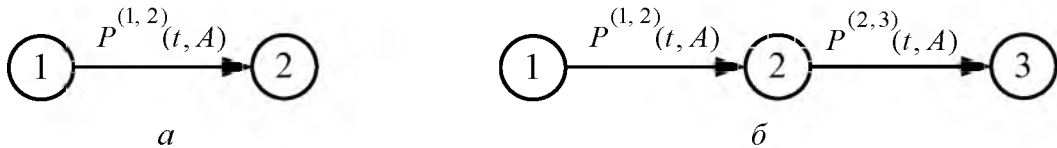


Рисунок 1. – Возможные графы состояний контура телеуправления ЗУР ЗРК с радиолокационно-лазерной информационной системой

Такой вид графа обусловлен тем, что он не является марковским, так как процесс смены состояния структуры СТУ не является случайным, а плотности распределения времени нахождения системы в каждом из состояний не являются экспоненциальными [2–6].

На третьем этапе методики записываются уравнения для вероятностей состояний $P^{(r)}$ и $P^{(l)}$, входящих в универсальные уравнения для центральных вероятностных моментов вида (1)–(4).

Если бы рассматриваемые графы состояний были марковскими, то уравнения для вероятностей состояний $P^{(r)}$ и $P^{(l)}$ можно было бы найти путем интегрирования известных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) Колмогорова вида [2, 3]

$$\dot{P}^{(l)}(t) = - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^S v^{(l,r)}(t) P^{(l)}(t) + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^S v^{(r,l)}(t) P^{(r)}(t), \tag{5}$$

где $v^{(r,l)}(t)$ – интенсивность (средняя частота) перехода ДССС из r -го состояния структуры в l -е ($r, l = \overline{1, S}$).

Учет немарковости процесса смены состояния структуры обычно осуществляется с использованием метода псевдосостояний [3, 4]. Однако это приводит к резкому (в 5–6 раз) увеличению числа интегрируемых уравнений для центральных вероятностных моментов вида (1)–(4).

Учет произвольных ПРВ моментов переключения состояний структуры ДССС может быть осуществлен с помощью математического аппарата условных марковских процессов [3, 6]. Для применения математического аппарата условных марковских процессов при анализе рассматриваемой немарковской ДССС необходимо задать сужающее условие A , при котором этот процесс будет условно марковским. Для рассматриваемой ДССС в качестве сужающего условия A принимаются условия фиксированности времени начала функционирования ДССС

$$t = t_0 \text{ и начального состояния структуры } P^{(r)}(t_0) = \begin{cases} 1 & \text{при } r = l_1; \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

В дальнейшем будем полагать, что текущее время t отсчитывается от начального момента времени t_0 , равного нулю.

Базируясь на данной теории, для учета произвольных ПРВ времен «жизни» состояний структуры рассматриваемой ДССС в [3] введено понятие «эквивалентной интенсивности смены состояния структуры ДССС $v^{(r,l)}(t)$ », которая определяется следующим выражением:

$$v^{(r,l)}(t) \triangleq f_T^{(r,l)}(t) / P^{(r)}(t), \quad (6)$$

где $f_T^{(r,l)}(t)$ – заданная ПРВ моментов времени $T^{(r,l)}$ смены («гибели») r -го состояния структуры ДССС при переходе в l -е состояние;

$P^{(r)}(t)$ – вероятность нахождения ДССС в момент времени t в r -м ($r = \overline{1, S}$) состоянии структуры.

Для графа состояний, представленного на рисунке 1, a , эквивалентная интенсивность однократного перехода ДССС из первого состояния структуры во второе рассчитывается так:

а) при переходе ДССС по пуассоновскому закону

$$v^{(1,2)}(t) = v^{(1,2)} = 1 / M_T^{(1)}, \quad (7)$$

где $M_T^{(1)}$ – среднее время «жизни» (существования) первой структуры ДССС, т. е. среднее время наведения ЗУР с использованием радиолокационной информационной системы;

б) при переходе ДССС по эрланговскому закону

$$v^{(1,2)}(t) = \frac{(v^{(1)})^k t^{k-1}}{(k-1)!} e^{-v^{(1)}(t)} / P^{(1)}(t), \quad (8)$$

где $k = 2, 3, \dots$ – порядок эрланговского распределения;

$v^{(1)} = k / M_T^{(1)}$ – параметр эрланговского закона [9];

в) при гауссовой ПРВ перехода

$$v^{(1,2)}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_T^{(1)}} \exp \left\{ -\frac{(1 - M_T^{(1)})^2}{2(\sigma_T^{(1)})^2} \right\} / P^{(1)}(t), \quad (9)$$

где $M_T^{(1)}$, $\sigma_T^{(1)}$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение времени «жизни» (существования) первой структуры ДССС;

г) при равномерной ПРВ перехода

$$v^{(1,2)}(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} / P^{(1)}(t) & \text{при } t \in [a, b] \\ 0 & \text{при остальных } t; \end{cases} \quad (10)$$

д) при квазирегулярном переходе

$$v^{(1,2)}(t) = \omega_{\Delta}(t - M_T^{(1)}) / P^{(1)}(t), \quad (11)$$

где $f_{\Delta}(\xi)$ – произвольная ПРВ смещения положения момента переключения из первого состояния во второе относительно заданного среднего значения $M_T^{(1)}$;

е) при регулярном (неслучайном) переходе

$$v^{(1,2)}(t) = \delta(t - M_T^{(1)}). \quad (12)$$

Для иллюстрации на рисунке 2 для равномерного закона однократного переключения структуры исследуемой ДССС показаны следующие функции: ПРВ времени «жизни» первого состояния $f_{\tau}^{(1)}$, вероятностей первого $P^{(1)}$ и второго $P^{(2)}$ состояний и эквивалентной интенсивности $v^{(1,2)}(t)$.

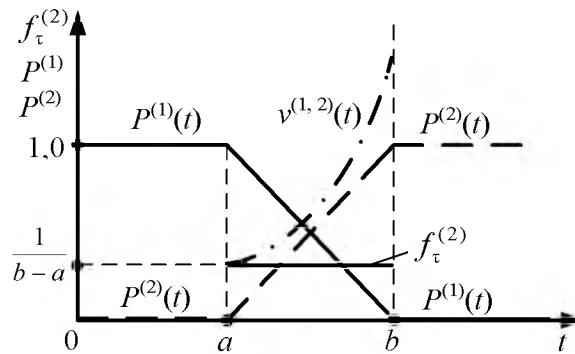


Рисунок 2. – Вид эквивалентной интенсивности переключения состояния структуры ДССС при равномерном распределении времени «жизни» «выключаемого» состояния

Из данного рисунка видно, что эквивалентная интенсивность $v^{(1,2)}(t)$ до начала области переключения (a, b) равна нулю. В области переключения $t \in (a, b)$ она изменяется по закону $1/(b-t)$, а при приближении к дальней границе области переключения (b) эквивалентная интенсивность стремится к бесконечности.

Аналогичная картина имеет место и для других непугассоновских законов перехода ДССС из первого состояния структуры во второе.

Для графа состояний, представленного на рисунке 1, б, методика расчета эквивалентных интенсивностей будет следующей.

Первое. Осуществляется расчет с помощью интеграла свертки ПРВ суммы независимых произвольно распределенных случайных величин времен «жизни» двух свертываемых состояний структуры ДССС по формуле

$$f_T^{(2)}(t) = (f_{\tau}^{(1)} * f_{\tau}^{(2)})(t), \quad (13)$$

где $f_{\tau}^{(1)}$, $f_{\tau}^{(2)}$ – произвольные (в общем случае различные) ПРВ времен «жизни» первого и второго состояний структуры ДССС соответственно. Выражения для эквивалентной интенсивности $f_T^{(2)}(t)$ при свертывании двух одинаковых ПРВ вида (7)–(12) и при любом их сочетании приведены в [3]. Например, при свертывании двух равномерных ПРВ эквивалентная плотность будет иметь треугольное распределение, называемое

распределением Симпсона. При свертывании произвольного числа гауссовых ПРВ итоговая плотность распределения также будет гауссовой в силу устойчивости нормального закона.

Второе. На основании определения (6) рассчитываются эквивалентные интенсивности

$$v^{(1,2)}(t) = f_T^{(1)}(t) / P^{(1)}(t); \quad v^{(2,3)}(t) = f_T^{(2)}(t) / P^{(2)}(t). \quad (14)$$

В [3] показано, что при таком подходе входящие в уравнения для центральных вероятностных моментов вида (1) – (4) вероятности состояний также могут быть найдены путем интегрирования дифференциальных уравнений типа Колмогорова для этих вероятностей вида:

$$\begin{aligned} \dot{P}^{(1)}(t) &= -f_T^{(1)}(t), & P^{(1)}(t_0) &= 1; \\ \dot{P}^{(2)}(t) &= f_T^{(1)}(t) - f_T^{(2)}(t), & P^{(2)}(t_0) &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

На четвертом этапе методики осуществляется переход от универсальных ИДУ вида (1) и (2) к развернутой системе ИДУ, справедливой для конкретной системы СДУ вида (1), приведенной в [1], исследуемого контура телеуправления ЗУР.

Для этого выполняются следующие действия.

Первое. Определяется тип СДУ (1) и для него по известным правилам [2–6] записываются выражения для всех коэффициентов вектора сноса $A_p^{(l)}(Y)$ и всех элементов матрицы диффузии $B_{pk}^{(l)}(Y)$ ($p, k = \overline{1, 12}$).

Так как система СДУ (1) относится к классу стохастических нелинейных дифференциальных уравнений с одноаргументными нелинейностями $\varphi_1^{(l)}(y_7)$, $\varphi_2^{(l)}(y_5)$ и аддитивными шумами, то выражения для коэффициентов вектора сноса и элементов матрицы диффузии будут иметь следующий вид:

$$A_p^{(l)}(Y) = c_p^{(l)} + \sum_{i=1}^{N_Y} d_{pi}^{(l)} Y_i + \sum_{j=1}^{N_\Phi} b_{pj}^{(l)} \varphi_j^{(l)}(Y); \quad (16)$$

$$B_{pk}^{(l)}(Y) = \sum_{l,q=1}^{N_Y} h_{pl}^{(l)} G_{lq} h_{kq}^{(l)}. \quad (17)$$

Второе. Путем подстановки в систему СДУ вида (1) выражений для коэффициентов сноса и диффузии, получим развернутую систему ИДУ для исследуемого контура телеуправления ЗУР, которая из-за громоздкого вида в данной статье не приведена.

На пятом этапе осуществляется определение и описание оператора ввода начальных условий всех 12 фазовых координат исследуемого контура телеуправления при переходе ДССС из первого состояния структуры во второе.

В теории ДССС оператор ввода начальных условий фазовых координат при изменении состояния структуры с r -го на l -е задается с помощью условных вероятностных моментов: условного математического ожидания $QM_p^{(r,l)}$ и условной дисперсией $QD_{pp}^{(r,l)}$ для введенных в рассмотрение в [1] фазовых координат Y_p .

Входящие в ИДУ для вероятностных моментов вида (1) и (2) условные математические ожидания $QM_p^{(r,l)}(y', t)$ и условные дисперсии $QD_{pp}^{(r,l)}(y', t)$ рассчитываются по следующим формулам:

$$QM_p^{(r,l)}(y', t) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} y_p q_p^{(r,l)}(y_p | y', t) dy_p; \quad (18)$$

$$QD_{pp}^{(r,l)}(y',t) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} \left(y_p - QM_p^{(r,l)}(y',t) \right)^2 q_p^{(r,l)}(y_p|y',t) dy_p, \quad (19)$$

где $q^{(r,l)}(x,y,t)$ – условная ПРВ начальных значений фазовых координат ДССС, определяемая выражением вида:

$$q^{(r,l)}(x,y,t) \triangleq P\{Y(t_k+0) = y/L(t_k+0) = l; Y(t_k) = x, L(t_k) = r\}. \quad (20)$$

На рисунке 3 для примера пунктирной линией показаны три одномерные функции условной ПРВ $q^{(1,2)}(x,y,t_1)$, $q^{(2,3)}(z,v,t_2)$ и $q^{(3,4)}(u,f,t_3)$ соответственно с нормальной, равномерной и δ -образной плотностью распределения.

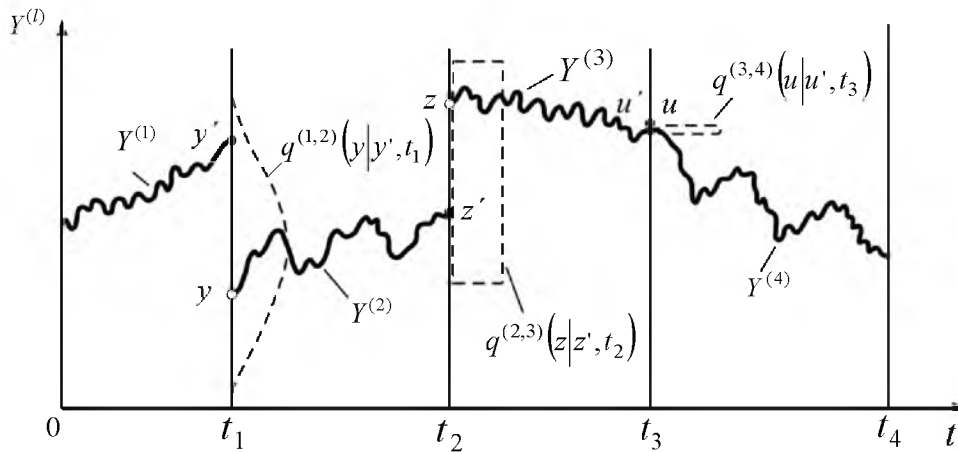


Рисунок 3. – Одномерные функции условной ПРВ $q^{(1,2)}(x,y,t_1)$, $q^{(2,3)}(z,v,t_2)$ и $q^{(3,4)}(u,f,t_3)$ с нормальной, равномерной и δ -образной плотностью распределения соответственно

Условная функция ПРВ начальных значений реализаций фазовых координат нормирована к единице, т. е. $\int_{R^N} q^{(r,l)}(x,y,t) = 1$. Вид условной функции ПРВ начальных значений вектора состояний (фазовых координат) определяется экспериментальным путем, исходя из физических особенностей работы исследуемой ДССС.

На структурной схеме исследуемой СТУ ЗУР, представленной в [1], на фазовые координаты с первой по одиннадцатую введены на выходах инерционных звеньев. При скачкообразном изменении процесса на входе любого инерционного звена его выходной процесс не может мгновенно измениться, поэтому начальные значения всех этих одиннадцати фазовых координат в новом состоянии структуры будут совпадать с их конечными значениями в предыдущем состоянии. В этом случае условная ПРВ восстановления фазовых координат будет δ -функцией (см. рисунок 3). Такие условия восстановления фазовых координат называются «центральными жесткими» [3] или «с мгновенным и полным восстановлением» [2].

Для таких условий восстановления фазовых координат в уравнениях (1) и (2) условные математические ожидания $QM_p^{(r,l)}(Y) = M_p^{(r)}$, а условные дисперсии $QD_{pp}^{(r,l)} = 0$.

Условия восстановления двенадцатой фазовой координаты при смене состояний структуры будут «несвязанными нежесткими» [3], которые в [2] называются «восстановлением в окрестности неявной функции». Для таких условий восстановления в уравнениях (1) и (2) условные математические ожидания $QM_{12}^{(1,2)} = M_{\Delta\epsilon}^{(1)}$, $QM_{12}^{(2,1)} = M_{\Delta\epsilon}^{(2)}$, а условные дисперсии $QD_{12}^{(1,2)} = D_{\Delta\epsilon}^{(1)}$, $QD_{12}^{(2,1)} = D_{\Delta\epsilon}^{(2)}$, где $M_{\Delta\epsilon}^{(1)}$, $M_{\Delta\epsilon}^{(2)}$, $D_{\Delta\epsilon}^{(1)}$, $D_{\Delta\epsilon}^{(2)}$ – математические ожидания и дисперсии ошибок измерения разности угломестных координат

цели и ЗУР радиолокационной (первое состояние) и лазерной (второе состояние) информационными системами станции наведения ракет ЗРК соответственно.

На шестом этапе методике осуществляется сведение развернутой системы нелинейных ИДУ к системе нелинейных ОДУ. Для этого необходимо раскрыть все усреднения, находящиеся в уравнениях вида (1), (2) в треугольных скобках, в общем случае, по многомерной ПРВ $f^{(l)}(Y, t)$, которая априори является неизвестной.

Если же аппроксимировать неизвестную функцию ПРВ $f^{(l)}(Y, t)$ конечным числом центральных вероятностных моментов, то полученная система нелинейных ОДУ становится замкнутой. На таком подходе основана методология аналитического математического моделирования ДССС [2–5, 7, 8].

Наиболее эффективно раскрыть все имеющиеся в уравнениях (1), (2) усреднения можно с использованием метода статистической аппроксимации нелинейностей произвольного вида (одно- и многоаргументных, таблично и алгоритмически заданных и т. д.), разработанного в [3].

В основу метода статистической аппроксимации нелинейностей положена идея, суть которой состоит в расчете усреднений от произвольной нелинейной функции вида

$$\langle \varphi^{(l)}(Y) \rangle^{(l)} = \int_{R^{Nr}} \varphi^{(l)}(y) f^{(l)}(y) dy \quad (21)$$

как взвешенной суммы значений самой усредняемой нелинейной функции в некоторых специальных точках (узлах аппроксимации), выбор которых определяется текущими значениями вероятностных моментов аргументов усредняемой нелинейности.

Данная идея возникла из рассмотрения метода статистической линеаризации Казакова – Бутона (эффективно работающего для типовых одноаргументных нелинейностей при нормальном виде ПРВ аргументов) как, по существу, метода аппроксимации функции «в области». Для нелинейных функций произвольного типа аппроксимацию «в области» можно также осуществить по значениям самой функции в некоторых характерных для данной области точках (узлах аппроксимации), которым соответствуют определенные значения аргументов данной нелинейной функции. Подобную аппроксимацию «в области» можно назвать статистической, потому что эту область можно определить как носитель ПРВ (область концентрации ПРВ) аргументов усредняемой нелинейности.

Кроме того, при разработке метода статистической аппроксимации также комплексно использовались идеи других методов, в частности, моментно-семиинвариантного, нормальной аппроксимации, функциональных рядов; метода эквивалентных возмущений и интерполяционных методов; методов ортогональных разложений ПРВ, разложения нелинейности в обобщенный ряд Тейлора и его экономизацию на основе квадратурных формул Гаусса – Эрмита; ортогонализации Грамма – Шмидта в соответствующем гильбертовом пространстве [3].

В простейшем случае раскрытие усреднения от одноаргументной нелинейности при гауссовой ПРВ ее аргумента осуществляется по формуле

$$\langle \varphi(Y) \rangle^{(l)} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi^{(l)}(M_y^{(l)} + \sigma_y^{(l)} u_i), \quad (22)$$

где λ_i – i -й весовой коэффициент статистической аппроксимации нелинейности $\varphi^{(l)}(Y)$, приведенный в таблице;

u_i – i -й узел статистической аппроксимации нелинейности, приведенный в таблице;

$M_y^{(l)}, \sigma_y^{(l)}$ – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение (СКО) аргумента нелинейности в l -м состоянии структуры ДССС.

Таблица. – Значения узлов и весовых коэффициентов для статистической аппроксимации усредняемых нелинейностей

Число точек аппроксимации	Узлы статистической аппроксимации u_i	Весовые коэффициенты аппроксимации λ_i
1	$u_1 = 0,000$	$\lambda_1 = 1,000$
2	$u_{1,2} = \pm 1,000$	$\lambda_{1,2} = 0,500$
3	$u_1 = 0,000$ $u_{2,3} = \pm 1,73205080760$	$\lambda_1 = 0,66666666667$ $\lambda_{2,3} = 0,16666666667$
4	$u_{1,2} = \pm 0,74196378430$ $u_{3,4} = \pm 2,334414421830$	$\lambda_{1,2} = 0,45412414523$ $\lambda_{3,4} = 0,04587585477$
5	$u_1 = 0,000$ $u_{2,3} = \pm 1,40835482410$ $u_{4,5} = \pm 2,85697001390$	$\lambda_1 = 0,53333333333$ $\lambda_{2,3} = 0,22207592201$ $\lambda_{4,5} = 0,01125741133$
6	$u_{1,2} = \pm 0,61670659019$ $u_{3,4} = \pm 1,88917587780$ $u_{5,6} = \pm 3,32425743360$	$\lambda_{1,2} = 0,408772050060$ $\lambda_{3,4} = 0,08861574604$ $\lambda_{5,6} = 0,00255578440$
7	$u_1 = 0,000$ $u_{2,3} = \pm 1,15440539470$ $u_{4,5} = \pm 2,36675941070$ $u_{6,7} = \pm 3,75043971770$	$\lambda_1 = 0,45714285714$ $\lambda_{2,3} = 0,24012317860$ $\lambda_{4,5} = 0,03075712397$ $\lambda_{6,7} = 0,00054826886$
8	$u_{1,2} = \pm 0,539007981135$ $u_{3,4} = \pm 1,63651904240$ $u_{5,6} = \pm 2,80248586130$ $u_{7,8} = \pm 4,14454718610$	$\lambda_{1,2} = 0,37301225768$ $\lambda_{3,4} = 0,11723990766$ $\lambda_{5,6} = 0,00963522012$ $\lambda_{7,8} = 0,00011261454$
9	$u_1 = 0,000$ $u_{2,3} = \pm 1,02325566380$ $u_{4,5} = \pm 2,076847941070$ $u_{6,7} = \pm 3,20542900290$ $u_{8,9} = \pm 4,51274586340$	$\lambda_1 = 0,40634920635$ $\lambda_{2,3} = 0,24409750289$ $\lambda_{4,5} = 0,04991640677$ $\lambda_{6,7} = 0,00278914132$ $\lambda_{8,9} = 0,00002234584$
10	$u_{1,2} = \pm 0,484935707525$ $u_{3,4} = \pm 1,46598909440$ $u_{5,6} = \pm 2,48432584160$ $u_{7,8} = \pm 3,58182348360$ $u_{9,10} = \pm 4,85946282830$	$\lambda_{1,2} = 0,34464233494$ $\lambda_{3,4} = 0,13548370298$ $\lambda_{5,6} = 0,01911158050$ $\lambda_{7,8} = 0,00075807093$ $\lambda_{9,10} = 0,00000431065$
12	$u_{1,2} = \pm 0,44440300194$ $u_{3,4} = \pm 1,34037519720$ $u_{5,6} = \pm 2,25946445100$ $u_{7,8} = \pm 3,22370982880$ $u_{9,10} = \pm 4,27182584790$ $u_{11,12} = \pm 5,50090170450$	$\lambda_{1,2} = 0,32166436151$ $\lambda_{3,4} = 0,14696794805$ $\lambda_{5,6} = 0,02911668791$ $\lambda_{7,8} = 0,00220338069$ $\lambda_{9,10} = 0,00004837185$ $\lambda_{11,12} = 0,00000014999$
16	$u_{1,2} = \pm 0,38676060450$ $u_{3,4} = \pm 1,16382900600$ $u_{5,6} = \pm 1,95198034570$ $u_{7,8} = \pm 2,76024504760$ $u_{9,10} = \pm 3,60087362420$ $u_{11,12} = \pm 4,49295530250$ $u_{13,14} = \pm 5,47222570600$ $u_{15,16} = \pm 6,63087819840$	$\lambda_{1,2} = 0,28656852124$ $\lambda_{3,4} = 0,15833837275$ $\lambda_{5,6} = 0,047284752351$ $\lambda_{7,8} = 0,00726693760$ $\lambda_{9,10} = 0,00052598493$ $\lambda_{11,12} = 0,00001530003$ $\lambda_{13,14} = 0,00000013095$ $\lambda_{15,16} = 0,00000000015$

Примечание. В таблице в каждой строке значение первого узла берется со знаком «+», а второго – со знаком «-».

Необходимое число точек аппроксимации n нелинейности $\varphi^{(l)}(Y)$, при которых обеспечивается нулевая ошибка ее аппроксимации, рассчитывается так:

$$n = \frac{C_n + 1}{2}, \quad (23)$$

где C_n – максимальная степень полинома нелинейности $\varphi(Y)$.

Например, для нелинейностей y^3 , y^5 , y^7 абсолютно точными будут двух-, трех- и четырехточечные аппроксимации соответственно.

Для разрывных нелинейностей (например sgny) точность аппроксимации зависит от близости математического ожидания к точке разрыва и величины дисперсии фазовой координаты y – аргумента нелинейности.

Для большинства разрывных нелинейностей в выражении (22) достаточно ограничиться 8–10-точечной аппроксимацией.

Раскрытие усреднения от многоаргументной нелинейности $\langle \varphi^{(l)}(y_1, \dots, y_n) \rangle^{(l)}$ при гауссовой ПРВ аргументов нелинейности осуществляется по формуле

$$\begin{aligned} \langle \varphi^{(l)}(y_1, \dots, y_n) \rangle^{(l)} &= \sum_{i_1=1}^{n_1} \dots \sum_{i_N=1}^{n_N} \lambda_{i_1} \dots \lambda_{i_N} \varphi^{(l)}(M_1^{(l)} + \sigma_1^{(l)} u_{i_1}) \dots (M_N^{(l)} + \sigma_N^{(l)} u_{i_N}) \times \\ &\times \left(1 + \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{q=p+1}^N \frac{D_{pq}^{(l)}}{\sigma_p^{(l)} \sigma_q^{(l)}} u_{i_p} u_{i_q} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

где λ_{i_k} ($i_k = 1, \dots, n_k$) – весовые коэффициенты метода статистической аппроксимации нелинейности $\varphi^{(l)}(y_1, \dots, y_n)$, приведенные в таблице;

u_{i_k} – узлы n -точечной статистической аппроксимации нелинейности, также приведенные в таблице;

$D_{pq}^{(l)}$ – взаимный центральный корреляционный момент p -й и q -й фазовых координат в l -м состоянии структуры ДССС;

$\sigma_p^{(l)} = \sqrt{D_{pp}^{(l)}}$, $\sigma_q^{(l)} = \sqrt{D_{qq}^{(l)}}$ – среднее квадратичное отклонение p -й и q -й фазовых координат соответственно.

При негауссовой ПРВ аргументов нелинейностей раскрытие усреднений в уравнениях (1), (2) также осуществляется по формулам (22) и (24) после замены в них узлов u_i (u_{i_k}) на уточненные узлы u_i^* ($u_{i_k}^*$) и весов λ_i (λ_{i_k}) на уточненные веса λ_i^* ($\lambda_{i_k}^*$).

Уточненные значения узлов и весов из-за негауссового характера ПРВ аргументов нелинейности $\varphi(Y)$ определяются в результате решения методом Ньютона – Рафсона нелинейного алгебраического уравнения для этих узлов и весов. Методика составления этих нелинейных алгебраических уравнений изложена в [3].

На седьмом этапе методики получают формулы для расчета итоговых (с учетом наличия двух, а в общем случае – S состояний структуры ДССС) вероятностных моментов фазовых координат ДССС в функции времени по следующим уравнениям связи:

для расчета итогового значения математического ожидания p -й ($p = \overline{1, 12}$) фазовой координаты

$$M_p = \sum_{l=1}^S P^{(l)} M_p^{(l)}, \quad (25)$$

для расчета итогового взаимного корреляционного момента p -й и k -й фазовых координат

$$D_{pk} = \sum_{l=1}^S P^{(l)} D_{pk}^{(l)} + \sum_{l=1}^S P^{(l)} (M_p^{(l)} - M_p)(M_k^{(l)} - M_k). \quad (26)$$

При $k = p$ из выражения (26) имеем уравнение связи для расчета итоговой дисперсии p -й фазовой координаты ДССС.

На восьмом этапе методики составляются уравнения для расчета математического ожидания и дисперсии промаха ЗУР относительно цели в вертикальной плоскости в l -м состоянии структуры ДССС по формулам:

$$\begin{aligned} M_{h_1}^{(l)} &= \varepsilon_{\text{ц}} R(t_{\text{в}}) + M_{\Delta\varepsilon}^{(l)} R(t_{\text{в}}) - M_1^{(l)} R(t_{\text{в}}) + M_{12}^{(l)} R(t_{\text{в}}); \\ D_{h_1}^{(l)} &= R^2(t_{\text{в}}) D_{1.1}^{(l)} + R^2(t_{\text{в}}) D_{12.12}^{(l)} - 2R^2(t_{\text{в}}) D_{1.12}^{(l)}, \end{aligned} \quad (27)$$

где $t_{\text{в}}$ – время встречи ЗУР с целью.

Итоговые значения математического ожидания и дисперсии промаха ЗУР в вертикальной плоскости рассчитываются по формулам, аналогичным выражениям (25) и (26).

На девятом этапе методики записывается выражение для расчета вероятности вывода ЗУР в круг заданного относительно цели радиуса $R_{\text{РВ}}$ (равного радиусу надежного срабатывания радиовзрывателя ракеты), которая при нормальной ПРВ промаха $f(h_1^{(l)})$ рассчитывается по следующей формуле:

$$P(-R_{\text{РВ}} \leq h_1 \leq R_{\text{РВ}}) = \int_{-R_{\text{РВ}}}^{R_{\text{РВ}}} f(h_1) dh_1 = \Phi\left(\frac{R_{\text{РВ}} - M_{h_1}}{\sigma_{h_1}}\right) + \Phi\left(\frac{R_{\text{РВ}} + M_{h_1}}{\sigma_{h_1}}\right), \quad (28)$$

где h_1 – итоговый промах ЗУР в вертикальной плоскости наведения ракеты;

M_{h_1} – итоговое математическое ожидание промаха ЗУР в вертикальной плоскости наведения;

σ_{h_1} – итоговое СКО промаха ЗУР в вертикальной плоскости наведения;

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \text{затабулированная функция Лапласа [9].}$$

При негауссовой ПРВ промаха ЗУР, а также при использовании пространственной математической модели контура управления формулы для расчета вероятности попадания ракеты на отрезок $[-R_{\text{РВ}}, R_{\text{РВ}}]$ (при использовании плоскостной математической модели) или в круг радиуса $R_{\text{РВ}}$ (при использовании пространственной математической модели) приведены в [10].

Исследование разработанной аналитической математической модели такой СТУ ЗУР в классе ДССС осуществляется путем однократного интегрирования на ЭВМ линеаризованной системы ОДУ для центральных вероятностных моментов и вычислений по формулам (25)–(28).

Заключение

1. Проверка адекватности разработанной аналитической математической модели осуществлялась путем сравнения результатов аналитического математического моделирования процесса наведения ЗУР на одиночную цель для десяти характерных точек зоны поражения ЗРК с аналогичными результатами имитационного математического моделирования имитационной математической модели этой же СТУ при числе модельных экспериментов в каждой точке зоны поражения ЗРК, равном 3000 [10].

2. Значения вероятностей вывода ЗУР в круг заданного относительно цели радиуса, равного 30 м, полученные по результатам аналитического математического моделирования во всех десяти точках зоны поражения ЗРК не отличались от аналогичных результатов, полученных классическим методом имитационного математического моделирования более чем на 2–5 %, что свидетельствует о высокой (95 %) адекватности разработанной аналитической математической модели СТУ ЗУР.

3. Разработанные имитационная и аналитическая математические модели в дальнейшем планируется использовать при разработке облика и структурно-параметрической оптимизации системы управления ЗУР перспективного ЗРК «ПВО-тактическая ПРО» ближнего действия (до 20 км) с комплексированной (радиолокационно-лазерной) информационной системой и комбинированной системой наведения ЗУР, планируемого к разработке оборонно-промышленным комплексом России в 2018–2025 годах в рамках НИР «Стандарт» и последующих опытно-конструкторских работ [11, 12].

Список использованных источников

1. Косачев, И. М. Имитационная математическая модель контура наведения зенитной телеуправляемой ракеты зенитного ракетного комплекса с комплексированной информационной системой / И. М. Косачев, К. Н. Чугай // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 4 (57). – С. 25–32.
2. Казаков, И. Е. Анализ систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев, В. А. Бухалев. – М. : Физматлит, 1993. – 272 с.
3. Косачев, И. М. Аналитическое моделирование стохастических систем / И. М. Косачев, М. Г. Ерошенков. – Минск : Наука и техника, 1993. – 264 с.
4. Системы управления при скачкообразных воздействиях / В. А. Ганэ [и др.]. – Минск : Наука, 1985. – 287 с.
5. Пугачев, В. С. Теория стохастических систем : учеб. пособие / В. С. Пугачев, И. Н. Сеницын. – М. : Логос, 2004. – 1000 с.
6. Стратонович, Р. Л. Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления / Р. Л. Стратонович. – М. : МГУ, 1966. – 346 с.
7. Косачев, И. М. Методология построения аналитических математических моделей РЛС, ЗРК и АСУ в интересах оценки эффективности группировок ПВО / И. М. Косачев, И. Ф. Олишевко // Сб. докл. IV науч.-техн. конф., Минск, 29–30 нояб. 2000 г. – Минск : ВА РБ, 2001. – С. 159–194.
8. Косачев, И. М. Методология аналитического моделирования боевой работы вооружения войск ПВО / И. М. Косачев // Сб. докл. IV науч.-техн. конф., Минск, 29–30 нояб. 2000 г. – Минск : ВА РБ, 2001. – С. 195–220.
9. Таблица значений функции Лапласа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.webmath.ru/> – Дата доступа: 15.09.2017.
10. Косачев, И. М. Новые высокоэффективные методы наведения телеуправляемых ЗУР / И. М. Косачев, О. Г. Бойцов, В. В. Меликаев // Сб. докл. Междунар. воен.-науч. конф., Минск 10–16 марта 2000 г. – Минск : ВА РБ, 2000. – С. 176–191.
11. Рябов, К. НИР «Стандарт» и создание перспективных зенитных ракетных комплексов войсковой ПВО [Электронный ресурс] / К. Рябов. – Режим доступа: <http://www.arms-expo.ru/news/meropriyatiya/> – Дата доступа: 25.07.2017.
12. Перспективный зенитный ракетный комплекс войсковой ПВО малой дальности планируется создать к 2030–2035 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rbase.new-factoria.ru/news/> – Дата доступа: 25.07.2017.

*Сведения об авторах:

Косачев Иван Михайлович,
УО «Военная академия Республики Беларусь».
Чугай Константин Николаевич,
ГУ «НИИ Вооруженных Сил Республики Беларусь».
Статья поступила в редакцию 22.09.2017 г.

ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 623.624.2

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕЛЕКЦИИ ПО ВРЕМЕНИ ПРИХОДА СТАНЦИИ ОТВЕТНЫХ ПОМЕХ ПРИ ПОДАВЛЕНИИ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ

Е. Л. Крейдик*

В статье для станции ответных помех определена верхняя граница вероятности селекции по времени прихода сигналов, модулированных по временному положению при подавлении систем радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

The article considers, on the effectiveness of repeater jamming with time-of-arrival sorting of frequency-hopping communications systems with discrete variable time delay.

Введение

Для предварительной оценки помехоустойчивости создаваемых радиоэлектронных средств необходимо выполнить теоретико-вероятностные расчеты, связанные с оценкой вероятностно-временных характеристик станций ответных помех (СОП) при подавлении УКВ наземной радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ).

Средства радиоподавления систем радиосвязи (СРС) с ППРЧ характеризуются пропускной способностью по радиоразведке и по радиоподавлению [1]. В работе [2] получен следующий ряд предельных значений характеристик СОП:

- нижний предел интервала наблюдения, при котором обеспечивается получение требуемой оценки несущей частоты;
- верхний предел времени срабатывания СОП, который зависит от длительности скачка частоты, времени запаздывания помехи и от мощности передатчика СОП;
- отношение сигнал/шум, необходимое СОП для выполнения селекции по направлению прихода или по времени прихода.

Полученные предельные характеристики существенно влияют на пропускную способность СОП по радиоразведке и по радиоподавлению. Для их определения принято допущение, что полосы пропускания каналов измерения аппаратуры радиотехнической разведки (РТР) СОП согласованы с полосой пропускания частотных каналов СРС.

В работах [4, 5] проведен синтез и анализ эффективности оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обнаружения и различения сигналов. Рассмотрены основные типы многоканальных обнаружителей сигналов и их рабочие характеристики. Приведена математическая модель функционирования систем радиосвязи в условиях радиоэлектронного подавления. В работах [6–9] рассмотрены различные алгоритмы разделения потока сигналов с ППРЧ, основанные на применении фильтрации их частотно-временных параметров (рисунок 1).

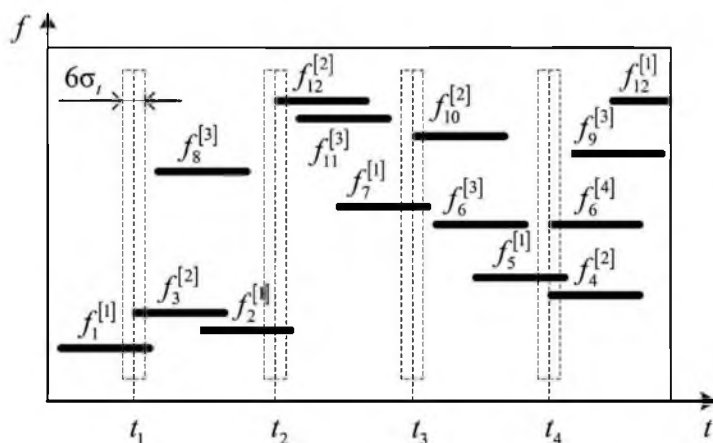


Рисунок 1. – Сопровождение частотных элементов сигнала с ППРЧ по времени прихода и частоте

В работе [8] селекция проводится в соответствии с моделью, учитывающей пропадание и последующее появление импульсов на разных частотах с заданным интервалом «прерывания». Процесс сопровождения частотных элементов (ЧЭ) по времени прихода и частоте приведен на рисунке 1 для случая задания априорных стробов селекции (пунктир), где $f_{\text{номер канала}}^{[\text{номер СРС}]}$ – текущая частота ЧЭ. Введены понятия векторов состояния и наблюдения за каждым СРС с ППРЧ. Вектор состояния m -мерный ($m=7$) $\mathbf{x}_k = (t_{\text{нк}}, t_{\text{ок}}, T_k, \tau_k, f_k, f_{\text{срк}}, \theta_k)$, включающий время начала $t_{\text{нк}}$, окончания $t_{\text{ок}}$ излучения на одной частоте, период перестройки T_k , длительность излучения τ_k , текущую f_k и среднюю $f_{\text{срк}}$ частоты, пеленг θ_k , где k обозначает дискретное время. Вектор наблюдения n -мерный ($n=4$) $\mathbf{z}_k = (\hat{t}_{\text{нк}}, \hat{t}_{\text{ок}}, \hat{f}_k, \hat{\theta}_k)^T$.

Следовательно, время начала (время прихода) $t_{\text{нк}}$ является параметром векторов для разделения смеси сигналов СРС с ППРЧ и сопровождения гипотетических СРС, т. е. последовательностей наблюдений в динамических стробах селекции [6–9].

Таким образом, задача селекции по времени прихода является актуальной. Определим верхнюю границу вероятности селекции по времени прихода ЧЭ сигнала с ППРЧ, основываясь на результатах исследований по предельным возможностям СОП [2, 3].

1. Селекции по времени прихода сигналов СРС с ППРЧ

При селекции по времени прихода предполагается [2, 3], что ЧЭ от N однотипных СРС с ППРЧ независимо поступают на вход аппаратуры РТР в случайные моменты времени в пределах T_d – интервала времени ЧЭ. Длительности ЧЭ J объектов подавления точно оценены среди множества других источников радиоизлучения, расположенных в заданном для СОП секторе ответственности. Интервал между скачкообразной перестройкой ЧЭ, генерируемый каждым передатчиком, постоянный. Предложенная вероятностно-временная модель (ВВМ) [2, 3] предусматривает обнаружение и селекцию сигналов аппаратурой РТР, исходящих от N СРС с ППРЧ. Если J сигналов с ППРЧ должны быть подавлены, то эти J сигналов должны быть отделены от всех перехваченных сигналов.

Предполагается, что для каждого из этих J сигналов первоначальный ЧЭ может быть идентифицирован. Для селекции по времени прихода, при достаточной мощности обнаруживаемый сигналов, аппаратура РТР определит длительность ЧЭ и установит временной строб с расстоянием между границами $6\sigma_t$, симметричный относительно переднего фронта ЧЭ, где σ_t – среднее квадратическое отклонение (СКО) оценки времени прихода ЧЭ. ВВМ предусматривает с высокой вероятностью селекцию по времени прихода только одного ЧЭ в границах установленного строба. Если более чем один ЧЭ попадает

в границы установленного строга, станция СОП игнорирует все ЧЭ, оказавшиеся внутри границ строга. В данной ВВМ [2, 3] приняты упрощения для более удобного использования соотношений теории вероятностей и для определения ряда характеристик селекции по времени прихода.

Таким образом, ВВМ [2, 3] предусматривает, что если ЧЭ от других $N-1$ СРС, как предполагается, придут независимо в случайные моменты времени в пределах T_d и $\sigma_t \leq T_d/6$, время обработки СОП, расположения передатчика и приемника СРС и СОП благоприятны для подавления символа. Тогда вероятность, что остальные ЧЭ не придут в пределах границ установленного временного строга $(1-6\sigma_t/T_d)^{N-1}$.

Из неравенства Крамера – Рао следует, что СКО оценки времени прихода ЧЭ при использовании двухканального фазового пеленгатора (1-й и 2-й каналы однотипные) определено выражением [2, 3]:

$$\sigma_t \geq \left(\frac{E}{N_0} \Delta f_e^2 \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

где E – энергия перехваченного ЧЭ на интервале наблюдения T (иначе – интервал измерения), $E_1 = E_2 = E$;

N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности шума на выходе антенн, $N_{01} = N_{02} = N_0$;

Δf_e – эффективная ширина спектра ЧЭ, которая для сигнала при равномерном спектре в пределах полосы F определена выражением [2, 3, 10]:

$$\Delta f_e^2 = \frac{\pi^2 F^2}{3}. \quad (2)$$

Выразим СКО оценки времени прихода ЧЭ с помощью выражения (1):

$$E/N_0 = \rho_i FT, \quad (3)$$

где ρ_i – отношение сигнал/шум на входе канала измерения аппаратуры РТР (1-й и 2-й каналы однотипные), $\rho_1 = \rho_2 = \rho_i$;

F – полоса пропускания частотного канала СРС;

T – длительность интервала наблюдения ЧЭ.

В результате преобразования (1), (2) и (3) получено выражение [2, 3, 11] СКО оценки времени прихода ЧЭ

$$\sigma_t \geq \left(\frac{3}{\pi^2 F^3 T \rho_i} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Таким образом, вероятность $(1-6\sigma_t/T_d)^{N-1}$, что остальные ЧЭ не придут в пределах границ установленного временного строга, выразим через СКО оценки времени прихода ЧЭ (4), получим верхнюю границу вероятности селекции ЧЭ по времени прихода:

$$P_t \leq \left(1 - \frac{6}{\pi T_d} \sqrt{\frac{3}{F^3 T \rho_i}} \right)^{N-1}. \quad (5)$$

Следует отметить, значение длительности интервала наблюдения $T < T_{pr}$ меньше времени срабатывания СОП T_{pr} и $T < T_d$.

Верхняя граница вероятности селекции по времени прихода (5) зависит от фиксированного интервала между скачкообразной перестройкой ЧЭ, генерируемых СРС. Если объекты подавления (СРС с ППРЧ) используют переменный интервал, селекцию по времени прихода выполнить гораздо сложнее [2]. Рассмотрим селекцию по времени прихода сигналов СРС с ППРЧ, ЧЭ которых изменяют временное положение в соответствии

с методом псевдослучайной время-импульсной модуляции (ПВИМ). Длительность при этом ЧЭ в процессе модуляции остается неизменной.

2. Селекция по времени прихода сигналов модулированных по методу ПВИМ СРС с ППРЧ

Предположим, что ЧЭ с ПВИМ от N однотипных СРС с ППРЧ независимо поступают на вход аппаратуры РТР в случайные моменты времени в пределах T_d , и передатчики этих СРС генерируют достаточную мощность сигналов для перехвата аппаратурой РТР.

Один из примеров реализации ПВИМ – широкополосная сетевая УКВ радиосистема передачи данных с временным разделением доступа Link 16, где стандартный временной интервал (кадр) состоит из начального интервала, называемого джиттером, передаваемого информационного пакета и защитного интервала. Положение информационного пакета длительностью 3354 мкс внутри кадра определяется величиной джиттера. Для повышения защиты системы от преднамеренных помех значение длительности джиттера изменяется от кадра к кадру по псевдослучайному закону [12].

Дискретное изменение временного положения ЧЭ по методу ПВИМ от СРС с ППРЧ представим на рисунке 2.

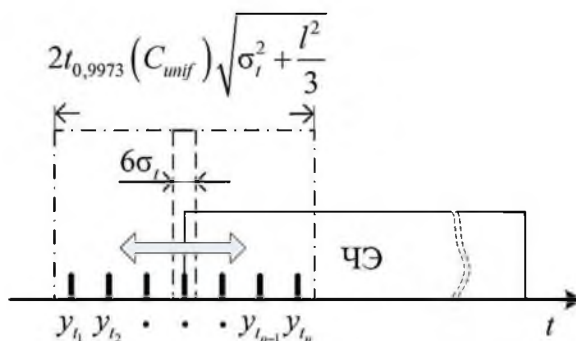


Рисунок 2. – Дискретное изменение временного положения ЧЭ по методу ПВИМ

С учетом разброса времени прихода ЧЭ, вызванного многолучевым распространением радиоволн, доопытное (априорное) распределение времени прихода ЧЭ с ПВИМ от СРС с ППРЧ (далее – ЧЭ с ПВИМ) представим в виде равномерного закона распределения:

$$f_2(y) = \begin{cases} 1/(\beta - \alpha) & \text{при } \alpha < y < \beta, \\ 0 & \text{при } y < \alpha \text{ или } y > \beta. \end{cases} \quad (6)$$

Обозначим время прихода ЧЭ с ПВИМ (иначе – оцениваемый параметр) через непрерывную случайную величину Y , где y – некоторая текущая переменная (6) этой случайной величины. Без учета времени распространения радиоволн значения величин α , β совпадают с максимальными отклонениями временного положения (упреждение $y_i = \alpha$ или задержка $y_{i_n} = \beta$) ЧЭ с ПВИМ, которые симметричны относительно временного положения ЧЭ $(y_{i_n} + y_i)/2$ при отсутствии ПВИМ (рисунок 2).

При конечной величине Δf_e и достаточно интенсивном сигнале опытное (апостериорное) распределение оценки времени прихода подчиняется нормальному закону [13, с. 188] с параметрами σ_t – СКО оценки времени прихода ЧЭ, m_0 – математическое ожидание:

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_0)^2}{2\sigma_t^2}}, \quad (7)$$

где σ_t обратно пропорционально $\sqrt{E/N_0}$ и эффективной ширине спектра Δf_e . Апостериорную оценку времени прихода обозначим через непрерывную случайную величину X , где x – некоторая текущая переменная (7) этой случайной величины.

Результат опыта опишем двумя случайными величинами X и Y , образующими систему с плотностью распределения $f(x, y)$. Зависимость между случайными величинами X и Y является настолько слабой и отдаленной, что их считаем независимыми, так как закон распределения каждой из них не зависит от того, какое значение приняла другая [14].

Если имеются доопытные данные о том, что измеряемый параметр равновероятно принимает значение в интервале от α до β , то соответствующая оценка производится на стробированном участке временной шкалы. Такое стробирование устраняет возможность оценки по ложному выбросу, особенно опасной при невысоком отношении E/N_0 [13, с. 185].

С учетом изменения отношения E/N_0 (1), определим длительность временного строба (расстояние между границами), необходимого для селекции (вторичной обработки) [9, с. 140] первичной апостериорной информации. Выразим длительность временного строба через доверительный интервал I_p^* непрерывной случайной величины $Z = X + Y$, который учитывает не только оцениваемый параметр, равновероятно принимающий значения в интервале от α до β , но и учитывает величину СКО оценки времени прихода ЧЭ (1).

Произведем композицию законов распределения для двух независимых случайных величин (X, Y) , подчиненных законам распределения $f_1(x)$ и $f_2(y)$.

Функция $g(z)$ называется плотностью распределения (дифференциальным законом распределения) непрерывной случайной величины Z , где z – некоторая текущая переменная этой случайной величины [14]:

$$g(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(z-y)f_2(y)dy. \quad (8)$$

Применим формулу композиции законов распределения (8), получим плотность распределения [14, 15] непрерывной случайной величины Z :

$$g(z) = \frac{1}{2(\beta-\alpha)} \left(\Phi \left(\frac{\beta-(z-m)}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{\alpha-(z-m)}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right). \quad (9)$$

Тогда доверительный интервал I_p^* для оценки непрерывной случайной величины Z , подчиненной композиции (9) равномерного (6) и нормального (7) законов распределения, определен следующим выражением [16]:

$$I_p^* = \left(m_0 + \frac{\alpha+\beta}{2} - t_p(C_{unif}) \sqrt{\sigma_t^2 + \left(\frac{\beta-\alpha}{2\sqrt{3}} \right)^2}; m_0 + \frac{\alpha+\beta}{2} + t_p(C_{unif}) \sqrt{\sigma_t^2 + \left(\frac{\beta-\alpha}{2\sqrt{3}} \right)^2} \right), \quad (10)$$

где * – символ композиции нормального и равномерного законов распределения;
 p – доверительная вероятность;

$$m_0 + \frac{\alpha+\beta}{2} \mp t_p(C_{unif}) \sqrt{\sigma_t^2 + \left(\frac{\beta-\alpha}{2\sqrt{3}} \right)^2} \text{ – доверительные границы;}$$

$\frac{\beta-\alpha}{2\sqrt{3}}$ – СКО случайной величины y , подчиненной закону равномерного распределения (6);

$t_p(C_{unif})$ – множитель, зависящий от величины C_{unif} ;

$C_{unif} = \frac{\beta-\alpha}{2\sqrt{3}\sigma_t}$ – величина (показатель) относительного содержания в композиции

нормального и равномерного законов распределения равномерной составляющей.

Так как формула (9) не может быть выражена комбинацией элементарных функций, то дальнейший анализ проведем только численным и приближенным методами [15, с. 93]. Табличные значения множителя $t_p(C_{unif})$ получены в результате решения численным методом трансцендентного уравнения, которое образовано выражением (11), приравненным к выбранной для селекции по времени прихода [2, 3] доверительной вероятности $p = 0,9973$.

Выражение (11) получено для определения вероятности попадания на участок от γ до ε случайной величины Z , подчиненной композиции нормального (7) и равномерного (6) законов распределения, имеющих произвольные центры распределения [16].

$$P(\gamma < Z < \varepsilon) = \frac{1}{2(\beta - \alpha)} \times \left[(\beta + m_0 - \gamma) \Phi\left(\frac{\beta + m_0 - \gamma}{\sqrt{2}\sigma}\right) - (\beta + m_0 - \varepsilon) \Phi\left(\frac{\beta + m_0 - \varepsilon}{\sqrt{2}\sigma}\right) - (\alpha + m_0 - \gamma) \Phi\left(\frac{\alpha + m_0 - \gamma}{\sqrt{2}\sigma}\right) + (\alpha + m_0 - \varepsilon) \Phi\left(\frac{\alpha + m_0 - \varepsilon}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma \left(e^{-\left(\frac{\beta + m_0 - \gamma}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} - e^{-\left(\frac{\beta + m_0 - \varepsilon}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} - e^{-\left(\frac{\alpha + m_0 - \gamma}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} + e^{-\left(\frac{\alpha + m_0 - \varepsilon}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} \right) \right], \quad (11)$$

тогда $\gamma = m_0 + \frac{\alpha + \beta}{2} - t_p(C_{unif}) \sqrt{\sigma_i^2 + \left(\frac{\beta - \alpha}{2\sqrt{3}}\right)^2}$, $\varepsilon = m_0 + \frac{\alpha + \beta}{2} + t_p(C_{unif}) \sqrt{\sigma_i^2 + \left(\frac{\beta - \alpha}{2\sqrt{3}}\right)^2}$ –

доверительные границы, при которых $P(\gamma < Z < \varepsilon) = p$. Полученные табличные значения множителя $t_{0,9973}(C_{unif})$ приведены на рисунке 3. Результат аппроксимации полученной зависимости множителя $t_{0,9973}(C_{unif})$ приведен в виде приближенной формулы [16]:

$$\tilde{t}_{0,9973}(C_{unif}) = 2,38 - 0,65\Phi(0,53(e \lg C_{unif} - 1)). \quad (12)$$

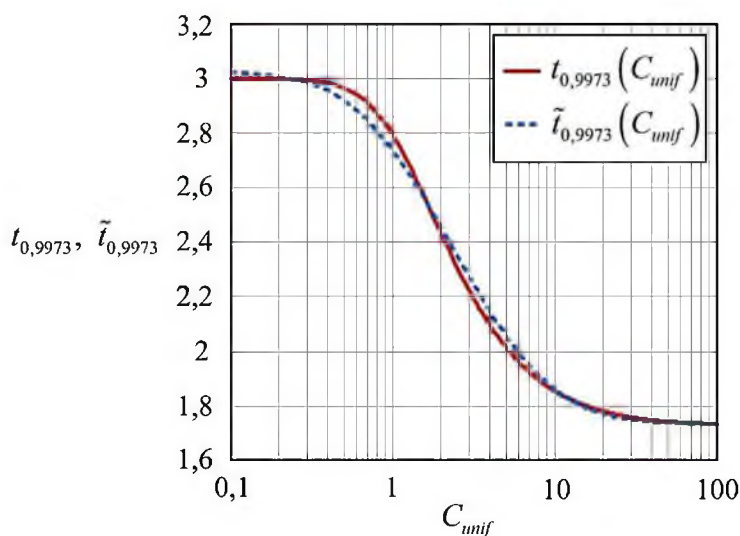


Рисунок 3. – Результат расчетов множителей $t_{0,9973}(C_{unif})$, $\tilde{t}_{0,9973}(C_{unif})$

С помощью выражения (12) можно с достаточной для практики точностью, не прибегая к расчету табличных значений численным методом множителя $t_{0,9973}(C_{unif})$, определить доверительный интервал случайной величины, подчиненной композиции нормального и равномерного законов распределения. Предельные отклонения множителя $\tilde{t}_{0,9973}(C_{unif})$ от множителя $t_{0,9973}(C_{unif})$, при изменении C_{unif} от 10^{-2} до 10^3 составили $\delta\tilde{t}_{0,9973}(C_{unif}) = \pm 2,5\%$, $\Delta p_{0,9973} = \pm 0,0015$ [16]. Для определения доверительного интервала случайной величины Z положим для простоты, что законы распределения $f_1(x)$ и $f_2(y)$ имеют общий центр распределения $m_0 = (\alpha + \beta)/2 = 0$ в начале координат. Обозначим через \bar{I}_p^* расстояние между границами доверительного интервала I_p^* . С учетом $\alpha = -l$, $\beta = l$ и выражения (10) определим расстояние между границами доверительного интервала I_p^* :

$$\bar{I}_p^* = 2t_p(C_{unif})\sqrt{\sigma_t^2 + \frac{l^2}{3}}, \quad (13)$$

тогда $C_{unif} = \frac{\beta - \alpha}{2\sqrt{3}\sigma_t} = \frac{l}{\sqrt{3}\sigma_t}$. Таким образом, определена длительность временного stroba, необходимого для селекции (вторичной обработки) первичной апостериорной информации по времени прихода. В результате накопления первичной информации о времени прихода сигналов аппаратура РТР устанавливает временной strob, расстояние между границами которого \bar{I}_p^* .

Тогда $(1 - \bar{I}_p^*/T_d)^{N-1}$ – вероятность того, что первичная апостериорная информация не содержит данные, в пределах длительности установленного временного stroba, о времени прихода ЧЭ модулированных по методу ПВИМ от других однотипных $N-1$ СРС с ППРЧ. Выполним подстановку (4), (13) в выражение $(1 - \bar{I}_p^*/T_d)^{N-1}$ и, по аналогии с выражением (5), определим верхнюю границу вероятности селекции по времени прихода ЧЭ с ПВИМ:

$$P'_t \leq \left(1 - \frac{2t_p(C_{unif})}{\pi T_d} \sqrt{\frac{3}{F^3 T \rho_i} + \frac{l^2}{3}} \right)^{N-1}. \quad (14)$$

Для $p = 0,9973$ множитель $t_p(C_{unif})$ выражен формулой (12), где $C_{unif} = \frac{l}{\sqrt{3}\sigma_t} = \frac{\pi l}{3} \sqrt{F^3 T \rho_i}$.

Допустим, $T_d/T_h = 0,8$ [2, 3], где T_h – длительность скачка частоты (время работы на одной частоте). Для $R_h = 1/T_h$ – скорости переключения частот 500 скачков/с $T_h = 2$ мс, $T_d = 1,6$ мс. Выполним условие $l < (T_h - T_d)/2$. Отношение сигнал/шум $\rho_i = 10$ дБ. Положим, длительность интервала наблюдения ЧЭ $T = 0,25$ мс, где $T < T_{pr}$ (где T_{pr} – время реакции (обнаружения и подавления) составляет менее 0,5 мс) [17]. Полоса пропускания канала измерения станции РТР (полоса пропускания частотного канала СРС) $F = 25$ кГц. Приведем на рисунке 4 результаты выполненных расчетов по формулам (5) и (14), где $l \leq 0,02T_d$.

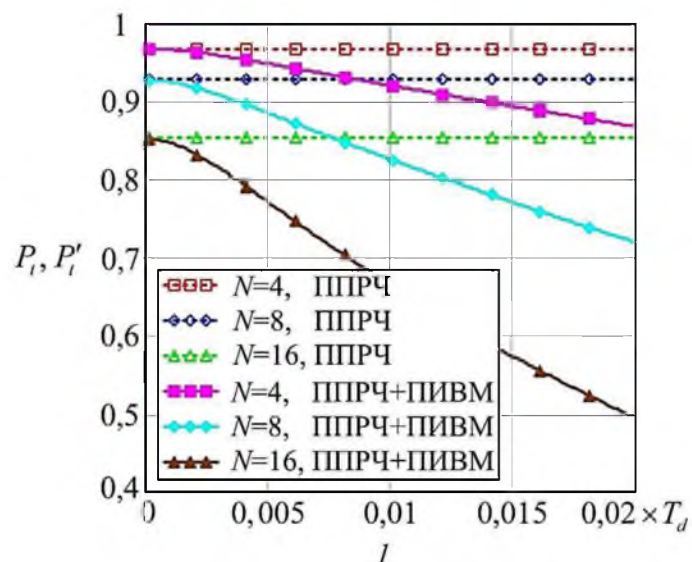


Рисунок 4. – Расчет верхней границы вероятности селекции ЧЭ по времени прихода

Выводы

Таким образом, определены верхние границы вероятности селекции по времени прихода ЧЭ: сигналов СРС с ППРЧ и сигналов СРС с ПИВМ и ППРЧ. Из приведенных расчетов (рисунок 4) следует, что селекция СОП по времени прихода ЧЭ значительно затруднена, когда сигналы СРС сформированы в результате комбинации двух методов ППРЧ и ПИВМ, по отношению к сигналам, сформированным только методом ППРЧ.

Список использованных источников

1. Владимиров, В. И. Антагонистический конфликт радиоэлектронных систем. Методы и математические модели / В. И. Владимиров, В. П. Лихачев, В. М. Шляхин ; под ред. В. М. Шляхина. – М. : Радиотехника, 2004. – 384 с.
2. Torrieri, D. J. Fundamental Limitations on Repeater Jamming of Frequency-Hopping Communications / D. J. Torrieri // IEEE J. on Selected Areas in Communications. – 1989. – Vol. 7 (No. 4, May). – P. 569–575.
3. Torrieri, D. J. Principles of Secure Communication / D. J. Torrieri. – 2nd ed. – Norwood : Artech House, 1992. – 576 p.
4. Борисов, В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи: основы теории и принципы реализации / В. И. Борисов. – М. : Наука, 2009. – 358 с.
5. Пространственные и вероятностно-временные характеристики эффективности станций ответных помех при подавлении систем радиосвязи / В. И. Борисов [и др.] ; под общ. ред. В. И. Борисова. – М. : РадиоСофт, 2008. – 362 с.
6. Cooper, G. R. Detection and identification of multiple spread-spectrum signals MILCOM: paper from the 90th Military Communications Conf., Monterey, Sept. 30 – Oct. 3 1990 / G. R. Cooper, R. D. Martin. – Monterey, 1990. – Vol. 3. – P. 999–1003.
7. Радзиевский, В. Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки / В. Г. Радзиевский, А. А. Сирота. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Радиотехника, 2004. – 432 с.
8. Кирсанов, Э. А. Фильтрация частотно-временных параметров сигналов радиоэлектронных средств радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / Э. А. Кирсанов, А. А. Сирота // Радиотехника. – 2006. – № 9. – С. 109–112.
9. Кирсанов, Э. А. Обработка информации в пространственно-распределенных системах радиомониторинга: статистический и нейросетевой подходы / Э. А. Кирсанов, А. А. Сирота. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 344 с.
10. Теоретические основы радиолокации / В. Е. Дулевич [и др.] ; под ред. В. Е. Дулевича. – М. : Сов. радио, 1964. – 732 с.

11. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
12. Фидельман, В. Р. Цифровая обработка сигналов широкополосной системы связи с временным разделением доступа Link 16 / В. Р. Фидельман, А. О. Трушков // Труды XVI науч. конф. по радиофизике, посвящ. 100-летию со дня рождения А. Н. Бархатова, Нижний Новгород, 11–18 мая 2012 г. – Нижний Новгород : ННГУ, 2012. – С. 142–144.
13. Теоретические основы радиолокации / Я. Д. Ширман [и др.] ; под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с.
14. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Высш. шк., 1999. – 576 с.
15. Новицкий, П. В. Основы информационной теории измерительных устройств / П. В. Новицкий. – Л. : Энергия, 1968. – 248 с.
16. Крейдик, Е. Л. Методика расчета доверительного интервала оценки случайной величины, подчиненной композиции нормального и равномерного законов распределения / Е. Л. Крейдик // Доклады БГУИР. – 2017. – № 7 (109). – С. 25–31.
17. Невзоров, Ю. В. Концепция повышения помехозащищенности связанных радиолиний с использованием сигналов ППРЧ / Ю. В. Невзоров // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2012. – № 1–2. – С. 113–115.

*Сведения об авторе:

Крейдик Евгений Леонидович,

ОАО «АГАТ-СИСТЕМ».

Статья поступила в редакцию 03.01.2018 г.

АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ СПОСОБОВ ЗАЩИТЫ МОНОИМПУЛЬСНЫХ ПЕЛЕНГАТОРОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КРОСС-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПОМЕХ

Н. К. Кузьмичев, И. В. Чигирь;
С. А. Горшков, кандидат технических наук, доцент*

В статье рассмотрено воздействие имитирующих помех на кросс-поляризации (ИП КП) на моноимпульсные пеленгаторы и способы защиты от их воздействия. Приведены результаты моделирования прохождения ИП КП через поляризационный автокомпенсатор.

The article deals with the effect of simulated interference on cross-polarization (SP CP) on monopulse direction finders and ways to protect them from their effects. The results of the simulation of the transmission of the SP of a CP through a polarization autocompensator.

Введение

Моноимпульсные пеленгаторы (МП) предназначены для точного измерения угловых координат летательных аппаратов в радиолокаторах сопровождения (моноимпульсных радиолокаторах [7]). Воздействие радиоэлектронных помех на МП накладывает ограничения на их применение. При разработке или модернизации моноимпульсных радиолокаторов необходимо представлять типы помех, которые могут применяться для их подавления.

Изобретение МП позволило средствам ПВО одержать верх над авиацией в ходе сирийско-израильского конфликта. В период с 6 по 24 октября 1973 года ракетами ЗМ9 и ЗМ9Э было сбито 64 израильских самолета американского и европейского производства. Расход при этом составил 95 ракет. Превосходство оказалось недолгим – было найдено уязвимое место МП. Проведенные на полигонах СССР испытания по определению помехозащищенности МП [1] показали, что эффективность их существенно снижается при воздействии помех, имеющих поляризацию, ортогональную рабочей. Работы по исследованию влияния кросс-поляризационных помех на МП проводились советскими учеными К. И. Фомичевым, Л. М. Юдиным, К. К. Пашенко.

Низкая эффективность применения зенитных ракетных комплексов в последующих конфликтах позволяет утверждать, что проблема защиты МП от воздействия кросс-поляризационных помех является не решенной. В настоящее время большинство РЛС точного измерения координат являются моноимпульсными, поэтому актуальным является проведение анализа защищенности МП от воздействия имитирующих помех на кросс-поляризации.

Воздействие помех на кросс-поляризации на моноимпульсные пеленгаторы

Имитирующая помеха на кросс-поляризации представляет собой помеху на ортогональной поляризации зондирующему сигналу подавляемой РЛС. Такие помехи принимаются кросс-поляризационной диаграммой направленности антенны $F_k(\theta)$ (далее – ДНА), которая существенно отличается от ДНА на основной поляризации $F_o(\theta)$ (рисунок 1, а) [2, 7].

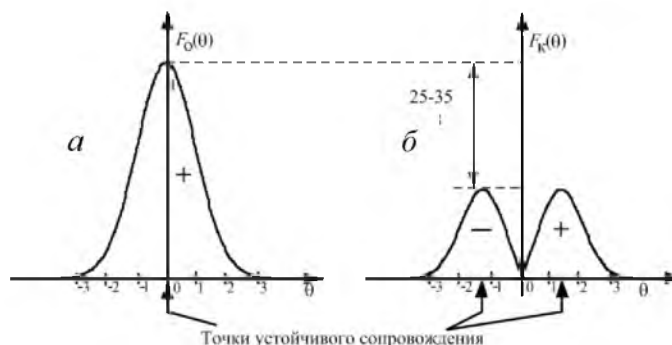


Рисунок 1. – Типовая ДНА на основной и кроссовой поляризациях

При превышении мощности ИП КП σ_{Π}^2 над сигналом σ_{Σ}^2 более чем на 40 дБ (энергетический критерий [3]) пеленгационная характеристика (ПХ) системы углового сопровождения РЛС будет определяться кросс-поляризационной ДНА [2, 7]. Типовая КП ДНА (рисунок 1, б) имеет провал в направлении максимума основной и имеет несколько максимумов, которые, как правило, не совпадают по направлению с максимумом ДНА на основной поляризации. Опасность ИП КП заключается в том, что после ее проникновения в канал сопровождения по угловым координатам, согласованный по поляризации с зондирующим сигналом, происходит потеря информации о ее поляризационной структуре. Поэтому на устройствах отображения информации ИП КП отображается как сигнал основной поляризации. При этом воздушная цель устойчиво сопровождается по угловым координатам не основной, а КП ДНА. При применении станцией радиоэлектронного подавления (далее – РЭП) качания плоскости поляризации в заданном секторе на индикаторах будут наблюдаться признаки маневра цели по угловым координатам при его фактическом отсутствии.

Нарушение функционирования канала углового сопровождения моноимпульсной РЛС достигается за счет искажения ПХ помехами на КП. Типовая ПХ на КП $D_{\kappa}(\theta)$ имеет точки устойчивого сопровождения (рисунок 2), не совпадающие с нулем ПХ на основной поляризации $D_0(\theta)$.

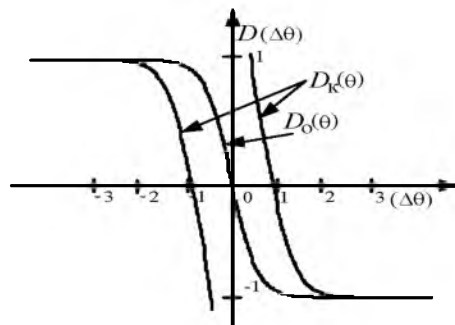


Рисунок 2. – Типовая ПХ на основной и кроссовой поляризациях

На рисунках 1, 2 представлены результаты аппроксимации ДНА на основной и кроссовой поляризациях по результатам [7]. В связи с вышесказанным современные МП должны иметь устройства, обеспечивающие своевременное обнаружение ИП КП и защиту от их воздействия.

Обзор существующих способов защиты моноимпульсных пеленгаторов от воздействия кросс-поляризационных помех

Анализ источников [3–5] показал, что в РЛС, реализованных в настоящее время, отсутствует аппаратура, имеющая возможность автоматического определения факта воздействия ИП КП. Руководства по ведению боевой работы на соответствующих ЗРК, например [8, 9], не содержат рекомендаций боевым расчетам по порядку определения момента воздействия ИП КП на ЗРК и отстройки от них.

В настоящее время имеется ряд технических решений, позволяющих снизить эффективность воздействия ИП КП на РЛС [2–7]. Классификация технических решений, применяемых для снижения эффективности воздействия ИП КП, представлена на рисунке 3.

Первый класс технических решений защиты РЛС от ИП КП направлен на снижение уровня КП излучения антенн с помощью специально подобранных пассивных элементов. Наиболее распространенным устройством, снижающим уровень КП антенны, являются поляризационные фильтры (ПФ) (рисунок 4), которые существенно подавляют ЭМВ имеющие поляризацию, ортогональную рабочей.



Рисунок 3. – Способы защиты МП от ИП КП

Поляризационный фильтр представляет собой конструкцию из тонких проводников, ориентированных перпендикулярно вектору рабочей поляризации РЛС. При прохождении ЭМВ через ПФ происходит сильное ослабление ее кросс-поляризационной составляющей. Мощность же согласованной составляющей в ПФ практически не изменяется. В качестве ПФ может использоваться отражатель антенны, который изготавливается в виде системы параллельных металлических пластин (проволочных нитей).

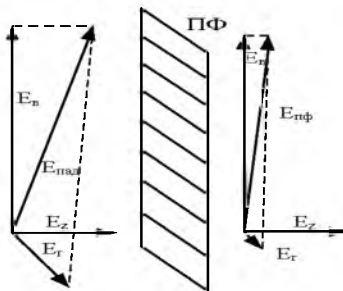


Рисунок 4. – Ослабление ИП КП в ПФ

Достоинством ПФ является простота, недостатком – отсутствие адаптации к параметрам помехи. Кроме того, применение ПФ препятствует реализации в РЛС быстрой смены поляризации, что ограничивает использование в РЛС поляризационных признаков в интересах селекции и распознавания воздушных целей и иных задач.

Снижение КП за счет отражателя антенны достигается повышением точности изготовления поверхности зеркала, уменьшением ее кривизны и использованием специальных элементов, частично компенсирующих кросс-поляризационную составляющую за счет собственного электромагнитного поля. Вариант такого облучателя [7] представлен на рисунке 5. Вокруг основного облучателя D_0 расположены дополнительные ($D_1 - D_4$) под углом 90° к его направлению, подбором размеров которых добиваются частичной компенсации кросс-поляризационного излучения. Применение корректирующих элементов позволяет снизить уровень КП антенны на 10 дБ.

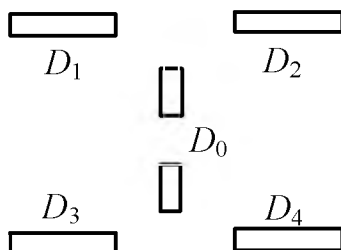


Рисунок 5. – Облучатель с корректирующими элементами

Снижение КП облучателя антенны достигается за счет его конструктивных особенностей. Наибольшее распространение получили гофрированные волноводные и рупорные облучатели, а также четвертьволновые стаканы, уменьшающие токи, затекающие за края апертуры рупора. Применение данных средств позволяет снизить уровень кросс-поляризационного излучения антенны на 10 дБ.

Комплексное применение перечисленных выше средств позволяет обеспечить уровень КП антенн с МП до -42 дБ [7]. Достоинством указанных способов является относительная простота изготовления дополнительных устройств, недостатком – искажение ДНА на основной поляризации и отсутствие адаптации к параметрам помех.

Вторым классом технических решений, обеспечивающих защиту РЛС от ИП КП, являются устройства их автоматической компенсации. В [3–5] содержатся структурные схемы РЛС с автоматической компенсацией КП помех на радио- и видеочастоте, без описания алгоритмов их работы. Кроме того, представленная в [3–5] РЛС не является моноимпульсной и не дает ответа на вопрос, какие каналы МП защищаются и сигналы каких каналов используются в качестве опорных.

Схема РЛС с автоматической компенсацией КП помех [3, с. 303; 6, с. 161] на радиочастоте (рисунок 1) содержит основной и компенсационный каналы. Основная высоконаправленная антенна работает на вертикальной поляризации. Дополнительная антенна – слабонаправленная и работает на горизонтальной (кроссовой) поляризации. Диаграмма направленности компенсационного канала согласована с диаграммой направленности антенны основного канала на КП. Антенны характеризуются коэффициентами усиления G_{a1} и G_{a2} . Вычитающее устройство предназначено для формирования сигнала ошибки, получаемой в результате вычитания сигнала, принятого компенсационным каналом из сигнала, принятого основным каналом. Отраженный сигнал вертикальной поляризации ($C_{ВП}$) (горизонтальная составляющая сигнала сильно ослабляется приемной антенной) и ИП КП горизонтальной поляризации ($\Pi_{ГП}$), сформированная станцией активных помех (САП), принимается антенной основного канала и поступают на вычитающее устройство. Компенсационный канал принимает только КП помеху, которая поступает на второй вход вычитающего устройства. Ошибка с его выхода используется для коррекции амплитуды ($E_{п}$) и фазы ($\varphi_{п}$) помехи в устройстве подстройки (Подстр. $E_{п}$ и $\varphi_{п}$). Сигнал цели (С) поступает на блок обработки информации (БОИ), где обрабатывается и поступает на последующие устройства.

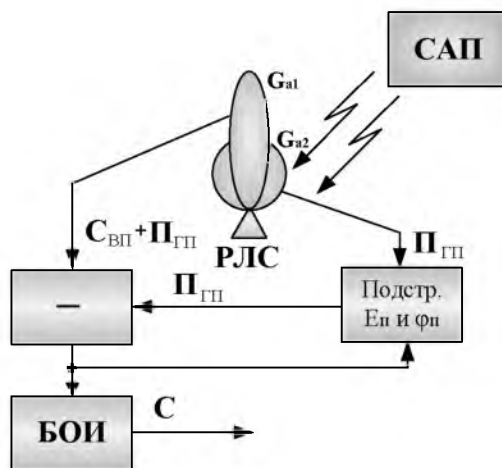


Рисунок 6. – Структурная схема РЛС с компенсацией КП помех на радиочастоте

Основными недостатками данной схемы являются:

- отсутствие возможности обнаружения (распознавания) ОИП КП;
- снижение точности измерения угловых координат при отсутствии ОИП КП, вследствие влияния дополнительного канала приема;
- не содержит информации, поясняющей возможность ее применения для защиты моноимпульсной РЛС.

Схема РЛС с автоматической компенсацией КП помех [3, с. 304; 6, с. 161] на видеочастоте (рисунок 7) содержит основной и компенсационный канал приема. Сигнал вертикальной поляризации ($C_{ВП}$), отраженный от цели, и КП помеха горизонтальной поляризации ($П_{ГП}$), сформированная САП, принимаются антенной основного канала (A_1). Компенсационная антенна (A_2) принимает только КП помеху. Наличием сигнала горизонтальной поляризации ($C_{ГП}$) в компенсационном канале можно пренебречь ввиду его малой мощности. КП помеха компенсируется после детектирования на вычитающем устройстве. Амплитуды и временная задержка КП помехи в основном и компенсационном каналах выравниваются в аттенуаторах (АТТ) и линиях задержки (ЛЗ) соответственно. Логарифмический усилитель промежуточной частоты (log УПЧ) предназначен для расширения динамического приемника РЛС. Особенностью антенны A_2 является работа только на прием.

Схема РЛС с компенсацией КП помех на видеочастоте (рисунок 7) является вариантом реализации рассмотренной ранее схемы на радиочастоте (рисунок 6) и обладает аналогичными недостатками. Дополнительный канал приема содержит высоконаправленную антенну, поэтому возможна компенсация деполяризованного сигнала основной антенны.

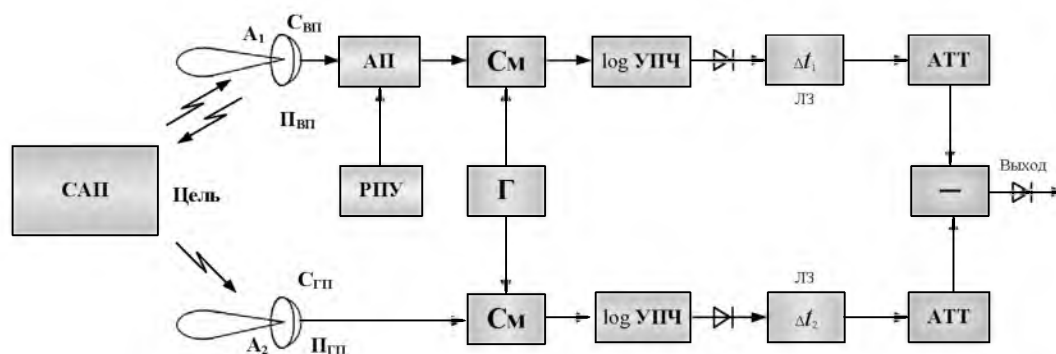


Рисунок 7. – Структурная схема РЛС с компенсацией КП помех на видеочастоте

В заключение обзора рассмотрим поляризационный автокомпенсатор (ПАК) (рисунок 8), который предназначен для компенсации активных шумовых помех (АШП) по основному лучу ДНА. Далее рассмотрим его возможности по компенсации ИП КП, проводя моделирование лишь для суммарного канала. Анализ возможностей компенсации ИП КП в разностных каналах приема будет рассмотрен в дальнейших исследованиях.

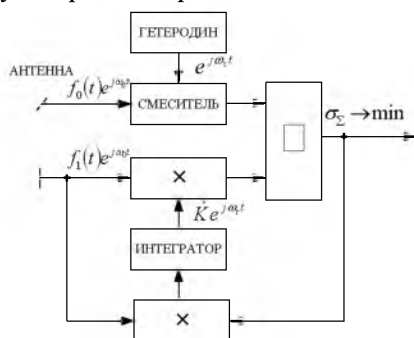


Рисунок 8. – Поляризационный гетеродинный автокомпенсатор

Приемные ДНА основного и дополнительного каналов имеют одинаковую направленность, но отличаются поляризацией. Например, антенна основного луча принимает горизонтальную составляющую $m_r(t)$ эллиптически поляризованного отраженного от цели-помехопостановщика сигнала, приемная антенна дополнительного канала – вертикальную составляющую $m_b(t)$. Как правило, постановщик АШП ставит помеху самоприкрытия круговой поляризации. Следовательно, по основному каналу будет принята горизонтально-поляризованная составляющая АШП $h_r(t)$, по дополнительному каналу – вертикальная $h_b(t)$.

В ПАК АПП вертикально поляризованной составляющей помехи, принятой дополнительным каналом, компенсируется горизонтально поляризованная составляющая помехи в основном канале приема. Таким образом, принятый сигнал основной антенны состоит из смеси горизонтально поляризованных составляющих сигнала и помехи, наблюдаемых на фоне внутреннего шума основного канала $h_0(t)$:

$$f_0(t) = m_t(t) + h_t(t) + h_0(t).$$

Принятый сигнал дополнительной антенны состоит из смеси вертикально поляризованных составляющих сигнала и помехи, наблюдаемых на фоне внутреннего шума дополнительного канала $h_1(t)$:

$$f_1(t) = m_b(t) + h_b(t) + h_1(t).$$

Достоинством ПАК АПП является защита главного лепестка ДНА от маскирующих помех на поляризации, отличной от сигнала, а недостатком – низкая эффективность такой компенсации (4...6 дБ).

Адаптация ПАК к поляризационным параметрам помехи может производиться двумя способами. При первом способе – на участке дальности, на котором прием полезного сигнала не ожидается. После этого значение весового коэффициента «замораживается», оставаясь неизменным в течение всего периода повторения. Это исключает использование ПАК для защиты РЛС от воздействия ИП КП.

При втором способе адаптация производится непрерывно во временном «скользящем окне», размер которого выбирается исходя из условия исключения перестройки ПАК за время, равное длительности сигнала.

Воздействие ИП КП на ПАК отличается от воздействия АПП круговой поляризации. В основном канале помеха принимается кросс-поляризационной ДНА, которая по форме отличается от ДНА дополнительной антенны, работающей по помехе на согласованной с ней поляризации. В дополнительном канале ПАК, ортогонально поляризованном основному, помеха принимается на согласованной поляризации. Это приводит к снижению идентичности каналов ПАК и его эффективности. Но основное отличие заключается в том, что помеха сосредоточена в том же канале дальности (или находится рядом).

Для проверки эффективности ПАК в суммарном канале при воздействии ИП КП было проведено математическое моделирование в среде Mathcad 15. В качестве входного воздействия на основной канал (рисунок 8) была использована аддитивная смесь составляющей полезного сигнала на горизонтальной поляризации $m_t(t)$, ИП КП принимаемой по кросс-поляризационному каналу $m_{в.кп}(t)$ и внутреннего шума $h_0(t)$. Воздействие на дополнительный канал содержало аддитивную смесь составляющей полезного сигнала на вертикальной поляризации $m_b(t)$, ИП КП $m_{в.л}(t)$ принимаемой по согласованному каналу и внутреннего шума $h_1(t)$.

Отраженный сигнал $m(t)$ на входе антенны представлял собой одиночный простой прямоугольный радиоимпульс с эллиптической поляризацией. ИП КП – его задержанная копия большей амплитуды. Внутренний шум приемника – комплексный центрированный нормальный случайный процесс с единичной дисперсией. Уровень кросс-поляризационной ДНА был выбран –20дБ. Отношение сигнал/шум 25 дБ, помеха/шум 40 дБ. Весовой коэффициент ПАК вычислялся в «скользящем окне».

Моделировались две ситуации:

- прохождение через ПАК аддитивной смеси сигнала ($m_t(t)$ или $m_b(t)$) и внутреннего шума ($h_0(t)$ или $h_1(t)$) (рисунок 9, а–в);
- прохождение через ПАК аддитивной смеси сигнала, внутреннего шума и ИП КП ($m_{в.кп}(t)$ или $m_{в.л}(t)$) (рисунок 9, г–е).

На рисунке представлены модули дискретных значений входных и выходных сигналов ПАК. Аддитивная смесь полезного сигнала и внутреннего шума приемника в основном и дополнительном каналах ПАК представлены на рисунке 9, *а* и *б*. Сигнал в дополнительном канале имеет меньшую амплитуду и дополнительный фазовый сдвиг. Результат прохождения сигнала через ПАК представлен на рисунке 9, *в*. Как видно, сигнал прошел через ПАК практически без искажений вследствие того что постоянная времени ПАК гораздо больше длительности сигнала.

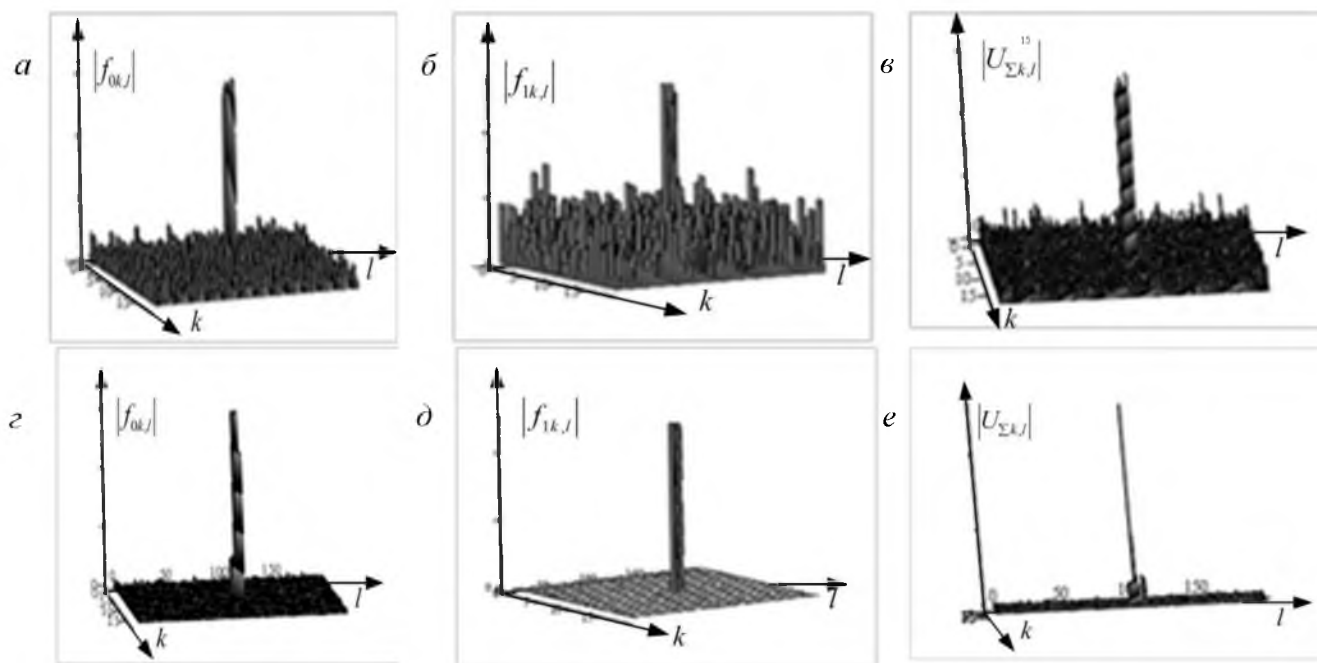


Рисунок 9. – Результаты моделирования прохождения ИП КП через ПАК

Аддитивная смесь полезного сигнала, внутреннего шума приемника и ИП КП в основном и дополнительном каналах ПАК представлены на рисунке 9, *а* и *б*. Мощность ИП КП в дополнительном канале существенно превосходит ее мощность в основном канале ПАК. Выходной сигнал ПАК представлен на рисунке 9, *в*. Из рисунка видно, что ИП КП несколько искажена, но не скомпенсирована, и отраженный сигнал не выделяется на фоне помехи.

Таким образом, ПАК не защищает РЛС от воздействия имитирующих помех вследствие своей инерционности и отсутствия избирательности режима адаптации. Снижение инерционности ПАК за счет уменьшения постоянной времени интегратора приводит к повышению быстродействия ПАК, что сопровождается компенсацией как ИП КП, так и сигнала.

Заключение

Анализ, проведенный в рамках данной статьи, позволяет сделать следующие выводы:

1. Наличие кросс-поляризационной ДНА нарушает функционирование МП при воздействии ОИП КП.
2. В настоящее время защита МП от воздействия ОИП КП ведется по двум направлениям:
 - снижение уровня кросс-поляризации антенной системы РЛС;
 - автоматическая компенсация помех.
3. Снижение кросс-поляризации антенн имеет свой предел, следовательно, моноимпульсные РЛС всегда будут подвержены влиянию помех на кросс-поляризации.

4. Результаты моделирования имеющихся в литературе устройств автоматической компенсации с корреляционными обратными связями показали их неспособность защитить моноимпульсные РЛС от воздействия имитирующих кросс-поляризационных помех вследствие инерционности цепей самонастройки. Уменьшение инерционности приводит к подавлению как ИП КП, так и отраженного от цели сигнала.

5. Использование устройств автокомпенсации с прямым оцениванием матриц, обратных корреляционным, также будет неэффективным вследствие необходимости самонастройки компенсационного канала в скользящем окне, исключающем ИП КП.

6. Автокомпенсаторами ИП КП должны быть охвачены одновременно суммарный и разностные каналы, взаимосвязанные или независимые. Это неизбежно будет приводить к росту ошибок сопровождения цели в обоих случаях.

7. КП ДНА основного канала приема (рисунок 1, б) и ДНА на согласованной поляризации (рисунок 1, а) дополнительного канала приема имеют существенные отличия, что будет являться дополнительной причиной ухудшения автокомпенсации ИП КП.

Список используемых источников

1. Отчет по летным испытаниям по проверке помехозащищенности ГСН 5Г24 и РВ 5Е50 от воздействия поляризационных, перенацеливающих на землю помех и помех групповой защиты. Кн. 3 : Характеристики помех, применявшихся в испытаниях, и анализ особенностей их воздействия. – В/ч 03080, 1979. – 73 с. : ил.

2. Van Brunt, Leroy B. Applied ECM / Leroy B. Van Brunt. – EW Engineering Inc., 1987. – Vol. 1. – 1081 p.

3. Куприянов, А. И. Радиоэлектронная борьба / А. И. Куприянов. – 3-е изд. – М. : Вуз. кн., 2013. – 360 с. : ил.

4. Куприянов, А. И. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / А. И. Куприянов, А. В. Сахаров. – М. : Вуз. кн., 2003. – 528 с. : ил.

5. Перунов, Ю. М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Ю. М. Перунов, К. И. Фомичев, Л. М. Юдин; под ред. Ю. М. Перунова. – М. : Радиотехника, 2003. – 416 с. : ил.

6. Цветнов, В. В. Радиоэлектронная борьба: радиомаскировка и помехозащита : учеб. пособие / В. В. Цветнов, В. П. Демин, А. И. Куприянов. – М. : МАИ, 1999. – 240 с. : ил.

7. Леонов, А. И. Моноимпульсная радиолокация / А. И. Леонов, К. И. Фомичев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1984. – 312 с. : ил.

8. Павлов, А. М. Боевое применение и боевая эффективность ЗРК самонаведения. Боевое применение ЗРК «Бук» / А. М. Павлов. – М. : ВА РБ, 1994. – 53 с. : ил.

9. Драгун, В. Р. Стрельба, боевая работа и управление огнем зенитной ракетной батареи, вооруженной ЗРК 9К33М3 / В. Р. Драгун. – М. : ВА РБ, 2015. – 46 с. : ил.

10. Радиоэлектронные системы : справ. / Я. Д. Ширман [и др.]; под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2008. – 512 с. : ил.

*Сведения об авторах:

Кузьмичев Николай Константинович,

Чигирь Иван Викторович,

Горшков Сергей Анатольевич,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 24.11.2017 г.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПРИБЛИЖЕННОЙ СЕПАРАБИЛИЗАЦИИ МАТРИЧНЫХ СИГНАЛОВ

О. Г. Лапука, доктор технических наук, профессор;
Д. А. Рахоцкий*

Обоснован способ сепарабилизации прямоугольной матрицы, обеспечивающий ее разделение на два векторных сомножителя, тензорное произведение которых максимально приближено к ней в соответствии с критерием минимума среднеквадратического отличия. На важном для практики примере проиллюстрирована возможность применения предложенного решения в качестве способа имитации ложных отметок на двумерном радиолокационном изображении, формируемом бортовой радиолокационной станцией с синтезированием апертуры в режиме переднебокового обзора.

Justified way of separability rectangular matrix, allowing its separation into two vector co-factor, the tensor product which is as close as possible to it in accordance with the criterion of minimum mean-square differences. Important for practice example illustrates the possibility of applying the proposed solutions as a way to simulate about marks on a two-dimensional radar image generated by the onboard radar with a synthetic aperture mode anterolateral review.

Современные тенденции развития средств радиоэлектронного прикрытия наземных объектов от средств воздушной радиолокационной разведки базируются на создании имитирующих помех в режиме групповой защиты как альтернатива «силовым» способам, основанным на маскировании полезных сигналов с использованием высокоэнергетических активных шумовых помех [1, 4]. Необходимость перехода от методов силового подавления к методам имитации ложной тактической обстановки обусловлена высокой помехозащищенностью бортовых радиолокационных станций (БРЛС) обзора земной поверхности [1], характеризуемой радикальным (на несколько десятичных порядков) увеличением длительности интервала наблюдения, на протяжении которого выполняется когерентное накопление принимаемого сигнала в соответствии с принципами синтеза апертуры (СА).

Известные способы формирования имитирующих помех характеризуются их «одномерностью», т. е. возможностью создания ложной целевой обстановки только по одной координате, к примеру вдоль линии дальности. Однако принципиальной особенностью БРЛС с СА является формирование *двумерного* конечного радиолокационного изображения (РЛИ) [2, 3], предусматривающее цифровую обработку принимаемых сигналов по двум координатам (дальность, азимут). В связи с этим значительную актуальность приобретает задача обоснования способов имитации отраженных сигналов с произвольно заданным расположением отметок по обеим координатам на конечном РЛИ БРЛС.

Одной из первых публикаций, в которой обсуждается возможность формирования «двумерных» имитирующих помех для РЛС с СА, является работа [4]. В ней показано, что для создания на конечном радиолокационном изображении устойчивой ложной целевой обстановки с произвольно заданными координатами имитируемых целей необходимо и достаточно использовать независимые способы управления параметрами модуляции ретранслируемого сигнала: использование специальных законов внутримпульсной модуляции обеспечивает управление количеством и расположением отметок вдоль линии дальности, а управляемое изменение фазовой структуры закона модуляции от импульса к импульсу – то же самое, но вдоль линии азимута.

Возможность использования такого отдельного управления – безусловное благо, так как это позволяет технически реализовать автоматическое формирование ложной целевой обстановки практически без каких-либо процедур измерения параметров зондирующих сигналов и соответствующей настройки параметров законов управления. Вместе с тем существенным ограничением данной процедуры является необходимость жесткого

разделения закона управления по двум ортогональным координатам, что на практике не всегда удается реализовать: произвольные двумерные (матричные) сигналы не обязательно являются сепарабельными (разделяемыми на составляющие в виде тензорного произведения векторов).

В связи с этим особый интерес представляет математическая формализация и решение в общем виде задачи *приближенной* сепарабилизации, т. е. нахождения векторов, тензорное произведение которых характеризуется максимальной близостью к произвольно заданной матрице. Решение данной задачи найдем с использованием методов теории анализа и синтеза в классе дискретных конечномерных систем [5].

Постановка задачи. Пусть задана произвольная, в общем случае прямоугольная матрица W размерности $N \times M$. Требуется определить опорные вектора u и v размерностью N и M соответственно, продуктом тензорного произведения которых является матрица, обеспечивающая минимальное (в среднеквадратическом смысле) отличие от матрицы W .

Как показано в [2], формальная математическая процедура формирования сепарабельного матричного сигнала S представляет собой тензорное (без свертки) произведение двух векторов сигналов u и v , которое в векторно-матричных и индексных обозначениях в общем виде записывается следующим образом:

$$S = uv^T = \{s_{ij}\}; u = \{u_i\}; v = \{v_j\}; s_{ij} = u_i v_j; i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}. \quad (1)$$

Формулировка «наилучшее (в среднеквадратическом смысле) приближение к заданной функции» означает, что критерием оптимальности в данном случае является минимум скалярного функционала, характеризующего квадрат евклидовой нормы разности матриц требуемого (в общем случае несепарабельного) и формируемого (всегда сепарабельного) двумерных сигналов. В традиционном векторно-матричном представлении это запишется так:

$$\rho = \|W - S\|^2 = \|W - uv^T\|^2 = \min. \quad (2)$$

Для нахождения аргументов, доставляющих минимум данного функционала, в дальнейшем придется выполнять операции определения его производных по искомым векторам. Поэтому будем использовать индексное представление тензорных объектов, дифференцирование которых по тензорным переменным максимально формализовано [4]. Индексная запись выражения (2):

$$\rho = (w_{ij} - u_i v_j) \delta_{ij}^{kl} (w_{kl} - u_k v_l); i, k = \overline{1, N}; j, l = \overline{1, M}. \quad (3)$$

Здесь δ_{ij}^{kl} – единичный тензор четвертой валентности [5], элементы которого принимают значение 1 при $i = j = k = l$, и значение 0 во всех остальных случаях. Его использование формально обеспечивает суммирование квадратов одноименных элементов матрицы, сформированной как разность матриц W и S .

Раскроем выражение (3). Имеем:

$$\rho = (w_{ij} - u_i v_j) \delta_{ij}^{kl} (w_{kl} - u_k v_l) = w_{ij} \delta_{ij}^{kl} w_{kl} - w_{ij} \delta_{ij}^{kl} u_k v_l - u_i v_j \delta_{ij}^{kl} w_{kl} + u_i v_j \delta_{ij}^{kl} u_k v_l. \quad (4)$$

Особенностью данного выражения является то, что скалярная функция ρ является двухаргументной, т. е. зависит от неизвестных одновалентных тензоров u и v . Вначале продифференцируем данную функцию по одному из аргументов, к примеру по v , а результат приравняем к нулевому вектору. С учетом правил формального дифференцирования тензорных функций по тензорной переменной [5], последовательно упрощая результат, получим:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial p}{\partial v_\alpha} &= \frac{\partial}{\partial v_\alpha} (w_{ij} \delta_{ij}^{kl} w_{kl} - w_{ij} \delta_{ij}^{kl} u_k v_l - u_i v_j \delta_{ij}^{kl} w_{kl} + u_i v_j \delta_{ij}^{kl} u_k v_l) = \\
&= -w_{ij} \delta_{ij}^{kl} u_k \frac{\partial v_l}{\partial v_\alpha} - u_i \delta_{ij}^{kl} w_{kl} \frac{\partial v_j}{\partial v_\alpha} + u_i \delta_{ij}^{kl} u_k \frac{\partial (v_j v_l)}{\partial v_\alpha} = \\
&= -w_{ij} \delta_{ij}^{kl} u_k \delta_\alpha^l - u_i \delta_{ij}^{kl} w_{kl} \delta_\alpha^j + u_i \delta_{ij}^{kl} u_k \left(\frac{\partial v_j}{\partial v_\alpha} v_l + \frac{\partial v_l}{\partial v_\alpha} v_j \right) = \\
&= -w_{ij} \delta_{ij}^{kl} u_k \delta_\alpha^l - u_i \delta_{ij}^{kl} w_{kl} \delta_\alpha^j + u_i \delta_{ij}^{kl} u_k v_l \delta_\alpha^j + u_i \delta_{ij}^{kl} u_k v_j \delta_\alpha^l = \\
&= -w_{ij} \delta_{ij}^{k\alpha} u_k - u_i \delta_{i\alpha}^{kl} w_{kl} + u_i \delta_{i\alpha}^{kl} u_k v_l + u_i \delta_{ij}^{k\alpha} u_k v_j = \\
&= -w_{k\alpha} u_k - u_i w_{i\alpha} + u_i \delta_i^k u_k \delta_\alpha^l v_l + u_i \delta_i^k u_k \delta_j^\alpha v_j = \\
&= -w_{k\alpha} u_k - u_i w_{i\alpha} + 2v_\alpha u_i \delta_i^k u_k = \emptyset.
\end{aligned} \tag{5}$$

В данном выражении символом \emptyset обозначен нулевой вектор, а символом δ_i^k – символ Кронекера (единичный тензор второй валентности, элементы которого принимают значение 1 при $i = k$ и значение 0 во всех остальных случаях).

Проанализировав выражение (5), можно заметить некоторые важные свойства полученного результата:

первые два отрицательных слагаемых, характеризующих произведение матрицы W размерности $N \times M$ и вектора u размерности N , по сути тождественно равны, хотя при их записи были использованы разные индексные переменные;

скаляр $u_i \delta_i^k u_k$, являющийся коэффициентом при тензоре v_α , представляет собой квадрат евклидовой нормы вектора u [5].

С учетом данных замечаний, выразив из формулы (5) искомый тензор v_α , запишем индексную и векторно-матричную форму конечного предельно лаконичного результата:

$$v_\alpha = \frac{w_{i\alpha} u_k}{u_i \delta_i^k u_k}; \quad v = \frac{W^T u}{\|u\|^2}. \tag{6}$$

Как и следовало ожидать, искомый вектор определяется не только исходной сепарабилизируемой матрицей W , но и неизвестным (пока) вектором u . Это не позволяет характеризовать выражение (6) как окончательный результат процедуры сепарабилизации.

Проведем операцию дифференцирования скалярного функционала (2) по второму искомому векторному аргументу и приравняем результат к нулевому вектору. Имеем:

$$\frac{\partial p}{\partial u_\beta} = \frac{\partial}{\partial u_\beta} (w_{ij} \delta_{ij}^{kl} w_{kl} - w_{ij} \delta_{ij}^{kl} u_k v_l - u_i v_j \delta_{ij}^{kl} w_{kl} + u_i v_j \delta_{ij}^{kl} u_k v_l) = \emptyset. \tag{7}$$

Математическая процедура нахождения вектора u в данном случае является аналогичной приведенной выше, поэтому сразу запишем конечный результат в индексном и векторно-матричном виде:

$$u_\beta = \frac{w_{\beta l} v_l}{v_j \delta_j^l v_l}; \quad u = \frac{W^T v}{\|v\|^2}. \tag{8}$$

Полученное выражение определяется сепарабилизируемой матрицей и вторым неизвестным вектором.

Итак, по отдельности полученные выражения (6) и (8) не позволяют однозначно определить вид искомым векторов, тензорное произведение которых составляет требуемую «сепарабельную аппроксимацию» исходной, в общем случае несепарабельной матрицы. Для преодоления данной проблемы используем численную итерационную процедуру последовательного приближения, которая заключается в следующем:

1. Один из векторов, к примеру вектор u , задаем произвольно. Единственным ограничением в данном случае является неравенство нулю его евклидовой нормы, что в соответствии с выражением (6) недопустимо. Данное требование фактически означает, что хотя бы один из элементов вектора должен быть ненулевым.

2. Подставляем полученную реализацию вектора u в выражение (6). Это позволяет численно сформировать первое приближение искомого вектора v .

3. Контролируем значение скалярного функционала качества ρ : если оно равно нулю, прекращаем процедуру и используем векторы u и v в качестве результатов сепарабилизации. В противном случае используем полученное приближение вектора v , подставив его в формулу (8), для формирования приближения вектора u .

4. Контролируем значение скалярного функционала качества ρ : если оно равно нулю, прекращаем процедуру и используем текущие значения векторов u и v в качестве результатов сепарабилизации. В противном случае используем полученное приближение вектора u , подставив его в формулу (6), для формирования очередного приближения вектора v .

Поочередно повторяя пункты 3 и 4, последовательно приближаемся к конечному результату. Итерационную процедуру окончательно останавливаем в случае, если дальнейшее уменьшение функционала качества является незначительным.

Отметим важные свойства, характеризующие полученный результат.

Во-первых, равенство нулю скалярного показателя ρ качества приближения, сформированного на любом из шагов, однозначно характеризует исходную матрицу W как изначально сепарабельную, т. е. представляемую в виде тензорного произведения векторов. Это логично: евклидова норма разности матриц равна нулю тогда и только тогда, когда эти матрицы тождественно равны между собой. При этом ценность самой процедуры сепарабилизации нисколько не уменьшается, так как задача разделения матрицы на векторные сомножители в любом случае является нетривиальной.

Во-вторых, оказалось, что вне зависимости от выбора исходного значения вектора u (первый шаг процедуры сепарабилизации) уже на второй итерации формируется окончательное значение искомого вектора v , а на третьей – окончательное значение искомого вектора u . Дальнейшие шаги бессмысленны, так как они не приводят к изменению данных векторов, и, соответственно, к уменьшению функционала качества приближения. Это значит, что произвольный выбор начального значения вектора u никак не влияет на конечный результат и продолжительность (количество шагов) итерационной процедуры сепарабилизации.

Рассмотрим результаты *приближенной* матричной сепарабилизации применительно к задаче формирования «двумерной» имитирующей помехи. В качестве исходной матрицы примем двумерный сигнал, принятый БРЛС передне-бокового обзора в режиме доплеровского облучения луча (при наблюдении *точечного* отражателя), смещенного от центра кадра РЛИ по двум координатам. Условия наблюдения: скорость полета носителя 200 м/с, угол наблюдения в горизонтальной плоскости 35° , дальность наблюдения 20 км, длительность зондирующего импульса 10 мкс.

Вид первичного двумерного радиолокационного сигнала, сформированного при картографировании участка местности с расположенным на ней точечным отражателем, представлен на рисунке 1 (изображение слева). Данная матрица характеризуется наличием изогнутых интерференционных полос, наличие и форма которых обусловлены когерентным суммированием отраженных сигналов по каждому зондирующему импульсу в процессе движения носителя на интервале синтезирования антенной апертуры.

Решаемая прикладная задача характеризуется необходимостью формирования максимально приближенного изображения за счет воздействия помех из точки, расположенной в центре кадра радиолокационного наблюдения. Данная задача решается за счет выполнения процедуры сепарабилизации исходной сигнальной матрицы и использования полученных векторов-сомножителей в качестве эталонов для управления параметрами имитирующих помех в двух плоскостях.

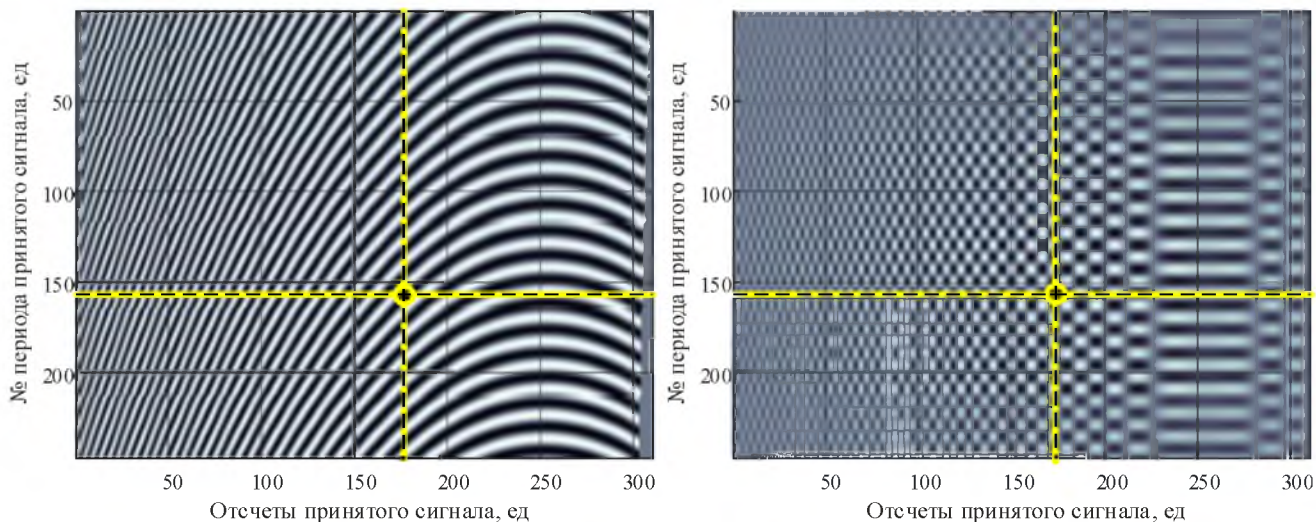


Рисунок 1. – Исходный (слева) и сепарабилизированный (справа) двумерные сигналы РЛС с СА при наблюдении точечного радиолокационного отражателя (точкой обозначен центр анализируемых сечений сепарабельного сигнала)

Вид сепарабельной матрицы, сформированной в результате выполнения процедуры сепарабилизации, представлен на рисунке 1 (изображение справа). Визуальное сравнение левого и правого изображений позволяет отметить вполне приемлемое соответствие между ними: количество, расположение и форма интерференционных полос практически сохраняются. Вместе с тем проявляется их некоторая изрезанность, обусловленная ошибкой сепарабилизации.

Представляет значительный интерес сравнительный анализ векторов – результатов сепарабилизации с векторами сечений исходной матрицы (рисунок 1). Вид данных векторов представлен на рисунке 2. По рисунку видно, что сравниваемые сигналы достаточно близки. Некоторое отличие проявляется в отклонении формы огибающей сигнальных векторов – результатов сепарабилизации от прямоугольной, характерной для огибающих в сечениях исходного двумерного сигнала.

О количественной мере несоответствия между исходным (несепарабельным) и конечным (сепарабельным) изображениями можно судить по значению использования в ходе процедуры сепарабилизации функционала качества приближения ρ (см. формулу (2)). Для обеспечения независимости результата от вида исходного двумерного изображения он должен быть пронормирован к квадрату евклидовой нормы матрицы W . «Естественным» показателем степени соответствия исходного и конечного изображений (качества сепарабилизации) является скалярный коэффициент $K_c = 1 - \rho / \|W\|^2$. В рассмотренном примере он равен $\approx 0,91$, что говорит о достаточно высокой степени приближения.

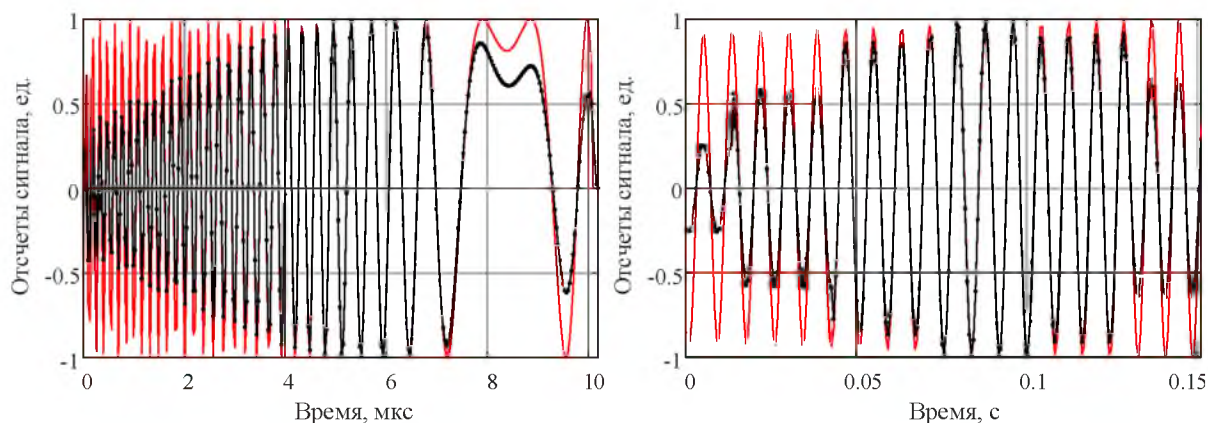


Рисунок 2. – Временные реализации исходного (без пометок) и сепарализированного (график помечен точками) двумерных сигналов в азимутальном (слева) и дальностном (справа) сечениях

Наконец, с учетом характера решаемой прикладной задачи (имитация ложной отметки на конечном радиолокационном изображении) наиболее важная информация может быть получена только после выполнения процедуры цифровой обработки исходных изображений в соответствии с принципами синтеза антенной апертуры [6]. Окончательные результаты обработки в виде конечного радиолокационного изображения представлены на рисунке 3.

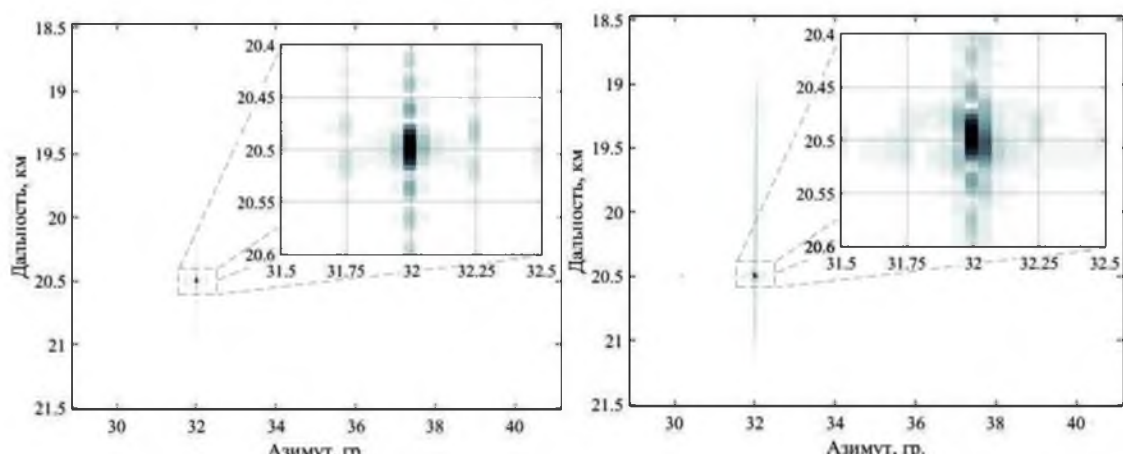


Рисунок 3. – Конечные радиолокационные изображения, сформированные из исходного (слева) и сепарализированного (справа) двумерных сигналов

Анализ данных изображений позволяет охарактеризовать их как достаточно близкие (похожие). Отличия проявляются в двух аспектах. Во-первых, в азимутальной плоскости несколько расширяется сформированная отметка, что соответствует незначительному ухудшению разрешающей способности БРЛС с СА по азимуту. Во-вторых, увеличивается уровень боковых лепестков функции отклика, что проявляется в возникновении вертикальных линий в месте расположения имитируемой цели. Данные отличия обусловлены неполной согласованностью сепарабельного двумерного сигнала с исходным эталоном и, как следствие, неоптимальностью процедуры его цифровой обработки в приемнике БРЛС с СА.

Подводя краткие итоги проведенного исследования, отметим наиболее важные полученные результаты.

1. Математически формализованы исходные условия и критерий задачи приближенной сепарализации произвольной прямоугольной матрицы. С использованием математического аппарата дифференцирования тензорных функций получены аналитические выражения, характеризующие зависимости векторов-сомножителей тензорного произведения от вида исходной сепарализируемой матрицы. Показано, что данные

зависимости являются трансцендентными, т. е. не позволяют явно выразить конечный результат.

2. Обоснована итерационная процедура, обеспечивающая последовательное приближение результата сепарабилизации к конечному виду. Показано, что при произвольном выборе начального приближения искомого вектора продолжительность (количество шагов) итерационной процедуры сепарабилизации составляет не более трех.

3. Проиллюстрировано использование процедуры сепарабилизации для формирования имитирующей помехи, создающей на конечном радиолокационном изображении одиночную ложную отметку с заданными координатами. Проанализированы качественные и количественные признаки, характеризующие соответствие эталонного и сформированного на основе предложенной процедуры двумерных изображений.

В заключение отметим одно из важных достоинств полученного результата. Речь идет о формализации и решении задачи сепарабилизации *в общем виде*, т. е. без привязки к конкретному типу зондирующих сигналов, без каких-либо допущений и упрощений (математически строго). Применительно к тематике радиолокационного прикрытия наземных объектов это, конечно, не значит, что с использованием сформированных на основе процедуры матричной сепарабилизации имитирующих помех могут быть идеально сформированы *произвольно заданные* изображения, что, по крайней мере, не физично. Однако максимальное (потенциально достижимое) приближение может быть реализовано. Полученный теоретический результат открывает новые возможности по формированию высокоподобных имитирующих помех в целях радиолокационного прикрытия наземных объектов от РЛС обзора земной поверхности, использующих принципы синтеза антенной апертуры.

Список использованных источников

1. Лапука, О. Г. Анализ технических характеристик радиолокационных станций обзора земной поверхности как объектов радиоэлектронного подавления / О. Г. Лапука, А. А. Ростов, Д. А. Рахоцкий // Вестн. ВА РБ. – Минск, 2016. – Вып. 2 (51). – С. 102–113.

2. Лапука, О. Г. Математическая формализация процедуры дискретной конечномерной фильтрации двумерных сепарабельных сигналов / О. Г. Лапука, А. А. Ростов // Вестн. ВА РБ. – Минск, 2015. – Вып. 2 (47). – С. 116–122.

3. Кондратенков, Г. С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли : учеб. пособие для вузов / Г. С. Кондратенков, А. Ю. Фролов; под ред. Г. С. Кондратенкова. – М. : Радиотехника, 2005. – 368 с.

4. Лапука, О. Г. Способ управления пространственным положением имитируемой цели для бортовых радиолокационных станций, работающих в режиме переднебокового обзора / О. Г. Лапука, А. А. Ростов, Д. А. Рахоцкий // Вестн. ВА РБ. – Минск, 2017. – Вып. 2 (55). С. 63–71.

5. Лапука, О. Г. Анализ и синтез в классе дискретных конечномерных систем : моногр. / О. Г. Лапука, К. К. Пашенко. – Минск: ВА РБ, 2010. – 372 с

6. Справочник по радиолокации : в 2 кн. / под ред. М. И. Сколника; пер с англ. ; под общ. ред. В. С. Вербы. – М. : Техносфера, 2014. – Кн. 1. – 672 с.

*Сведения об авторах:

Лапука Олег Георгиевич,

Рахоцкий Дмитрий Александрович,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 06.02.2018 г.

УДК 629.7.054

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ КАК ЭТАПА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ

Д. А. Сахарук, кандидат технических наук;
В. П. Шабанов, кандидат технических наук;
В. В. Шаболтиев*

В статье рассматривается проблематика обоснования технического облика образцов вооружения и военной техники на стадии внешнего проектирования, являющегося одним из основополагающих этапов их жизненного цикла. В рамках этого этапа определяется функционально-технический замысел и концепция комплекса, формируется его технический облик. Результатом работы на этапе внешнего проектирования является тактико-техническое задание на опытно-конструкторскую работу, учитывающее влияние различных негативных факторов как технических, так и финансовых, и позволяющее в значительной степени сократить время от начала разработки комплекса до принятия его на вооружение.

The article deals with the problem of substantiating the technical appearance of arming and military equipment at the stage of external design, which is one of the fundamental stages of their life cycle. Within the framework of this stage, the functional and technical conception and concept of the complex are substantiated, and its technical shape is formed. The result of the work at the stage of external design is a tactical and technical task for development work, taking into account the influence of various negative factors, both technical and financial, and allowing to significantly reduce the time from the beginning of complex development to its adoption into service.

Достижение практической цели исследования (разработки) образца вооружения, военной и специальной техники (далее – ВВСТ) в общем виде можно представить как преобразование, на входе которого имеются ресурсы, трансформируемые в результате реализации процесса (достижения практической цели) в доход и прибыль. Такой подход присущ для систем неантагонистического характера гражданского назначения. Системы военного назначения, являющиеся антагонистическими, обладают рядом специфических особенностей, не присущих системам гражданского назначения, которые предъявляют определенные требования к методологии исследования систем военного назначения. Одной из таких особенностей следует считать решение поставленных задач в условиях преодоления организованного противодействия «разумного» противника, что обуславливает необходимость учета данного фактора задолго до создания образца, а именно на стадии жизненного цикла изделия, называемого **внешнее проектирование**. В связи с современными реалиями, а также инновационной направленностью проводимых исследований, на первое место при создании изделия ВВСТ выходит поиск баланса между тактико-техническими показателями разрабатываемого образца и его технико-экономическими характеристиками. В настоящей статье рассматриваются особенности одного из этапов жизненного цикла ВВСТ – этапа внешнего проектирования беспилотных авиационных комплексов (далее – БАК).

Под БАК понимается совокупность функционально связанных и используемых совместно беспилотных летательных аппаратов, средств дистанционного управления, обеспечения взлета (посадки), технической эксплуатации, обеспечивающих выполнение возложенных на комплекс боевых и специальных задач.

Технический облик БАК определяет совокупность количественных и качественных показателей (характеристик, параметров, свойств), устанавливающих конструктивно-аэродинамическую схему беспилотного летательного аппарата, параметры его силовой установки, состав и характеристики бортового радиоэлектронного оборудования, вооружения и обеспечивающих реализацию заданных тактико-технических требований.

Под методологией проектирования (при решении практических задач формирования технического облика БАК) понимается совокупность положений, определяющих содержание исследований, последовательность и методы их проведения.

Жизненный цикл изделия военной техники, и БАК в частности, как сложной технической системы с учетом требований, изложенных в [1], включает следующие этапы:

Внешнее проектирование:

обоснование разработки БАК;

разработка тактико-технического задания (далее – ТТЗ) на опытно-конструкторскую работу (далее – ОКР).

Внутреннее проектирование:

проведение ОКР;

производство и испытание образца военной техники (БАК).

Эксплуатация (целевое применение):

использование по назначению;

модернизация.

Утилизация:

ликвидация;

переработка отходов.

Рассматривая внешнее проектирование как этап жизненного цикла БАК, необходимо отметить, что в рамках этого этапа обосновываются функционально-технический замысел и концепция комплекса, исследуется эффективность БАК и его интеграция в систему вооружений вооруженных сил государства с учетом прогноза условий будущего боевого применения. При этом методическим аппаратом внешнего проектирования БАК являются теория исследования операций, системный анализ, теория сложных технических систем, а основным инструментом – математическое моделирование. Таким образом, в соответствии с принятой общей методологической схемой (рисунок 1) **процесс внешнего проектирования БАК представляет** собой сложную композицию многоуровневых процедур информационного обмена и принятия решений, выполняемых различными коллективами и кооперациями, в результате которых устанавливается порядок проведения и содержание научных исследований [2, 3].

Выделяют три основных этапа проведения внешнего проектирования:

этап концептуальных исследований. Целью данного этапа является формирование концепции исследуемого БАК на основе системной увязки потребностей вооруженных сил государства (Заказчика) с научно-техническими и производственно-экономическими возможностями Исполнителя;

этап обликковых исследований. Целью данного этапа является формирование технического облика БАК, обеспечивающего реализацию заданных тактико-технических требований, предъявляемых к исследуемому БАК;

этап оценки реализуемости концепции. Целью данного этапа является уточнение отдельных тактико-технических характеристик (далее – ТТХ) исследуемого БАК, полученных на этапе проведения обликковых исследований, с учетом производственно-технологических и финансово-экономических возможностей Исполнителя, и определение значений конструктивных параметров, обеспечивающих удовлетворение требований к ТТХ БАК заданной концепции.

Обоснование концепции БАК. В соответствии с методологией внешнего проектирования концепция БАК определяется как основная идея создания и боевого применения БАК в целях решения определенных задач. Концептуальные исследования направлены прежде всего на поиск путей разрешения выявленных противоречий между оперативно-тактическими потребностями, необходимыми для решения актуальных боевых задач, и возможностями образцов ВВСТ, применяемых в настоящее время для решения этих задач, и, как следствие, на ликвидацию образовавшегося дефицита боевых возможностей

вооруженных сил. Невозможность разрешения такого противоречия при помощи модернизации существующих образцов ВВСТ определяет мотивацию разработки образцов нового поколения, в частности, БАК.

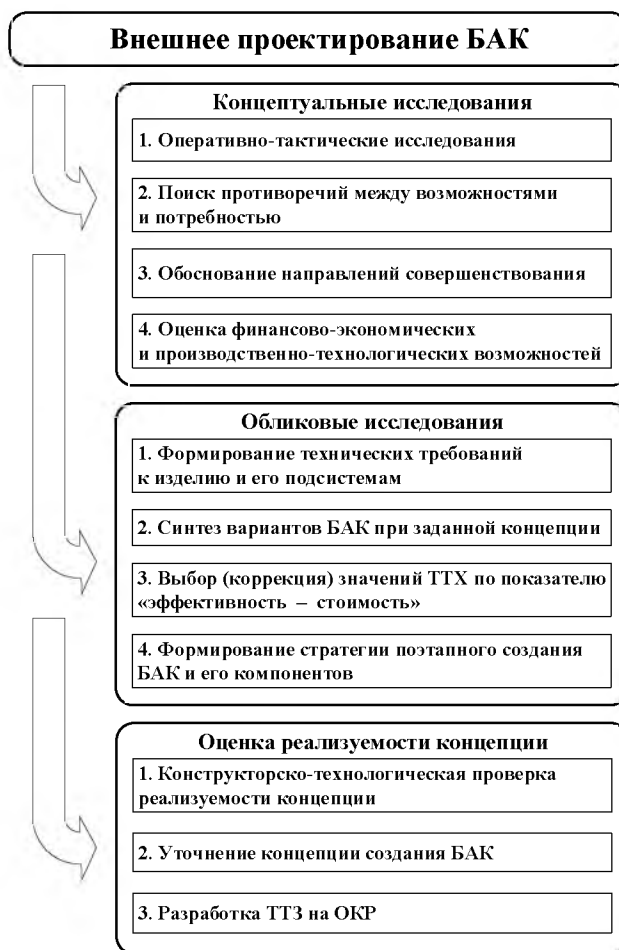


Рисунок 1. – Общая методологическая схема этапа внешнего проектирования БАК

Основными задачами концептуального исследования БАК являются [2]:

оценка оперативно-тактических потребностей командиров подразделений, применяющих БАК: глубина и объекты действий, условия боевого применения (погодные, климатические, временные факторы, противодействие противника и т. д.), условия обеспечения боевых действий внешними системами (радиотехническая система ближней навигации, радиотехническая система дальней навигации, спутниковая радионавигационная система, автоматизированная система управления). Основу концептуальных исследований БАК составляют: анализ прогнозируемых военно-политических ситуаций будущего, политика государства и его военная доктрина, прогноз развития ВВТ эвентуального противника и анализ боевых возможностей ВВТ собственных вооруженных сил (оперативно-тактическая сторона концепции);

поиск противоречий между оперативно-тактическими возможностями имеющихся образцов БАК и потребностями командиров в боевых свойствах БАК для выполнения актуальных боевых задач;

обоснование основных направлений совершенствования БАК в интересах ликвидации выявленного в процессе оперативно-тактических исследований дефицита боевых возможностей;

оценка финансово-экономических и производственно-технологических возможностей создания БАК и бортового оборудования беспилотного летательного аппарата, обоснование производственной кооперации, изучение экспортного потенциала проектируемого БАК

и уточнение технического облика его экспортных вариантов, изучение инвестиционной привлекательности проекта, что и будет определять производственно-экономическую сторону концепции.

Обликовые исследования. Основной задачей данного этапа исследований является формирование рациональных тактико-технических характеристик БАК в целом и его подсистем в интересах наращивания боевых свойств, дефицит которых был выявлен на этапе концептуальных исследований. На данном этапе используются различные методические схемы решения задачи. Их суть сводится, как правило, к синтезу вариантов технического облика БАК при заданных оперативно-тактических требованиях, значениях летно-технических характеристик и комплексах оборудования и вооружения, оптимизированных по частным критериям, а также оценке эффективности и стоимости получившихся технических обликов БАК. Выбор конкретного варианта постановки задачи на исследование по обоснованию рациональных ТТХ, используемых показателей и критериев, накладываемых ограничений производится с учетом особенностей решаемых комплексом задач.

Завершают обоснование ТТХ БАК исследования по обоснованию рациональной стратегии поэтапного создания БАК, включающие определение очередности доведения подсистем БАК до уровня требований тактико-технического задания, сроков завершения этапов и оптимизацию распределения выделяемых средств и ресурсов по этапам ОКР.

Оценка реализуемости концепции. На данном этапе проводится исследование возможности практической реализации результатов, полученных на первых двух этапах. Его основу составляет проверка реализуемости концепции БАК с учетом реальных технических и технологических возможностей предприятий промышленности. По ее результатам производится уточнение (при необходимости) ТТХ, прежде всего ее научно-технической и производственно-экономической сторон. С учетом результатов предварительного проектирования выполняются исследования по обоснованию требований, задаваемых в проекте ТТЗ на ОКР.

Таким образом, целью и завершающим этапом стадии внешнего проектирования является получение следующей выходной информации:

концепции БАК, содержащей генеральную идею создания и боевого применения образца вооружения, формируемой на основе оперативно-тактического прогноза и ожидаемых технических достижений на рассматриваемую перспективу [2, 4];

рационального (т. е. наиболее приемлемого в рамках принятых условий и ограничений) технического облика БАК, сформулированного в проекте тактико-технического задания на ОКР.

Реализацию принятых (заданных) тактико-технических требований проводят на следующей стадии жизненного цикла изделия – этапе **внутреннего проектирования** (выполнения ОКР).

В реальной практике чаще всего приходится сталкиваться с определенными ограничениями при переходе на этап внутреннего проектирования. Одним из таких ограничений является недостаточность средств, выделяемых на создание конкретного изделия БАК. Это ограничение носит весьма нечеткий характер и влечет за собой еще одну проблему – необходимость корректировки проекта ТТЗ на ОКР на стадии его утверждения. И если недостаточность средств приводит к корректированию конкретных сроков выполнения или невыполнения ОКР, то внесение изменений в проект ТТЗ на стадии его утверждения носит чаще всего бессистемный характер. При этом самые незначительные, на взгляд согласующих и утверждающих организаций, изменения без соответствующих тактико-технико-экономических оценок ставят под сомнение возможность и целесообразность выполнения проекта целиком, а также его соответствие принятой концепции.

Негативные последствия влияния корректировки проекта ТТЗ на ОКР на стадии утверждения возможно исключить только с помощью проведения обязательной военно-научной экспертизы предполагаемых изменений.

В целях компенсации влияния неопределенности прогноза выделения финансовых средств возможно использование нескольких специальных подходов. При этом в качестве факторов, позволяющих получить приемлемое решение задачи обоснования технического облика БАК, используются следующие дополнительные условия:

заранее определить условия переноса сроков окончания ОКР на более отдаленную перспективу;

предусмотреть условия поэтапной разработки изделия, предполагающие доведение его технического облика до уровня требований заказчика, в зависимости от располагаемых средств.

Выбор в качестве решающего того или иного подхода определяется конкретным положением, складывающимся на более высоком уровне иерархии исследований – на уровне системы вооружения.

Таким образом, использование обозначенных подходов позволяет ускорить процесс принятия разрабатываемого БАК на вооружение. Поэтапная разработка БАК предполагает, что на образцах начальных этапов реализуются только те технические решения, которые в наибольшей степени отработаны и требуют меньших финансовых вложений. В этом случае обеспечивается более раннее поступление «БАК 1-го этапа» потребителям, что позволяет начать его освоение. Методология внешнего проектирования при этом должна включать в себя обоснование рационального разделения работ на этапы, предполагающие последовательное доведение БАК до уровня требований Заказчика. В условиях, когда реальное финансирование в значительной мере отличается от прогнозируемого, такой подход к обоснованию технического облика БАК представляется наиболее приемлемым. В противном случае, в условиях нестабильности финансирования, разработка БАК может оказаться вообще невозможной, превратившись в череду уточнений требований к БАК в соответствии с выделенными ассигнованиями, при этом сроки выполнения работ будут сдвигаться сами по себе, независимо от предпринимаемых действий, если только эти действия не направлены на поиск недостающих инвестиций.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что проектирование – многоступенчатый итерационный процесс с возрастающей детализацией и точностью проработок, связанный с получением достоверной и полной информации, который позволяет принимать решения на основе оптимальных компромиссов с минимальным техническим и экономическим риском. Естественно, что создание современного БАК требует не только применения современной методологии проектирования, но и привлечения к коллективной разработке проекта большого числа высококвалифицированных специалистов.

Список использованных источников

1. Военная техника. Военно-научное сопровождение на стадиях жизненного цикла изделий : СТБ В 15.003-2008. – Минск : Госстандарт, 2008. – 11 с.
2. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е. А. Федосова. – М. : Дрофа, 2005.
3. Барковский В. И. Методология формирования технического облика экспортно-ориентированных авиационных комплексов / В. И. Барковский, Г. М. Скопец, В. Д. Степанов. – М. : Физматлит, 2008.
4. Платунов В. С. Методология системных военно-научных исследований авиационных комплексов / В. С. Платунов. – М. : Дельта, 2005.
5. Мышкин Л. М. Прогнозирование развития авиационной техники : теория и практика. – 2-е изд., испр., доп. – М. : Физматлит, 2008. – 328 с.

*Сведения об авторах:

Сахарук Дмитрий Александрович,

Шабанов Виктор Павлович,

Шаболтиев Вячеслав Викторович,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 12.10.2018 г.

МИНИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ КОММУТАЦИЕЙ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

С. Т. Сидоренко, кандидат технических наук;
В. В. Кудерко*

В статье представлено решение задачи минимизации эффективной площади рассеяния логопериодической антенны коммутацией ее элементов. Приведены результаты расчетов параметров антенны. Проиллюстрированы зависимости максимальных и полных значений эффективной площади рассеяния от частоты при различных углах облучения антенны. Проведен сравнительный анализ антенн полной и оптимальной комплектации.

The solution of the problem of minimizing the effective scattering area of the log-periodic antenna by switching its elements is presented. The results of antenna parameters calculations are presented. The dependences of the maximum and total values of the effective scattering area on the frequency for different antenna irradiation angles are illustrated. A comparative analysis of the antennas of complete and optimal equipment is carried out.

Введение

Задача уменьшения эффективной площади рассеяния (ЭПР) является противоречивой и сложной. Вследствие прямо пропорциональной зависимости коэффициента направленного действия (КНД) и ЭПР антенн уменьшение радиолокационной заметности одних приводит к ухудшению характеристик усиления антенных устройств, поэтому предлагается процедура оптимизации по критерию КНД/ЭПР.

Наиболее полно направления и перспективы создания малозаметных антенных систем предполагают ряд мероприятий технического характера по уменьшению ЭПР антенн и включают:

сокращение общего числа антенн, находящихся в составе радиотехнических комплексов (РТК), путем их унификации совместного использования для устройств, работающих в близких участках диапазона частот;

разработку методов и средств уменьшения ЭПР антенн методами изменения конструкции антенн и окружающих ее элементов, нанесения поглощающих покрытий, улучшения согласования антенных трактов.

Практическая реализация мероприятий с применением радиопоглощающих материалов и покрытий для снижения радиолокационной заметности антенн во многих случаях затруднена, поскольку такие покрытия, нанесенные на антенну, нарушают нормальное функционирование антенны в ее рабочем диапазоне длин волн [1]. Поэтому перспективные способы и средства уменьшения ЭПР можно условно разделить на три основные группы.

Первая группа основана на экранировании антенны частотно-поляризационно-селективными структурами с неизменяемыми во времени параметрами или нанесении этих структур на участки антенн. Такие структуры прозрачны или отражают, как металл, на рабочих частотах или поляризациях антенны и не прозрачны или сильно поглощают на всех других частотах и поляризациях. Упомянутые структуры могут быть выполнены на базе плоскостойких сред с неизменяемыми параметрами, состоящих из прилегающих друг к другу слоев радиопрозрачного диэлектрического материала.

Вторая группа искусственно ухудшает характеристики антенн в нерабочие промежутки времени путем изменения свойств прохождения или отражения электромагнитной волны за счет прикрытия антенн электрически управляемыми во времени

средами или дистанционно управляемыми металлическими экранами. В рабочие промежутки времени антенные характеристики восстанавливаются.

Третья группа миниатюризирует антенны при сохранении основных рабочих характеристик. В результате за счет уменьшения габаритных размеров антенн мощность вторичного излучения существенно падает.

Рассеивающие свойства логопериодической антенны, которые являются одной из важнейших характеристик, рассмотрены во взаимосвязи с общепринятыми в теории характеристиками и параметрами: КНД, диаграммой направленности (ДН), входным сопротивлением, коэффициентом отражения от нагрузки и особенностями конструктивного исполнения. Численные результаты получены на основе методов интегральных уравнений (ИУ) и S -матрицы. Показано, что ЭПР антенны определяют в настоящее время потенциально достижимый уровень снижения радиолокационной заметности РТК. Поэтому необходима переоценка качеств применяемых антенн по такому параметру, как уровень их вклада в суммарную ЭПР РТК.

Анализ рассеивающих свойств логопериодической антенны

Обобщенным результатом первоначальных исследований ЭПР антенн методами электродинамического моделирования применительно к антеннам простой геометрической формы является простая аналитическая модель для расчета максимального значения ЭПР антенны [2]:

$$\sigma_s = 4\pi A_{\text{эф}}^2 / \lambda^2 = A_{\text{эф}} D_a = D_a^2 \lambda^2 / (4\pi),$$

где $A_{\text{эф}}$ – эффективная площадь антенны; λ – длина волны; D_a – коэффициент направленного действия (КНД) антенны.

На основе результатов расчетов и результатов численного моделирования в программе MMANA [5] проведен анализ рассеивающих свойств логопериодической антенны в пределах рабочего диапазона (при $\varphi_i = 0$, $\theta_i = \pi/4$). В таблице 1 приведены зависимости параметров антенны от частоты.

Таблица 1

f , МГц	$R_{\text{вх}}$, Ом	$X_{\text{вх}}$, Ом	G , дБ	F/B , дБ	$A_{\text{эф}}/\lambda^2$	$\sigma_{S\text{min}}/\lambda^2$	σ_s/λ^2	$\sigma_s/\sigma_{S\text{min}}$, %
60,36	86,504	0,024	5,92	8,23	0,312	0,112	0,112	100
68,8	111,52	- 0,1	6,29	9,8	0,338	0,125	0,136	108,29
82	114,73	0,575	6,54	10,89	0,358	0,136	0,167	122,9
89	67,16	- 0,444	6,61	11,84	0,364	0,145	0,199	137
98,3	98,446	0,001	6,49	11,7	0,354	0,145	0,251	173

Анализ результатов расчетов показывает, что при увеличении частоты от 60,36 до 98,3 МГц КНД антенны возрастает на 0,75 (от 5,92 до 6,49 дБ, или от 3,9 до 4,46 раз), коэффициент защитного действия (КЗД) (F/B) изменяется в пределах от 8,23 до 11,84. Отношение эффективной площади антенны к квадрату длины волны $A_{\text{эф}}/\lambda^2$ при этом возрастает от 0,312 до 0,354, минимальное значение ЭПР к квадрату длины волны $\sigma_{S\text{min}}/\lambda^2$ возрастает от 0,112 до 0,145 (на 29,5 %). Отношение σ_s/λ^2 возрастает с 0,112 (равное $\sigma_{S\text{min}}/\lambda^2$ при $f = 60,36$ МГц) до 0,251. Отношение $\sigma_s/\sigma_{S\text{min}}$, %, возрастает от 100 до 173 %, подтверждая тот факт, что антенны с одинаковыми ДН могут иметь разные рассеивающие свойства. На всех исследованных частотах антенна является минимально рассеивающей.

На минимальной частоте рабочего диапазона $f = 60,36$ МГц ее поле рассеяния совпадает с предельно достижимым минимальным полем рассеяния. С ростом частоты поле рассеяния логопериодической антенны приближается к полю рассеяния минимально рассеивающей антенны (МРА) в режиме максимального рассеяния [3].

Различия в рассеивающих свойствах логопериодической антенны на различных частотах объясняются увеличением вклада в формирование рассеянного поля элементов, не участвующих в формировании ДН, что приводит к появлению *модовой* составляющей [4].

Из сравнения рассеивающих свойств логопериодической антенны, вычисленных методом ИУ, и предельно достижимого минимального поля, вычисленного методом S-матрицы, следует:

- логопериодическая антенна является минимально рассеивающей;
- ее поле рассеяния полностью выражается через ДН;
- с ростом частоты полная ЭПР изменяется от предельно достижимого минимального поля рассеяния до предельно достижимого максимального поля рассеяния минимально рассеивающей антенны.

Снижение эффективной площади рассеяния исключением вибраторов, не участвующих в формировании диаграммы направленности

Как известно, в логопериодических антеннах, как и во всех вибраторных, на определенных частотах работают разные элементы конструкции антенны. С помощью программы MMANA определялись элементы конструкции антенны с наименьшим распределением тока. На низких частотах работают большие элементы конструкции (вибраторы 1 и 2), расположенные в начале антенны. Затем с увеличением частоты рабочей областью становится середина антенны, т. е. средние по длине элементы конструкции антенны (вибраторы 3, 4, и 5), и, наконец, на высоких частотах работают самые удаленные элементы конструкции, т. е. наименьшие по размерам (вибраторы 6, 7 и 8). На рисунке 1 представлена логопериодическая антенна.

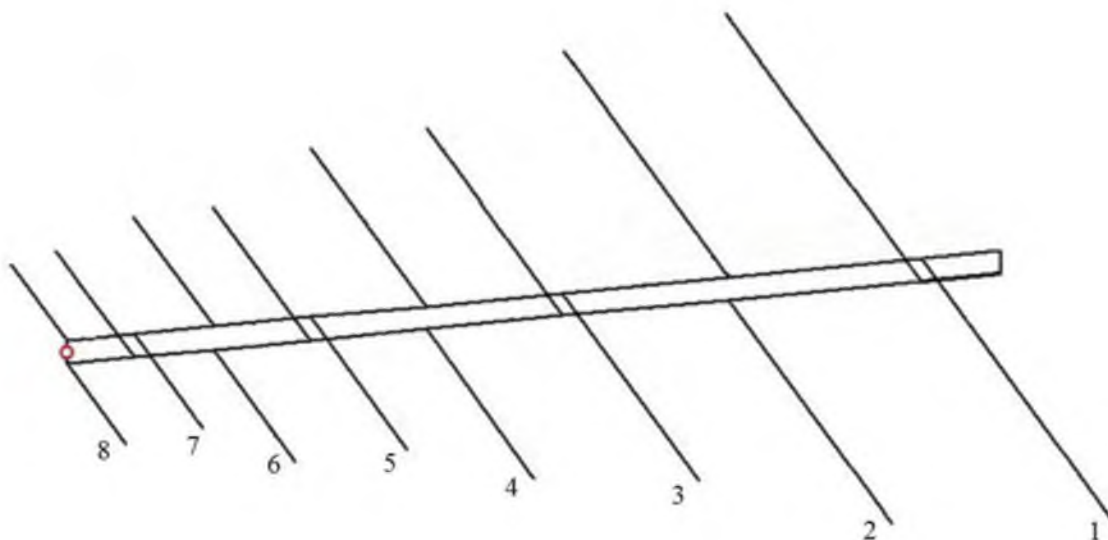
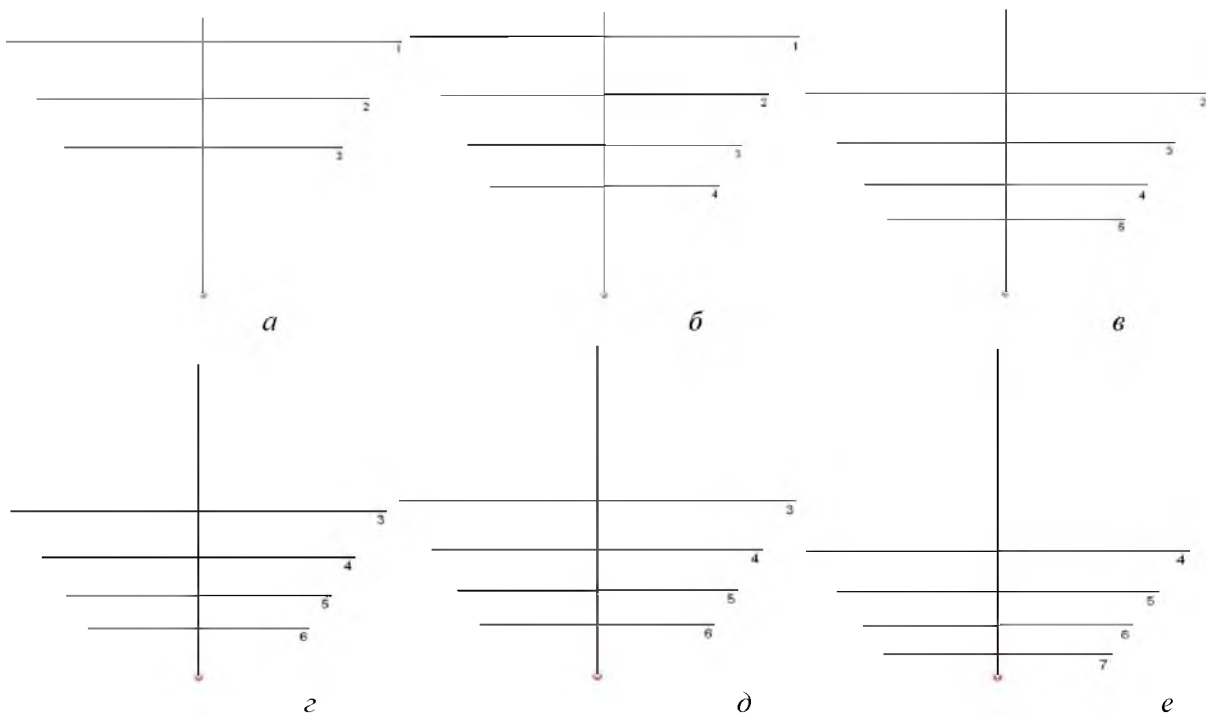


Рисунок 1. – Логопериодическая антенна

Исходя из этого на основе исследованной логопериодической антенны с помощью программ MMANA и MathCAD исключались элементы конструкции антенны, которые с наименьшей степенью участвуют в формировании ДН и на которых распределение тока минимально. Внешний вид антенны с минимально необходимым набором вибраторов представлен на рисунке 2.



$a - 60,36$ МГц; $б - 68,8$ МГц; $в - 82$ МГц; $г - 89$ МГц; $д - 98,3$ МГц; $е - 120,53$ МГц

Рисунок 2. – Логопериодическая антенна оптимальной комплектации на частоте

Исключив элементы с минимальным распределением тока на определенных частотах, проводилось дальнейшее исследование антенны оптимальной комплектации по такому же алгоритму, что и для антенны полной комплектации.

В таблице 2 представлены сравнительные данные коэффициента усиления и коэффициента защитного действия. В верхней строке представлены значения коэффициентов для антенны полной комплектации, в нижней – для антенны оптимальной комплектации.

Таблица 2

f , МГц	G , дБ	F/B , дБ
60,36	5,92	8,39
	5,65	7,46
68,8	6,29	9,8
	6,17	9,21
82,0	6,54	10,89
	6,34	9,92
89,0	6,61	11,84
	6,19	9,17
98,2	6,49	11,7
	6,44	10,42
120,53	6,42	11,35
	6,23	10,4

Значения коэффициентов, представленных в таблице 2, для антенн полной и оптимальной комплектации практически одинаковые, т. е. по направленным и усилительным характеристикам потерь нет. А так как участвует меньшее количество элементов конструкции антенны, следовательно, уменьшается ЭПР.

На рисунке 3 представлены зависимости максимальных значений ЭПР от частоты при различных углах облучения. Сплошная линия – результаты, полученные для антенны

оптимальной комплектации, нагруженной согласованной нагрузкой, пунктирная – для антенны полной комплектации, нагруженной спроектированной нагрузкой.

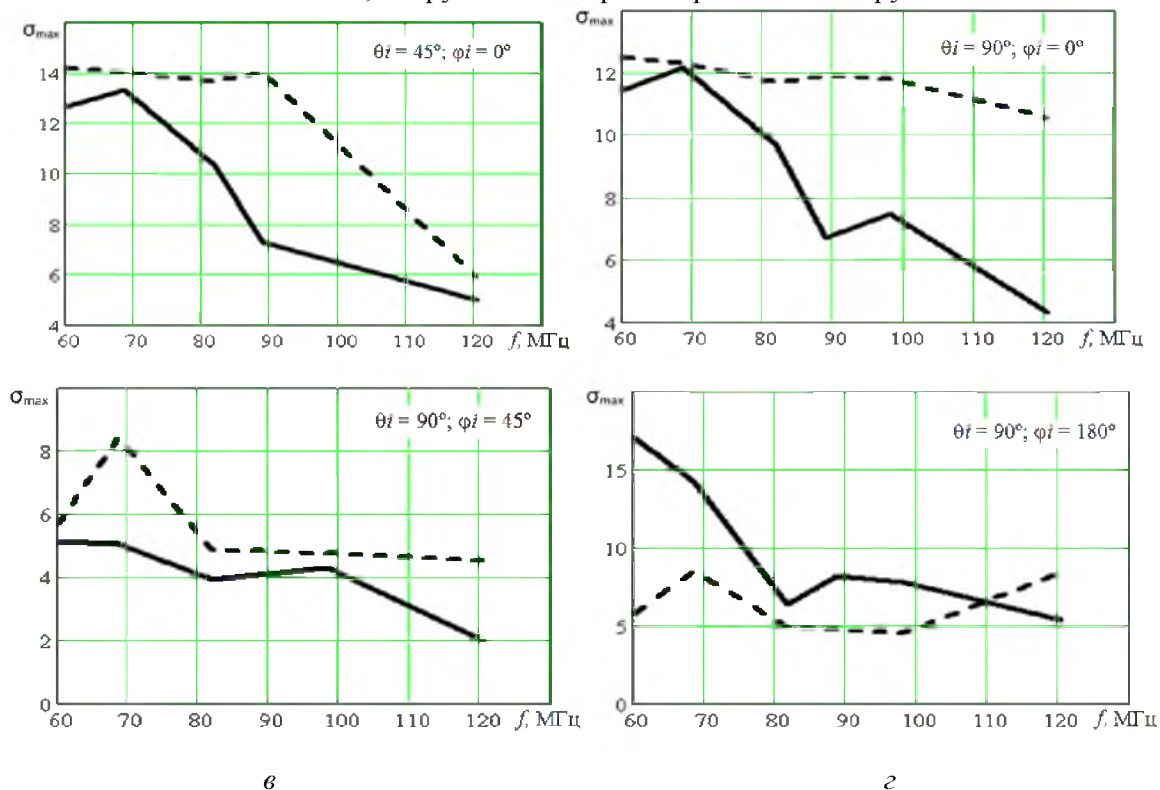


Рисунок 3. – Зависимости максимальных значений ЭПР от частоты при различных углах облучения

На рисунке 4 представлены зависимости полной ЭПР от частоты при различных углах облучения. Сплошная линия – результаты, полученные для антенны оптимальной комплектации, нагруженной согласованной нагрузкой, пунктирная – для антенны полной комплектации, нагруженной спроектированной нагрузкой.

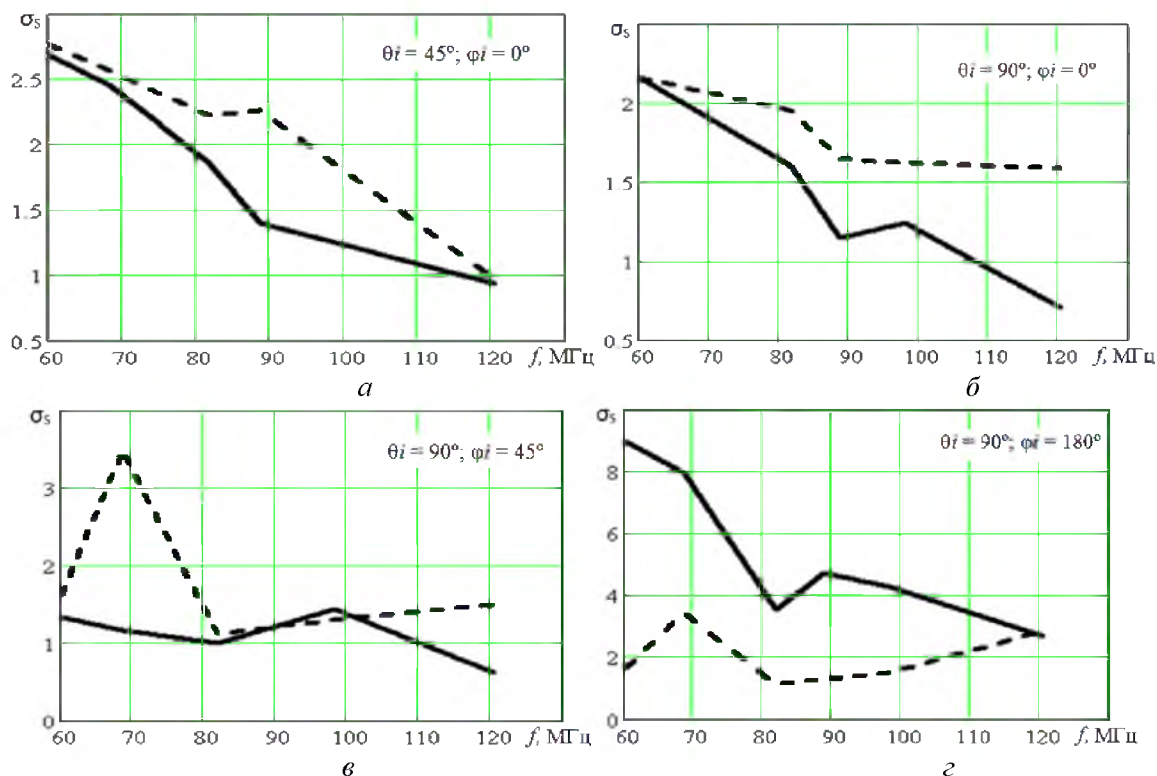


Рисунок 4. – Зависимости полной ЭПР от частоты при различных углах облучения

Техническую реализацию выключения вибраторов с минимальной степенью участия в формировании требуемой ДН предлагается осуществить включением частотно-зависимых нагрузок [6], реализующих режим наименьшей видимости, как показано на рисунке 5. В начале проводника включается Z_{H1} , имеющая максимально возможное сопротивление на заданной частоте, Z_{H2} реализует режим наименьшей видимости [7].

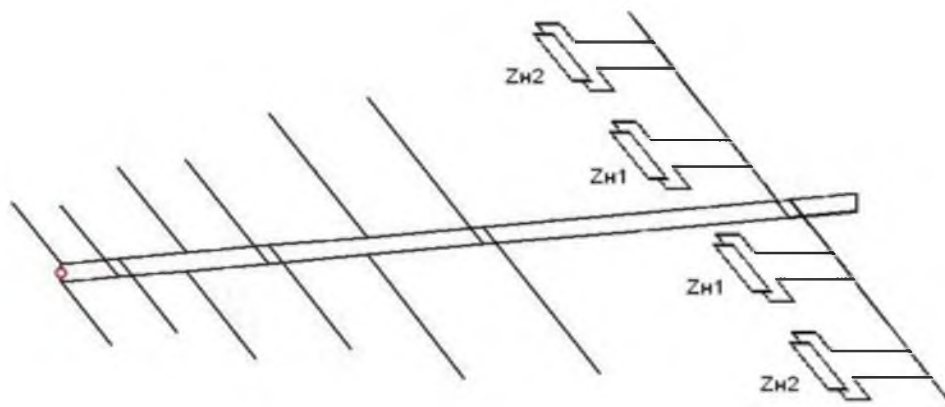


Рисунок 5. – Логопериодическая антенна с технической реализацией выключения вибраторов

Таким образом, вибратор, не участвующий в формировании требуемой ДН, «отсекается» и приводится в режим наименьшей видимости [8].

Сравнительный анализ рассеивающих свойств антенны

Рациональность конструкции антенны. Конструкция антенны является рациональной (на $f=f_{\min}$), так как у нее отсутствуют элементы, способные формировать вторичное излучение и не участвующие в формировании ДН на рабочей частоте. Разница в расчетах интегральных и дифференциальных ЭПР не превышает требуемой инженерной точности расчетов. Конструкция антенны с минимально необходимым набором вибраторов имеет меньшие значения ЭПР по сравнению с антенной полной комплектации.

Зависимость рассеивающих свойств антенны от частоты. С ростом частоты G возрастает от 5,92 до 6,49 дБ (или на 14%), $A_{\text{эф}}/\lambda^2$ возрастает с 0,312 до 0,354 (на 13,5%). Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Отношение σ_S/λ^2 с увеличением частоты возрастает от 0,112 до 0,251, приближаясь к $A_{\text{эф}}/\lambda^2$ (от 36 до 71%).

Изменение рассеивающих свойств широкодиапазонной логопериодической антенны обусловлено тем, что на разных частотах в формировании ДН участвуют разные элементы. На всех частотах рассеивают элементы, участвующие в формировании ДН, а также элементы, не участвующие в формировании ДН. Элементы, формирующие ДН, дают минимально достижимое поле рассеяния. Доля рассеянного поля не участвующих в формировании ДН элементов постепенно возрастает в связи с тем, что изменяются их рассеивающие свойства.

Анализ полученных результатов показывает, что метод S -матрицы применим для расчета рассеивающих свойств НМРА как по их ДН, так и по моделям ДН, а также для выработки критерия оптимальности конструкции антенны по оценке соотношения минимального предельно достижимого и реального поля рассеяния.

Выводы

Детально проанализированы рассеивающие свойства логопериодической антенны. Определен оптимальный набор вибраторов для формирования требуемой ДН на различных

частотах. Исследованы рассеивающие свойства антенны с оптимальным набором элементов и антенны полной комплектации. На основе полученной методики можно улучшить показатели качества функционирования радиотехнических комплексов, работающих в произвольном частотном диапазоне, что определяет практическую значимость работы. Проанализированы основные закономерности рассеивающих свойств исследуемой антенны, обусловленные параметрами ее ДН и особенностями конструктивного исполнения. Показано, что антенна, поле рассеяния которой является минимальным предельно достижимым, обладает оптимальным конструктивным исполнением по критерию минимизации рассеянного поля. При решении задач по анализу рассеивающих свойств и минимизации поля рассеяния антенн в работе, кроме ранее существовавших методов, применен метод S -матрицы, что позволило получить новые, ранее неизвестные результаты применительно к анализу рассеивающих свойств антенн. Выбор рассматриваемого диапазона обусловлен необходимостью наличия лабораторной базы для экспериментальной проверки дальнейших исследований.

Список использованных источников

1. Кобак, В. О. Радиолокационные отражатели / В. О. Кобак. – М., 1975.
2. Еремин, В. Б. Характеристики рассеяния антенн и фазированных антенных решеток / В. Б. Еремин, С. Н. Панычев // Успехи современной радиоэлектроники. – 1997. – № 8. – С. 61–70.
3. Бененсон, Л. С. Рассеяние электромагнитных волн антеннами / Л. С. Бененсон, Я. Н. Фельд // Радиотехника и электроника. – 1988. – Т. XXXIII. – № 2. – С. 225–245.
4. Сидоренко, С. Т. Управление полем рассеяния антенны / С. Т. Сидоренко, В. В. Кудерко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2011. – № 1 (30). – С. 60–66.
5. Гончаренко, И. Программа моделирования антенн MMANA / И. Гончаренко // Радио. – 2001. – № 6–9. – 79 с.
6. Овсянников, В. В. Вибраторные антенны с реактивными нагрузками / В. В. Овсянников. – М., 1985. – 120 с.
7. Характеристики и параметры поля рассеяния минимально рассеивающих антенн / Ю. П. Воропаев [и др.] // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 1997. – № 1. – С. 70–78.
8. Сидоренко, С. Т. Конструктивный синтез двухдиапазонной директорной антенны методом S -матрицы / С. Т. Сидоренко, В. В. Кудерко, С. С. Врублевский // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 2 (55). – С. 79–86.

*Сведения об авторах:

Сидоренко Сергей Тихонович,

Кудерко Виктор Викторович,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 03.11.2017 г.

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ИМИТИРУЮЩЕЙ И МАСКИРУЮЩЕЙ ПОМЕХИ НА СИСТЕМЫ СОПРОВОЖДЕНИЯ ПО ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ РАДИОЛОКАТОРОВ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ

И. В. Чигирь; Н. К. Кузьмичев;
С. А. Горшков, кандидат технических наук, доцент*

Проведен анализ воздействия комбинированной имитирующей и маскирующей помехи на систему сопровождения по дальности и скорости импульсно-доплеровской РЛС, где мощность маскирующей помехи соизмерима с мощностью отраженного сигнала. Разработана математическая модель комбинированной уводящей по дальности, скорости и коррелированной ответно-шумовой помехи. Получены и промоделированы соотношения, обуславливающие энергетику комбинированной имитирующей и маскирующей помехи по отношению к отраженному сигналу.

The analysis of influence of a combined imitating and masking noise on attending system on range and velocity of Pulse-Doppler radar where capacity of a masking noise is commensurable with capacity of the reflected signal. The mathematical model combined withdrawing on range, speed and the correlated response-noise noise is developed. Are received and modeling ratios causing power of a combined imitating and masking noise in relation to the reflected signal.

Введение

Повышение качества сопровождения воздушных целей (ВЦ) в РЛС точного измерения координат (ТИК) на фоне маскирующих, уводящих помех (УП) по дальности, скорости и их комбинации – актуальная задача, обусловленная антагонистическим развитием средств радиоэлектронного подавления (РЭП) и способов помехозащиты (ПХЗ) [1–5]. Импульсно-доплеровские РЛС (ИД РЛС) менее чувствительны к воздействию маскирующих помех, чем, например, импульсные, что обусловлено узкой полосой пропускания приемника. Для подавления таких РЛС используются доплеровские шумы [4], полученные методом ретрансляции сигнала РЛС в станции помех с его растяжением в рециркуляторе и модуляцией по амплитуде и частоте или фазе [4, 5]. Более эффективным способом воздействия на РЛС ТИК является применение комбинированных имитирующих и маскирующих помех (КИМ-помех). КИМ-помеха представляет собой аддитивную смесь УП и шумового колебания в полосе от 7 до 20 кГц относительно частоты Доплера сопровождаемой воздушной цели (ВЦ) [2, с.154]. При этом маскирующая помеха (МП) излучается в ответ на каждый принятый зондирующий импульс РЛС в течение интервала времени, не превышающего периода повторения. Появившаяся над фоном в виде смеси внутреннего шума и узкополосной шумовой помехи УП с постоянно нарастающими рассогласованиями по дальности и скорости позволяет увести соответствующие следящие системы РЛС от цели и сорвать ее сопровождение.

Влияние УП по дальности и скорости на РЛС сопровождения без воздействия ответно-шумовых помех (ОШП) ранее многократно анализировалось [1–8]. Целью статьи является анализ комбинированного воздействия уводящих по дальности, скорости и маскирующих помех на соответствующие следящие системы РЛС, а также предварительное обсуждение возможных путей защиты от нее.

Постановка задачи

Рассмотрим ситуацию противоборства ИД РЛС ТИК и ВЦ, на борту которой имеется станция активных помех (САП) (рисунок 1). РЛС сопровождает одиночную ВЦ, при этом для постановщика помех ситуация идеальна – на его борту точно известны: частота

зондирующего сигнала (ЗС) – f_0 , длительность T_0 , период повторения $T_{\text{п}}$ и параметры закона модуляции (ЗМ) – $U_0(t)$, наклонная дальность, направление на подавляемую РЛС, скорость ВЦ в радиальном направлении на РЛС и другие параметры. В РЛС используется когерентное накопление импульсов, при этом период повторения постоянен в течение десятков – сотен импульсов. Математическая модель отраженных от цели сигналов для таких РЛС хорошо изучена и подробно описана в учебных пособиях [7, 8].

В арсенале средств ПХЗ в РЛС могут быть реализованы сторожевые стробы по дальности и скорости. Возможна селекция помехи по несоответствию параметров законов изменения дальности и скорости, оцениваемых в цепях фильтрации и экстраполяции. На борту ПП возможно применение станции помех, использующей технологию DRFM (Digital Radio Frequency Memory) – цифровое запоминание на радиочастоте. Постановка УП осуществляется методом ретрансляции (минимальное значение задержки в современных САП составляет от 70 до 200 нс [1, с. 112]). Для постановки УП вперед, по первому импульсу когерентной пачки зондирующих сигналов определяется время начала постановки помех, а сама помеха ставится, начиная со второго импульса последовательности.

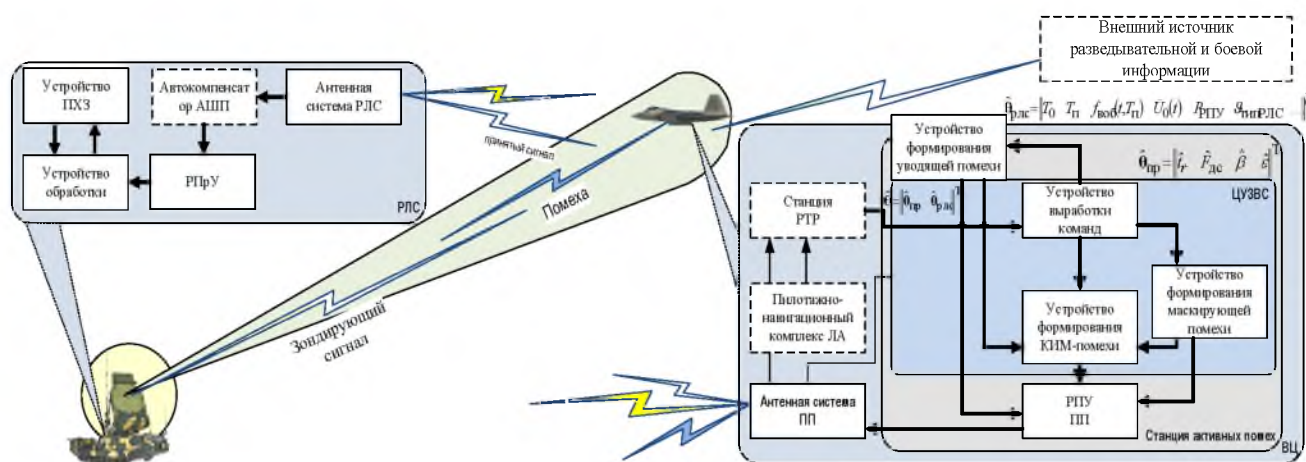


Рисунок 1. – Вариант схемы радиоэлектронного противодействия наземной РЛС сопровождения и САП, совмещенной с сопровождаемой ВЦ

Пространственные и поляризационные свойства КИМ-помехи самоприкрытия нас в данном случае не интересуют. Модели УП по дальности и скорости, а также активных шумовых помех отдельно рассмотрены в [2–8]. Но комплексная модель КИМ-помехи не анализируется в известных источниках. Поэтому, во-первых, здесь уточним временную структуру УП на интервале увода. Ее корреляционная функция и энергетический спектр на интервале обработки пачки такие же, как у отраженного сигнала. Во-вторых, опишем временную структуру шумовой составляющей КИМ-помехи, ее корреляционную функцию и энергетический спектр. Затем проведем моделирование ОС и составляющих КИМ-помехи при минимально необходимых энергетических соотношениях.

Математическая модель КИМ-помехи

Уточнение временной структуры уводящей помехи. В [3] предложена модель многократной УП по дальности и скорости, которая учитывает: временную корреляцию случайных отсчетов; изменение времени запаздывания помехи и угловую модуляцию ретранслируемого сигнала. При формировании УП каналу дальности производится управление сдвигами по времени, а каналу скорости – по частоте в соответствии с навязываемым ускорением. Поэтому модель УП по дальности и скорости представим со сдвигом по времени запаздывания и частоте Доплера через имитируемое ускорение $a_{\text{УП}}$ и скачкообразным межпериодным изменением фазы [9].

Применение УП по дальности приводит к дополнительному смещению по времени запаздывания амплитудной огибающей УП в соответствии с навязываемой задержкой в тракте ретранслятора:

$$\Delta t_{\text{УП}}(t-t_0) = \frac{2\Delta r_{\text{УП}}(t-t_0)}{c}, \quad (1)$$

где t_0 – априорно неизвестное время начала действия УП. Общее время запаздывания УП включает в себя удвоенное время прохождения сигнала к ВЦ на дальности $r_{\text{ВЦ}}(t)$ и дополнительно навязываемое время запаздывания, при этом величина задержки выбирается из условия непревышения пределов максимального допустимого ускорения ВЦ $a_{\text{УПmax}} \leq a_{\text{доп}}$:

$$t_{r_{\text{УП}}}(t-t_0) = \frac{2r_{\text{ВЦ}}(t)}{c} + \Delta t_{\text{УП}}(t-t_0) = \frac{2r_{\text{ВЦ}}(t)}{c} + \frac{2a_{\text{УП}}(t-t_0)(t-t_0)^2}{2c} = \frac{2r_{\text{ВЦ}}(t)}{c} + \frac{a_{\text{УП}}(t-t_0)}{c}(t-t_0)^2. \quad (2)$$

Наличие сложной временной зависимости в функции запаздывания $t_{r_{\text{УП}}}(t)$ УП приводит к трансформации ее структуры. Принимаемое колебание сжимается или растягивается по времени в зависимости стороны постановки помехи, что приводит в общем случае к изменению f_0 на частоту Доплера $F_{\text{Д}} = 2V_r/\lambda$, а также искажениям ее амплитудной и фазовой модуляции. Таким образом, учитывая выражение (2), фаза принимаемого колебания описывается нижеприведенным выражением [10]:

$$2\pi f_0(t-t_{r_{\text{УП}}}(t-t_0)) = (\omega_0 - \Omega_{\text{Д}})t - 2\pi \frac{a_{\text{УП}}(t-t_0)}{\lambda}(t-t_0)^2 - \varphi_0. \quad (3)$$

Вычитаемое $2\pi a_{\text{УП}}(t-t_0)(t-t_0)^2/\lambda$ определяет квадратичный закон фазовой модуляции, а изменение (девиация) частоты за время наблюдения $LT_{\text{П}}$ определяется как $\Delta f_{\text{М}} = 2a_{\text{УП}}LT_{\text{П}}/\lambda$. В большинстве случаев выполняется условие $\Delta f_{\text{М}} \ll \Delta f_0$ (Δf_0 – ширина спектра одиночного радиоимпульса), т. е. даже при самых больших навязываемых ускорениях изменение частоты Доплера за время когерентного накопления значительно меньше, чем ширина спектра одиночного радиоимпульса. Набег фазы, вызванный имитируемым ускорением, для когерентной квазинепрерывной пачки простых прямоугольных радиоимпульсов можно аппроксимировать скачкообразным межимпульсным изменением фазы, пренебрегая ее внутриимпульсным изменением (рисунок 2) [7]. На данном рисунке предполагается, что начальная частота Доплера скомпенсирована следящей системой по радиальной скорости.

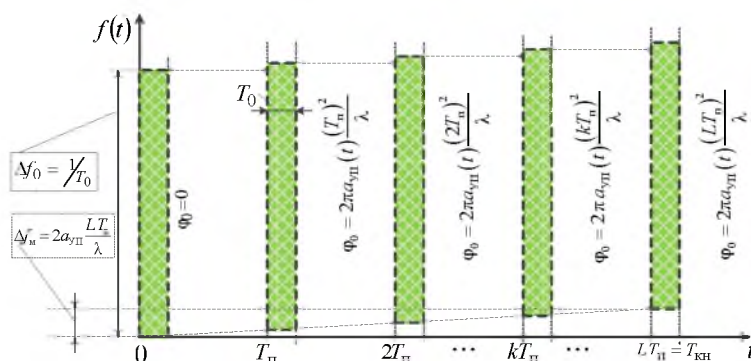


Рисунок 2. – Частотно-временная структура (диаграмма Габора [7, с. 274]) последовательности простых прямоугольных радиоимпульсов с череспериодной модуляцией по фазе

При этом начальная фаза k -го импульса описывается следующим выражением:

$$\varphi_{0k} = 2\pi \frac{a_{\text{УП}}(t-t_0)}{\lambda} (kT_{\text{п}})^2. \quad (4)$$

Таким образом, модель УП по дальности и скорости может быть представлена следующим выражением:

$$\xi_{\text{УП}}(t) = M_{\text{УП}}(t) e^{j[(\omega_0 - \Omega_d)t - \varphi_0]} \cdot \sum_{k=0}^{L-1} U_0 \left[t - kT_n - t_r - \frac{a_{\text{УП}}(t-t_0)}{c} (t-t_0)^2 \right] e^{-j2\pi \frac{a_{\text{УП}}(t-t_0)}{\lambda} (kT_n)^2}, \quad (5)$$

где $M_{\text{УП}}(t) = E_{\text{УП}}(t) \exp(j\varphi_{\text{УП}}(t))$ – комплексная огибающая УП, $E_{\text{УП}}(t)$, $\varphi_{\text{УП}}(t)$ – случайные амплитуда и фаза УП, t_r – время запаздывания УП для момента времени t ; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – несущая круговая частота зондирующего сигнала; $U_0(t-t_r)$ – комплексный ЗМ одиночного ЗС. На САП для повышения качества имитации комплексная огибающая УП может быть размножена в соответствии с распределением группы имитируемых целей или/и дальномерными и доплеровскими портретами имитируемых ВЦ.

Возможность формирования нескольких программ увода с разными ускорениями и направлениями действия УП учитывается в модели индексом g из всего количества G УП. Индексом k в комплексном ЗМ одиночного сигнала учитывается возможность переменного периода или вида модуляции. Итоговое выражение представлено ниже:

$$\xi_{\text{УП}}(t) = M_{\text{УП}}(t) e^{j[(\omega_0 - \Omega_d)t - \varphi_0]} \sum_{g=1}^G \sum_{k=0}^{L-1} U_{0k} \left[t - kT_{nk} - t_r - \frac{a_{\text{УП}g}(t-t_0)}{c} (t-t_0)^2 \right] e^{-j2\pi \frac{a_{\text{УП}g}(t-t_0)}{\lambda} (kT_{nk})^2}. \quad (6)$$

Таким образом, выражение (6) определяет математическую модель многопрограммной УП по дальности и скорости, в которой фазовая модуляция УП, вызванная навязываемым ускорением, аппроксимируется «вырезкой из ЛЧМ сигнала» ограниченной последовательности с череспериодной модуляцией фазы простых прямоугольных радиоимпульсов импульсов (ППРИ) (рисунок 2). При этом математическая модель УП по дальности или скорости будет являться частным случаем выражения (6).

Математическая модель маскирующей помехи. При формировании ОШП САП находится в ждущем режиме, излучая только в ответ на каждый обнаруженный импульс ЗС. Центральная частота соответствует несущей с учетом частоты Доплера ВЦ, а ширина полосы $\Delta f_{\text{ОШП}}(t)$ должна быть не менее, чем удвоенная величина увода по радиальной скорости. Ретранслированные и усиленные таким образом шумовые импульсы по длительности находятся в интервале $T_0 < T_{0\text{ОШП}} < T_n$, а их количество и период повторения полагаем равными соответствующим характеристикам сигнала $L_{\text{ОШП}} = L$, $T_{n\text{ОШП}} = T_n$.

Временная структура ОШП. Математически ОШП можно описать как модулированное шумом колебание с единичной амплитудой $U_{a0}(t)$, длительностью $T_{0\text{ОШП}}$, следующее с периодом T_n . Амплитудная огибающая одиночного шумового импульса при этом представляет собой

$$U_{0a\text{ОШП}}(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T_{0\text{ОШП}}/2 \\ 0, & |t| > T_{0\text{ОШП}}/2 \end{cases}. \quad (7)$$

Ограниченная последовательность импульсов с единичной амплитудой огибающей может быть описана выражением

$$U_{a\text{ОШП}}(t) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{L-1} U_{0a\text{ОШП}}(t - kT_n), & 0 \leq t \leq LT_n \\ 0, & t < 0, t > LT_n \end{cases}. \quad (8)$$

Таким образом, временная структура ОШП описывается выражением

$$\xi_{\text{ОШП}}(t) = E_{\text{ОШП}}(t) e^{j\omega_{\text{ОШП}}t} e^{j(\omega_0 - \Omega_d)t} U_{a\text{ОШП}}(t - t_r) = H_{\text{ОШП}}(t) e^{j(\omega_0 - \Omega_d)t} U_{a\text{ОШП}}(t - t_r), \quad (9)$$

где $H_{\text{ОШП}}(t) = E_{\text{ОШП}}(t)e^{j\varphi_{\text{ОШП}}(t)} = x_{\text{ОШП}}(t) + jy_{\text{ОШП}}(t)$ – комплексная огибающая ОШП, учитывающая шумовую амплитудную и фазовую модуляции, $x_{\text{ОШП}}(t), y_{\text{ОШП}}(t)$ – квадратурные составляющие узкополосной ОШП. Одна из квадратурных составляющих ОШП представлена на рисунке 3 на временном интервале, равном трем интервалам корреляции.

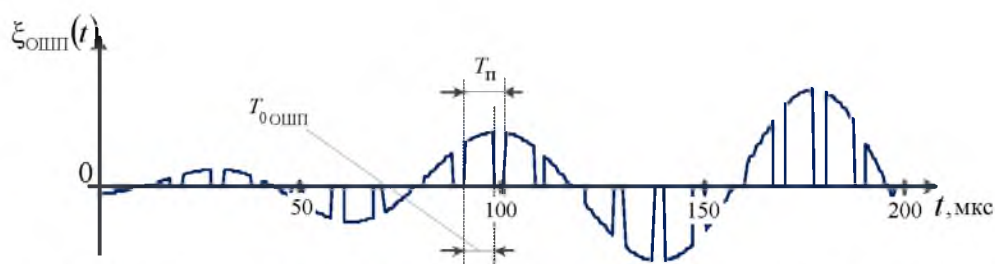


Рисунок 3. – Квадратурная составляющая ответной шумовой помехи на интервале 200 мкс

Корреляционная функция (КФ) ОШП. Согласно общему определению КФ ОШП должна быть представлена выражением

$$\begin{aligned}
 R_{\text{ОШП}}(\tau) &= \frac{1}{LT_{0\text{ОШП}}} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi_{\text{ОШП}}(t) \overline{\xi_{\text{ОШП}}^*(t-\tau)} dt = \\
 &= \frac{1}{LT_{0\text{ОШП}}} \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{H_{\text{ОШП}}(t) H_{\text{ОШП}}^*(t-\tau)} U_{\text{аОШП}}(t-t_r) U_{\text{аОШП}}^*(t-t_r-\tau) e^{j(\omega_0-\Omega_n)t} e^{-j(\omega_0-\Omega_n)(t-\tau)} dt =, \quad (10) \\
 &= 2\sigma_{\text{ОШП}}^2 r_{\text{ОШП}}(\tau) C_{L\text{ОШП}}(\tau) e^{j(\omega_0+\Omega_{\text{дОШП}})\tau} = 2\sigma_{\text{ОШП}}^2 r_{\text{ОШП}}(\tau) r_L(\tau) \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{0\text{ОШП}}(\tau-kT_n) e^{j(\omega_0+\Omega_{\text{дОШП}})\tau},
 \end{aligned}$$

где $\overline{H_{\text{ОШП}}(t) H_{\text{ОШП}}^*(t-\tau)} = 2\sigma_{\text{ОШП}}^2 r_{\text{ОШП}}(\tau) = R_H(\tau)$ – КФ комплексной огибающей ОШП; $r_{\text{ОШП}}(\tau) = \exp(-\pi\tau^2/4\tau_{\text{ОШП}}^2)$ – нормированная КФ флуктуаций ОШП; $2\sigma_{\text{ОШП}}^2$ – удвоенная средняя мощность ОШП (можно аппроксимировать гауссовой (колоколообразной) кривой); $C_{L\text{ОШП}}(\tau) = r_L(\tau) \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{0\text{ОШП}}(\tau-kT_n)$ – нормированная КФ ЗМ ограниченной последовательности одиночных прямоугольных импульсов; $r_L(\tau) = 1-|\tau|/LT_n \cong \exp(-2|\tau|/LT_n)$ – нормированная КФ огибающей пачки L одиночных импульсов (аппроксимируется экспоненциальной кривой) [8]; $C_{0\text{ОШП}}(\tau)$ – КФ одиночного шумового импульса (в случае коротких импульсов < 30 мкс, можно аппроксимировать треугольником с основанием $2T_{0\text{ОШП}}$).

Выражение КФ ОШП принимает следующий вид:

$$R_{\text{ОШП}}(\tau) = 2\sigma_{\text{ОШП}}^2 r_{L\text{ОШП}}(\tau) \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{0\text{ОШП}}(\tau-kT_n) e^{j(\omega_0-\Omega_{\text{дс}})\tau}, \quad (11)$$

где $r_{L\text{ОШП}}(\tau) = r_{\text{ОШП}}(\tau) r_L(\tau)$ – нормированная КФ флуктуаций огибающей ограниченной последовательности шумовых импульсов.

Для обеспечения доверительной вероятности 0,9 и относительной погрешности 10 % было проведено 600 модельных экспериментов с исходными данными: $T_{0\text{ОШП}} = 7$ мкс (длительность шумового импульса выбирается из расчета маскирования как можно большей части интервала однозначности), $T_n = 10$ мкс, $L = 500$, интервал корреляции определяется шириной полосы пропускания полосового фильтра $\tau_{\text{ОШП}} = 1/(2\Delta f_{\text{ОШП}}) = 48,7$ мкс. Вид КФ ограниченной последовательности коррелированной ОШП представлен на рисунке 4.

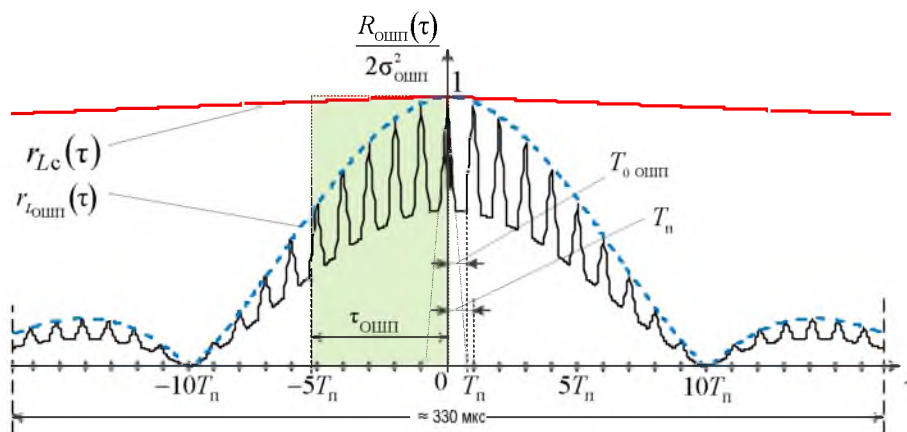


Рисунок 4. – Корреляционная функция ограниченной последовательности коррелированной ОШП

В пределах огибающей ($|\tau| \leq \tau_{\text{ОШП}}$) наблюдается ослабление корреляционных связей с увеличением $|\tau|$ тем большее, чем шире полоса частот $\Delta f_{\text{ОШП}}$ [7]. Так как отношение $T_n/T_{0\text{ОШП}} < 2$, то происходит наложение лепестков КФ и под ее огибающую попадает несколько лепестков, количество которых определяется соотношением $\tau_{\text{ОШП}}/T_n$.

Вид КФ ограниченной последовательности коррелированной ОШП, ограниченной внутри периода повторения длительностью ОС подавляемой РЛС, представлен на рисунке 5.

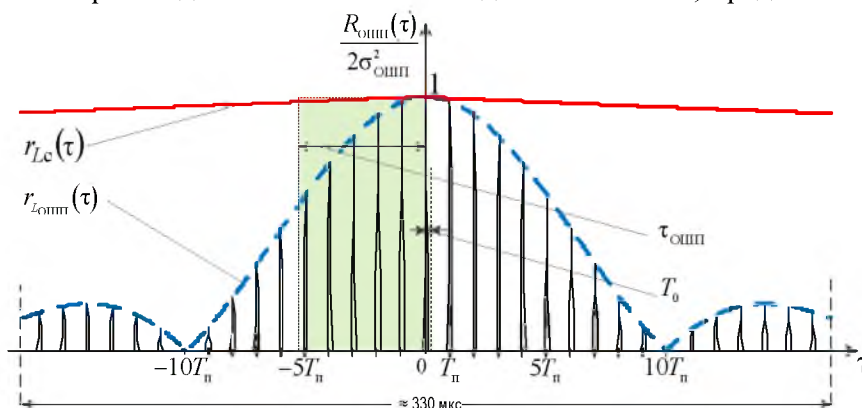


Рисунок 5. – Корреляционная функция ограниченной последовательности коррелированной ОШП ограниченной внутри периода повторения длительностью ОС

Энергетический спектр (ЭС) ОШП. ЭС, характеризующий распределение мощности по частоте, является прямым преобразованием Фурье КФ ОШП:

$$S_{\text{ОШП}}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{\text{ОШП}}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = 2\sigma_{\text{ОШП}}^2 \int_{-\infty}^{+\infty} r_{L_{\text{ОШП}}}(\tau) \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{0_{\text{ОШП}}}(\tau - kT_n) e^{-j(\omega - \omega_0 - \Omega_{\text{ДС}})\tau} d\tau. \quad (12)$$

Преобразование Фурье от КФ ОШП (см. рисунок 4) определяет вид ЭС ограниченной последовательности коррелированной ОШП и представлен на рисунке 6, а от КФ ОШП (см. рисунок 5) – ЭС ограниченной последовательности коррелированной ОШП, ограниченной внутри периода повторения длительностью ОС, представлен на рисунке 7.

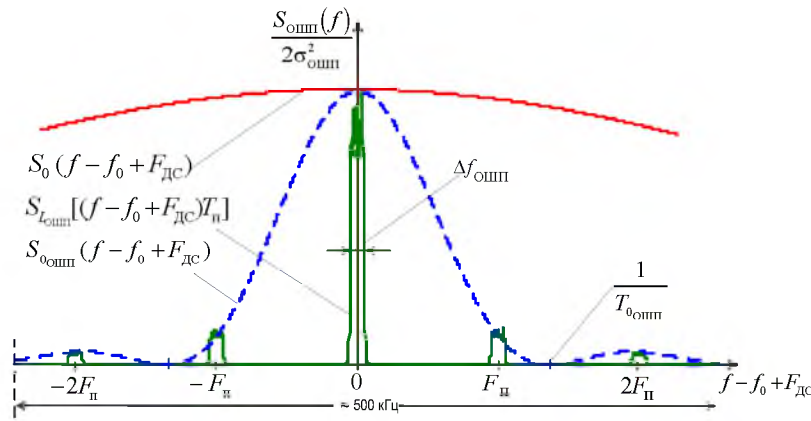


Рисунок 6. – Энергетический спектр ограниченной последовательности коррелированной ОШП

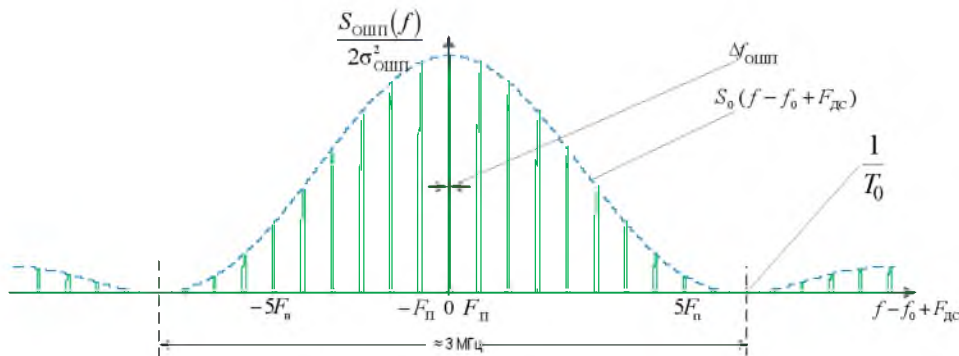


Рисунок 7. – Энергетический спектр ограниченной последовательности коррелированной ОШП, ограниченной внутри периода повторения длительностью ОС

Энергетический спектр ОШП определяется выражением

$$S_{\text{ОШП}}(\omega) = 2\sigma_{\text{ОШП}}^2 S_{0\text{ОШП}}(\omega - \omega_0 - \Omega_{\text{дс}}) S_{L\text{ОШП}}[(\omega - \omega_0 - \Omega_{\text{дс}})T_{\text{п}}], \quad (13)$$

где $S_{0\text{ОШП}}(\omega - \omega_0 - \Omega_{\text{дс}})$ – ЭС одиночного шумового импульса, смещенный на несущую частоту с доплеровской поправкой частоты сигнала; $S_{L\text{ОШП}}[(\omega - \omega_0 - \Omega_{\text{дс}})T_{\text{п}}]$ – ЭС ограниченной последовательности междупериодных дискретных значений ОШП.

При аппроксимации нормированной КФ флуктуаций ОШП гауссовой кривой ЭС имеет гауссову форму:

$$S_{L\text{ОШП}}(\omega) = 2\tau_{\text{ОШП}} \exp\left[-\frac{(\omega\tau_{\text{ОШП}})^2}{\pi}\right]. \quad (14)$$

Ширина зубца $\Delta F_{\text{ОШП}}$ спектра равна:

$$\Delta F_{L\text{ОШП}} = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi F_{\text{п}}}^{\pi F_{\text{п}}} S_{L\text{ОШП}}(\omega T_{\text{п}}) d\omega}{S_{L\text{ОШП}}(0)} \cong \Delta f_{\text{ОШП}}. \quad (15)$$

Учитывая аналогию КФ отраженного сигнала (ОС) и ОШП, ЭС ОШП является гребенчатым, огибающая ЭС ОШП определяется ЭС одиночного шумового импульса.

Таким образом, предложена математическая модель временной структуры ОШП, проведен расчет КФ и ЭС. В отличие от огибающей КФ ОС, занимающей все время когерентного накопления, огибающая КФ ОШП (см. рисунки 4, 5) значительно уже и занимает несколько ($n \approx \tau_{\text{ОШП}}/T_{\text{п}}$) периодов повторения ОС. Соответственно, огибающая спектра ОШП шире огибающей спектра ОС, а ширина зубца ОШП шире зубца ОС, обеспечивая тем самым маскирование участка частот в окрестности частоты ОС. В зависимости от соотношения $T_{0\text{ОШП}}$, $T_{\text{п}}$ происходит перераспределение энергии помехи

по частоте, чем большую часть интервала однозначности занимает шумовой импульс, тем большая часть энергии концентрируется в окрестности центральной частоты.

Математическая модель КИМ-помехи представляет собой аддитивную смесь уводящей (6) и маскирующей помех (9)

$$\xi_{\text{КИМ}}(t) = \xi_{\text{УП}}(t) + \xi_{\text{МП}}(t). \quad (16)$$

Результаты математического моделирования и их обсуждение

Для анализа характера комплексного воздействия КИМ-помехи на ИД РЛС ТИК было проведено математическое моделирование для случая минимально необходимых отношений сигнал-шум (С-Ш), при котором решаются задачи обнаружения и сопровождения [14]. При моделировании полагалось: параметры РЛС (длина волны $\lambda = 3$ см, частота повторения импульсов $F_{\text{П}} = 100$ кГц ($T_{\text{П}} = 10$ мкс), длительность одиночного импульса $T_0 = 1$ мкс, число импульсов в пачке $L = 500$, когерентное накопление (КН) осуществлялось на всем рассматриваемом интервале $T_{\text{КН}} = T_{\text{П}}$), параметры ВЦ (тип – истребитель, радиальная скорость $V_r = 210$ м/с, наклонная дальность $r_{\text{ц}} = 75,45$ км, отношение С-Ш на один импульс $\gamma_{\text{ц}} = 0,2$), параметры КИМ-помехи (маскирующая составляющая помехи – полоса помехи $\Delta f_{\text{ОШП}} = 10$ кГц, длительность шумового импульса $T_{0\text{ОШП}} = 7$ мкс, период повторения соответствует периоду повторения ОС, отношение ответная шумовая помеха – шум (ОШП-Ш) на один импульс $\gamma_{\text{ОШП}} = 3$, величина навязываемого ускорения – $a_{\text{УП}} = 20$ м/с², отношение уводящая помеха – шум (УП-Ш) на один импульс $\gamma_{\text{УП}} = 1,8$). Время моделирования 5 с.

Выходные сигналы наблюдались в матрице обнаружения, сформированной из выходных сигналов 512 взаимно расстроенных узкополосных фильтров (УПФ) с учетом амплитудного детектирования, принимаемых в 10 каналах однозначного измерения дальности. Линейка УПФ перекрывала однозначный диапазон доплеровских частот от 0 до 100 кГц при полосе одного фильтра примерно 195 Гц. Для наглядности различий параметров ОС ВЦ и УП на рисунке 8 отображены результаты второй секунды моделирования. Отметка от цели наблюдалась в третьем однозначном интервале дальности, на частоте 14 кГц, в 71-м фильтре. УП наблюдалась также в третьем однозначном интервале дальности, по частоте, смещенной на 4 кГц относительно сигнала в 92-м фильтре. Отношение С-Ш на выходе когерентного накопителя определялось выражением $\rho_{\text{ц}} = v_{\text{ц}} \gamma_{\text{ц}} = L \gamma_{\text{ц}}$ и для рассматриваемого случая (рисунок 8, а) составило 100 раз (20 дБ).

Уводящая помеха по своей структуре идентична сигналу, поэтому энергетические соотношения подобны случаю с сигналом. Отношение УП-Ш (рисунок 8, б) на выходе когерентного накопителя для рассматриваемого случая составило $\rho_{\text{УП}} = v_{\text{УП}} \gamma_{\text{УП}} = L \gamma_{\text{УП}} = 500 \cdot 1,8 = 900$ раз (≈ 29 дБ), обеспечивая превышение мощности ОС на 9 дБ. Большая мощность УП приводит к уменьшению усиления приемника РЛС вследствие действия АРУ (автоматической регулировки усиления), при этом происходит подавление в приемнике РЛС истинного (отраженного) сигнала от цели и захват стробом сопровождения УП [4, с. 138]. При действии только УП будут использованы известные способы защиты [2 – 6, 10, 12], позволяющие своевременно обнаружить УП и принять меры по противодействию уводу [12].

Наибольший интерес представляют случаи (рисунок 8, в, г) при наличии в принимаемой реализации сигнала, ОШП и/или УП. Отношение сигнал – ОШП (С-ОШП) на выходе фильтра одиночного сигнала составило $\gamma_{\text{С-ОШП}} = \gamma_{\text{С}} / \gamma_{\text{ОШП}} = 0,2 / 3 = 0,067$ раза (≈ -12 дБ). Если бы корреляция помехи отсутствовала, то отношение С-ОШП на выходе когерентного накопителя составило бы $\rho_{\text{С-ОШП}} = L \gamma_{\text{С}} / \gamma_{\text{ОШП}} = 500 \cdot 0,2 / 3 = 33,3$ раза (≈ 15 дБ). Однако наличие корреляции приводит к существенному снижению отношения С-ОШП (рисунок 8, в) на выходе когерентного накопителя и составляет $\rho'_{\text{С-ОШП}} = 4,5$ дБ, что значительно меньше порогового отношения С-Ш, при котором еще возможно сопровождение ($\rho_{\text{пор}} = 7-8$ ед.) [14, с. 189], а тем более обнаружение целей с приемлемыми показателями качества (см. рисунок 9).

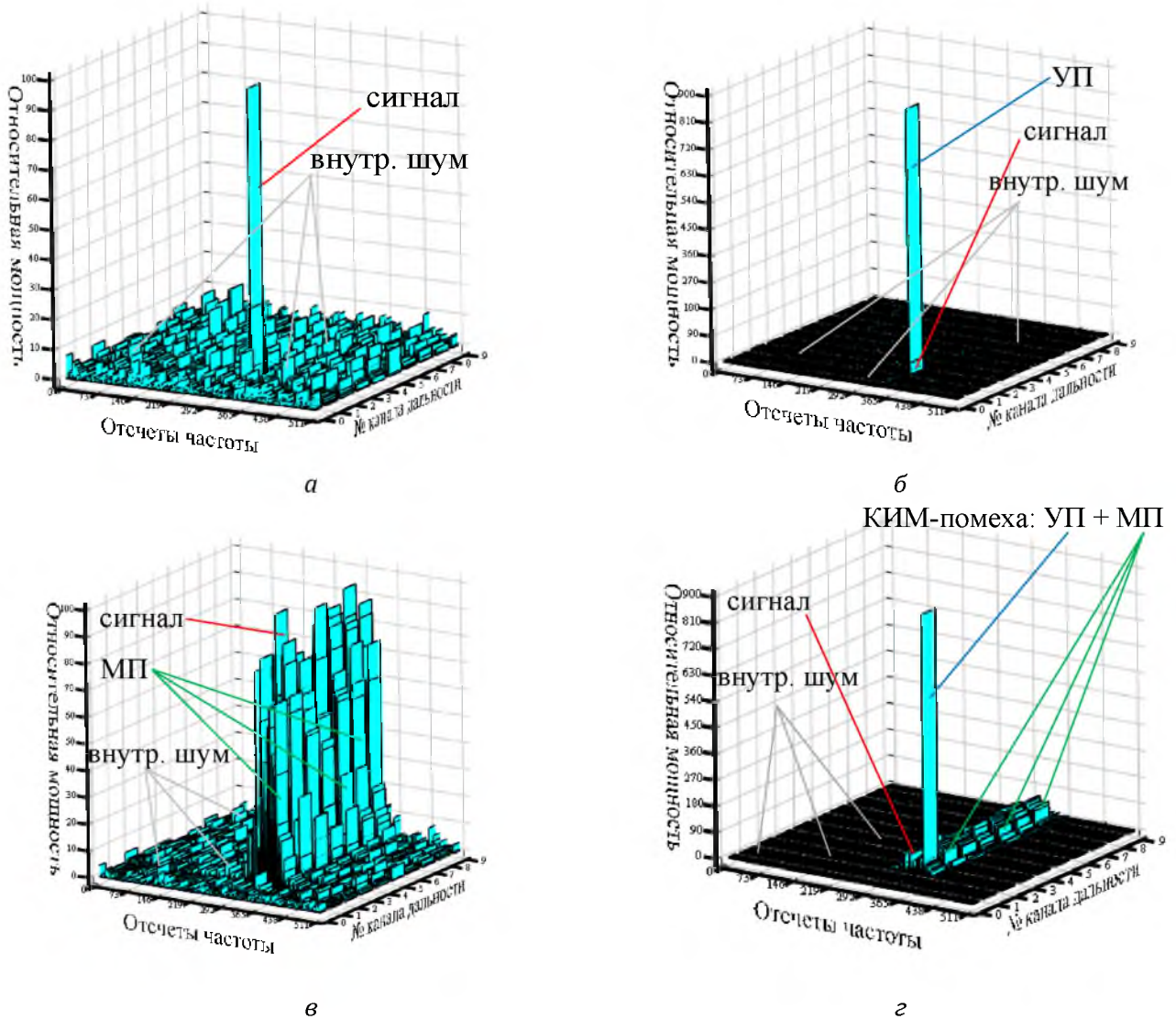


Рисунок 8. – Матрица обнаружения РЛС при наличии в принимаемой реализации сигнала (а), сигнала и УП (б), сигнала и ОШП (в), сигнала и КИМ-помехи (г)

При постановке только коррелированной по времени шумовой помехи обеспечится маскирование отраженного от цели сигнала и вызовет срабатывание системы шумовой автоматической регулировки усиления приемного устройства (при ее наличии). В этом случае задачи обнаружения, сопровождения и наведения на ПП зенитной управляемой ракеты решаются методами пеленгации [13].

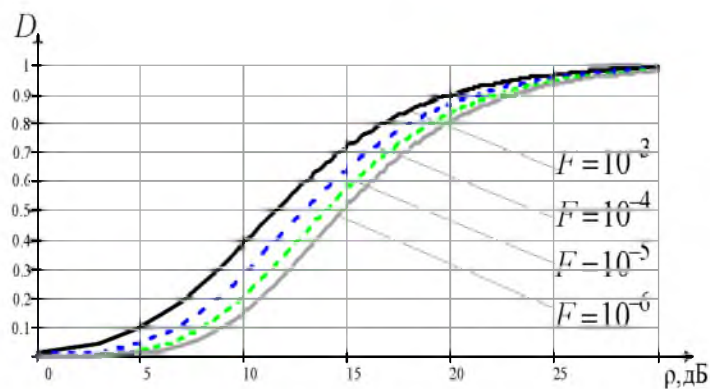


Рисунок 9. – Кривые обнаружения для различных условных вероятностей ложной тревоги при когерентном накоплении на всем интервале наблюдения (5 мс) и типичных для ИД РЛС сопровождения потерях в приемном тракте 2 дБ [11, с. 364]

При комбинированном действии КИМ-помехи происходит комплексное воздействие на РЛС. УП повторяет ЗМ ЗС, а также все сигнальные и траекторные признаки ОС. В приемном тракте РЛС отраженный от цели сигнал прикрывается соизмеримой по мощности (± 5 дБ) узкополосной ОШП [5], скрывая увод каналов сопровождения от срабатывания системы защиты, например содержащей сторожевые стробы [10]. Имитирующая составляющая КИМ-помехи, превышающая маскирующую не менее чем на 10 дБ, гарантированно переключает следящие системы РЛС на сопровождение УП [4, с. 138]. Вариант согласованного по времени действия узкополосной ОШП и УП с рассмотренными выше относительными энергетическими соотношениями между ОШП, УП, внутренним шумом и сигналом обеспечивает скрытность КИМ-помехи и низкую эффективность известных методов защиты.

Выводы

Разработана математическая модель принятого сигнала, представляющего собой аддитивную смесь отраженного сигнала, внутренних шумов, уводящих по дальности и/или скорости и маскирующей помех. Особенности модели УП по дальности и скорости (6) является выраженный через величину навязываемого ускорения сдвиг по времени запаздывания и частоте, что облегчает работу с моделью, а также аппроксимация фазовой модуляции «вырезкой из ЛЧМ сигнала» ограниченной последовательности с череспериодной модуляцией фазы ППРИ (рисунок 2), так как величину ускорения на интервале когерентного накопления можно считать постоянной, т. е. частота Доплера нарастает линейно.

Предложена математическая модель временной структуры ОШП, оценены ее КФ и ЭС. Интервал корреляции ОШП, в отличие от огибающей КФ ОС, занимающей все время когерентного накопления, занимает несколько ($n \approx \tau_{\text{ОШП}}/T_n$) периодов повторения ОС. Соответственно, ширина зубца ОШП шире зубца ОС, обеспечивая тем самым маскирование участка частот в окрестности частоты ОС.

Проведенный в статье анализ способа постановки КИМ-помехи самоприкрытия показал, что совместное воздействие коррелированной ОШП, приводящей к срыву сопровождения ВЦ, и УП, обеспечивающей увод следящих систем, повышают эффективность подавления РЛС по сравнению с применением УП и ОШП по отдельности. Для предельных дальностей захвата на сопровождение, действие КИМ-помехи будет обладать определенной скрытностью действия (слабой наблюдаемостью шумовой дорожки (рисунок 8, в, г) на фоне внутренних шумов). Оператору по экрану индикатора или автомату сопровождения [10] не удастся вовремя обнаружить «подмену» сопровождаемого сигнала на УП. При меньших дальностях отношение ОШП-П возрастает, улучшая ее наблюдаемость. Однако работа АРУ (шумовой автоматической регулировки усиления) и временная коррелированность ОШП существенно снижают возможность ее ручного и автоматического обнаружения без специального обнаружителя узкополосного шума.

Для повышения эффективности сопровождения ВЦ-постановщика КИМ-помехи, а также повышения точности наведения зенитных управляемых ракет необходимо адаптировать обнаружители, следящие системы РЛС и контуры наведения ракет к виду и параметрам такого рода помех, что является предметом дальнейших исследований.

Список использованных источников

1. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. – М. : Радиотехника, 2003. – 416 с.
2. Куприянов, А. И. Радиоэлектронная борьба / А. И. Куприянов. – М. : Вузовская книга, 2013. – 360 с.
3. Гейстер, С. Р. Адаптивное обнаружение – распознавание с селекцией помех по спектральным портретам / С. Р. Гейстер. – Минск : ВА РБ, 2000. – 172 с.
4. Перунов, Ю. М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Ю. М. Перунов, К. И. Фомичев, Л. М. Юдин. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М. : Радиотехника, 2008. – 416 с.

5. Van Brunt, Leroy. B. Applied ECM. Vol. 1, 2 / Leroy. B. Van Brunt. – EW Engineering Inc, 1972. – 1700 p.
6. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн / В. Д. Добыкин [и др.] ; под общ. ред. А. И. Куприянова. – М. : Вузовская книга, 2009. – 360 с.
7. Ширман, Я. Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория / Я. Д. Ширмана [и др.] ; под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2006. – 560 с.
8. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба / А. Е. Охрименко. – Ч. 1. Основы радиолокации. – М. : Воениздат, 1983. – 457 с.
9. Аль-Желили, Б. Радиолокационное обнаружение малоразмерных объектов, отделяющихся от сопровождаемой цели, на фоне мешающих сигналов : дис. ... канд. техн. наук : 621.396.96 / Башир Аль-Желили. – Минск, 2007. – 127 листов.
10. Следящий радиолокационный измеритель дальности с защитой от уводящих помех : пат. RU 2 435 172 / В. В. Дрогагин, И. В. Забелин, А. И. Канашенков, А. Б. Коршунов, А. С. Матюшин, В. И. Меркулов, А. Н. Полилов, О. Ф. Самарин, В. С. Чернов. – Оpubл. 25.08.2000.
11. Barton, David K. Radar Equations for Modern Radar / David K. Barton. – Boston ; London : Artech House, 2013. – 428 с.
12. Горшков, С. А. Анализ возможностей самолетных комплексов радиоэлектронной борьбы по постановке уводящих помех и способов защиты радиолокационных станций сопровождения / С. А. Горшков, И. В. Чигирь, Н. К. Кузьмичев // Сб. науч. ст. ВА РБ. – 2017. – № 32. – С. 163–170.
13. Неупокоев, Ф. К. Стрельба зенитными ракетами. – 3-е изд., перераб. и доп. / Ф. К. Неупокоев. – М. : Воениздат, 1991. – 343 с.
14. Ширман, Я. Д. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / Я. Д. Ширман; под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с.

*Сведения об авторах:

Чигирь Иван Викторович,

Кузьмичев Николай Константинович,

Горшков Сергей Анатольевич,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 22.12.2017 г.

ПЕРЕХОДНЫЕ ФИЛЬТРЫ С ПОВЫШЕННОЙ ВАРИАТИВНОСТЬЮ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ

В. Н. Шашок, кандидат технических наук, доцент,
А. С. Коноплицкий*

Предложена аппроксимирующая функция передачи, позволяющая реализовать электрические фильтры со свойствами в полосе пропускания, близкими к свойствам фильтров Бесселя, а в полосе подавления – Баттерворта. Показана возможность использования предложенной функции в радиотехнических системах с цифровой обработкой сигналов.

An approximating transfer function is proposed, which allows to implement electric filters with properties in the transmission band close to the Bessel filters properties, and in the suppression band – to the Butterworth filters. The possibility of using the proposed function in radio systems with digital signal processing is shown.

Применение в радиотехнических системах (РТС) различного назначения сложных сигналов позволяет решить целый ряд противоречивых проблем [1]. Однако эффективность применения таких сигналов во многом зависит от степени сохранения их частотной структуры в частотно-избирательных цепях приемопередающих трактов РТС. Учитывая, что фазочастотные искажения в большей мере воздействуют на структуру передаваемых сигналов в сравнении с амплитудно-частотными [2], указанные цепи должны обладать повышенной линейностью частотно-фазовой характеристики.

Вид частотной характеристики таких цепей определяется процедурой выбора низкочастотных фильтров, используемых в качестве прототипов при синтезе рассматриваемых цепей. Данное утверждение справедливо не только для аналоговых цепей, но и для цифровых БИХ-фильтров, синтез которых осуществляется также по выбранным фильтрам-прототипам [3]. По этой причине целесообразными являются рассмотрение функций передачи фильтров с малыми вносимыми фазовыми искажениями сигналов и на их основе разработка аппроксимирующей функции, обеспечивающей компромиссное решение по сохранению фазочастотной структуры сигналов и требуемой избирательностью. Такой цепью, обладающей фазочастотной характеристикой, близкой к линейной, является фильтр Бесселя.

Несмотря на то, что фильтры Бесселя из-за низкой избирательности не находят практического применения в качестве частотно-избирательных цепей, такие цепи привлекают к себе внимание своими фазочастотными свойствами. Характеристика группового времени запаздывания (ГВЗ) данных фильтров является оптимальной по критерию Тейлора, т. е. является максимально плоской, благодаря чему они широко используются в качестве полиномиальных линий задержки [4].

С учетом указанных свойств интересным представляется компромиссное решение, когда фильтрам Бесселя частично придаются свойства фильтров Баттерворта, обладающих большей частотной избирательностью и имеющих максимально плоскую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Такое решение позволяет уменьшить фазочастотные искажения сигналов в приемопередающих трактах РТС при сохранении их частотно-избирательных свойств. Полученные таким образом фильтры называются переходными и они часто являются лучшими для приема тональных посылок в системах связи [5]. В указанном источнике приводится методика синтеза функции передачи переходных фильтров, основанная на определении полюсов искомой функции как промежуточных и находящихся посередине между соответствующими полюсами функции передачи фильтров Бесселя и Баттерворта. Полученная по указанной методике и приведенная

в качестве примера функция передачи ЭДС источника сигнала в нагрузку переходного фильтра второго порядка имеет следующую запись:

$$K(s) = \frac{1}{s^2 + 1,5731s + 0,9830}, \quad (1)$$

где $s = \sigma + j\omega$ – комплексная переменная.

Несомненным достоинством приведенной в [5] методики является простота определения полюсов искомого функции передачи. Однако в настоящее время с развитием средств вычислительной техники и численных методов определения корней полиномов такая задача не является существенной. Вместе с тем данная методика содержит некоторые недостатки. Как видно из (1), искомая функция передачи получена в ненормированном виде и в точке $s=0$ не равна 1. Кроме того, не задана неравномерность функции в полосе пропускания. На частоте $s=1$ функция не соответствует уровню 0,707. Необходимо отметить, что согласно приведенной в [5] методике исходные функции должны иметь одинаковые порядки. Снижает вариативность приведенной функции и то, что исходные функции имеют одинаковые и неизменяемые весовые вклады.

Обращая внимание на то, что функции передачи фильтров Баттерворта и Бесселя в полосе пропускания имеют близкие уровни, а в полосе подавления фильтр Баттерворта вносит значительно большее затухание, выберем исходную функцию Баттерворта большего порядка и с меньшим вносимым весом. В таком случае полученная функция в полосе пропускания в большей мере будет соответствовать функции передачи Бесселя, а в полосе подавления – функции передачи Баттерворта. Предложенная аппроксимация при этом будет свободна от недостатков, указанных для приведенной в [5] методики, и примет следующий вид записи:

$$K(-s^2) = \frac{k^2}{q(1 + (-1)^n s^{2n}) + (1-q) \frac{1}{d_0^2} B^2(cs, m)}, \quad (2)$$

где $B(cs, m)$ – функция Бесселя m -го порядка, нормированная по частоте;

c – коэффициент нормирования по частоте функции передачи фильтра Бесселя, обеспечивающий неравномерность передачи 3 дБ в единичной полосе пропускания;

$$k = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{с}} + R_{\text{н}}} \text{ – коэффициент, характеризующий уровень передачи ЭДС источника}$$

в нагрузку, в режиме согласования равный 0,5;

n – порядок исходной функции передачи фильтра Баттерворта;

q – весовой коэффициент, принимающий значения от 0 до 1;

$$d_0 = \frac{(2m)!}{2^m m!} \text{ – свободный коэффициент функции Бесселя } m\text{-го порядка,}$$

нормирующий в выражении (2) данную функцию.

Коэффициент нормирования c определяется из условия

$$\left| \frac{d_0}{B(cs, m)} \right|_{s=j} = \sqrt{0,5}.$$

При низких порядках функции данный коэффициент может быть определен аналитически, при высоких – для его определения желательно использовать численные методы. Для функции передачи фильтров Бесселя первого, второго и пятого порядков коэффициент нормирования соответственно равен 1, 1,362 и 2,427.

Предложенная функция (2) содержит в себе компоненты исходных функций, вес которых определяется коэффициентом q . При выбранном, как и в предыдущем примере, условии, а именно, исходных функциях второго порядка, коэффициентах $k=1$, $q=0,5$

и неравномерности в полосе пропускания 3 дБ, функция передачи мощности переходного фильтра-прототипа примет вид:

$$K(-s^2) = \frac{1^2}{0,5(1+s^4) + (1-0,5) \frac{1}{3^2} [(1,362s)^2 + 3 \cdot 1,362s + 3] [(-1,362s)^2 + 3(-1,362s) + 3]} = \frac{1}{0,691009s^4 + 0,309038s^2 + 1}. \quad (3)$$

Функции передачи мощности (2) соответствует функция передачи ЭДС источника сигнала в нагрузку

$$K(s) = \frac{k}{h p(s)}, \quad (4)$$

где $p(s)$ – полином Гурвица, образованный полюсами функции (2), лежащими в левой части s -плоскости;

h – коэффициент нормирования функции передачи по уровню.

Так как коэффициент при старшем члене полинома Гурвица равен 1, то коэффициент h определяется как корень из коэффициента при старшем члене полинома числителя функции передачи по мощности (2), т.е.:

при $n > m$

$$h = \sqrt{|q|}; \quad (5)$$

при $n = m$

$$h = \sqrt{|q| + (1-q) \frac{(-1)^m (d_m c)^{2m}}{d_0^2}};$$

при $n < m$

$$h = \sqrt{(1-q) \frac{(-1)^m (d_m c)^{2m}}{d_0^2}},$$

где d_m – коэффициент при старшем члене функции Бесселя m -го порядка.

Например, при $n = m = 2$ коэффициент $h = 0,831269$.

Для рассматриваемой в примере функции передачи мощности (3) функция передачи ЭДС источника в нагрузку примет следующую запись:

$$K(s) = \frac{1}{0,831269s^2 + 1,404128s + 1}. \quad (6)$$

Вид АЧХ и характеристики группового времени запаздывания цепи с полученной функцией передачи (6) показаны на рисунке 1. Как видно из рисунка, фильтр с функцией передачи, синтезированной по предложенной методике, имеет нормированную АЧХ в полосе пропускания. Его характеристика ГВЗ близка по неравномерности к характеристике фильтра с функцией передачи (1), рассмотренной в [5].

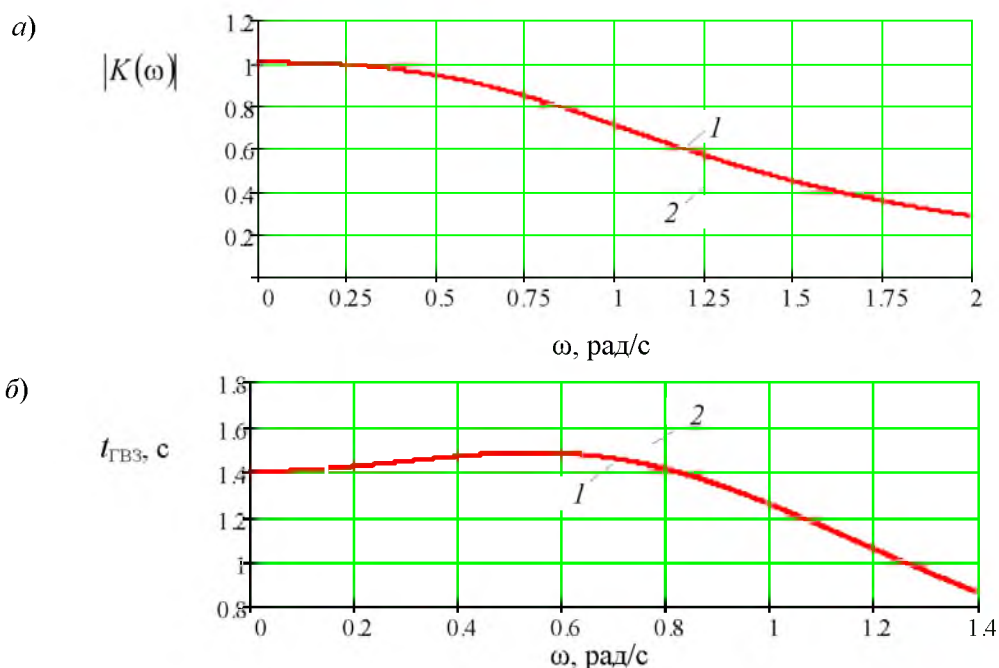


Рисунок 1. – АЧХ (а) и характеристика ГВЗ (б) фильтров-прототипов с функциями передачи (6) (1) и (1) (2)

Как отмечалось выше, достоинствами предложенной аппроксимации являются возможности определения переходного вида от исходных функций различных порядков и учета их весового вклада. Выберем в качестве примера исходную функцию передачи Баттерворта 5-го порядка с весовым коэффициентом $q = 0,1$, а вторую исходную функцию, как и в предыдущем примере, 2-го порядка. При таких условиях выражение (2) примет вид:

$$K(-s^2) = \frac{1^2}{0,1(1-s^{10}) + (1-0,1) \frac{1}{3^2} [(1,362s)^2 + 3 \cdot 1,362s + 3] [(-1,362s)^2 + 3(-1,362s) + 3]} = \frac{1}{-0,1s^{10} + 0,343816s^4 - 0,556268s^2 + 1}$$

В соответствии с (4) и (5) данной функции соответствует функция передачи ЭДС источника в нагрузку

$$K(s) = \frac{1}{\sqrt{0,1}(s^5 + 4,268457s^4 + 9,109862s^3 + 11,82095s^2 + 8,962418s + 3,162278)} \quad (7)$$

Вид АЧХ и характеристики группового времени запаздывания цепей с функцией передачи (7) и исходными функциями показаны на рисунке 2.

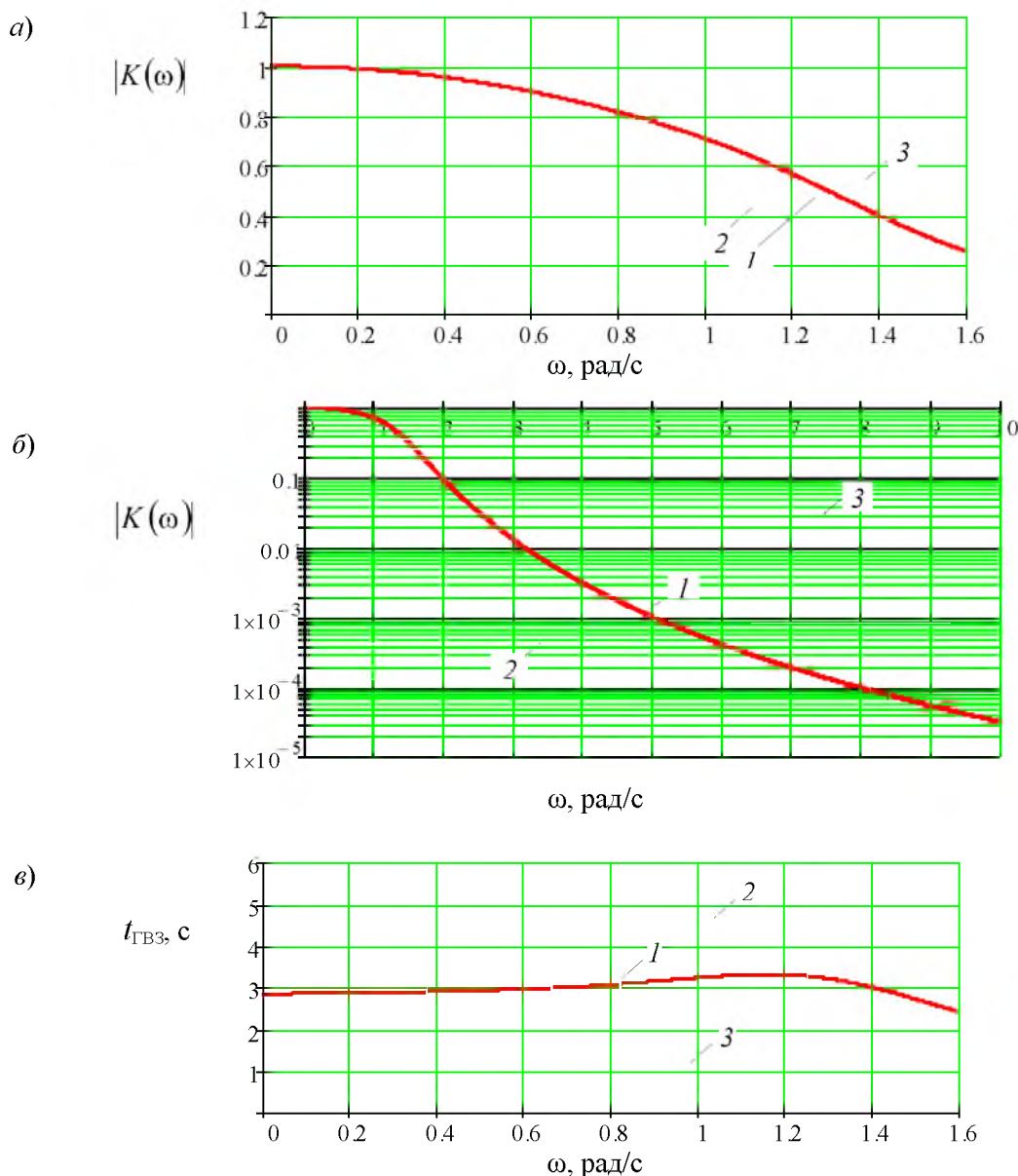


Рисунок 2. – АЧХ в полосе пропускания и переходной области (а), полосе подавления (б) и характеристика ГВЗ (в) фильтров-прототипов с функциями передачи (5) (1), максимально плоской (2) и с функцией Бесселя (3)

Как видно из рисунка 2, предлагаемая аппроксимирующая функция (2) позволяет реализовать переходные фильтры со свойствами в полосе пропускания, близкими к фильтрам Бесселя, а в полосе подавления – к фильтрам Баттерворта. Такие свойства могут быть реализованы не только при проектировании аналоговых цепей, но и в системах цифровой обработки сигналов в качестве БИХ-фильтров. Функция передачи (7) при использовании билинейного преобразования и частоте дискретизации 5 Гц в z -области принимает вид:

$$K(z) = \frac{b(0) + b(1)z^{-1} + b(2)z^{-2} + b(3)z^{-3} + b(4)z^{-4} + b(5)z^{-5}}{1 - a(1)z^{-1} - a(2)z^{-2} - a(3)z^{-3} - a(4)z^{-4} - a(5)z^{-5}}, \quad (8)$$

где $b(0) = b(5) = 2,066 \cdot 10^{-5}$; $b(1) = b(4) = 1,033 \cdot 10^{-4}$; $b(2) = b(3) = 2,066 \cdot 10^{-4}$; $a(1) = 4,153$; $a(2) = -6,958$; $a(3) = 5,873$; $a(4) = -2,496$; $a(5) = 0,427$.

АЧХ цифрового фильтра имеет многополосный характер. Для перехода в z -область выбрано билинейное преобразование. При данном преобразовании отсутствует эффект наложения полос пропускания (рисунок 3).

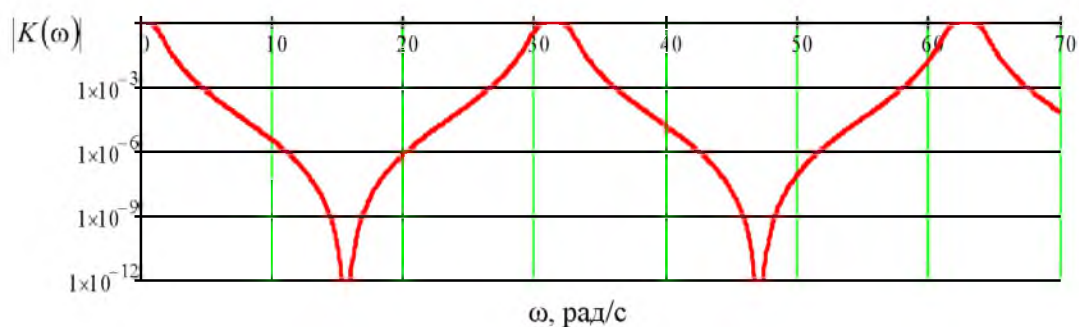


Рисунок 3. – АЧХ цифрового фильтра с функцией передачи (8)

Как видно из приведенного рисунка, АЧХ цифрового фильтра сохраняет свойства аналогового прототипа. Благодаря таким свойствам БИХ-фильтры с функцией передачи (2) могут использоваться в системах цифровой обработки вместо КИХ-фильтров в случаях, когда существует некоторый допуск по неравномерности характеристики ГВЗ. Такая замена позволит повысить внеполосное подавление помех в трактах радиотехнических систем, решить задачи частотной избирательности меньшими вычислительным и временным ресурсами. На рисунке 4 показаны АЧХ БИХ-фильтра с переходными свойствами и КИХ-фильтра одинаковых (5-го) порядков.

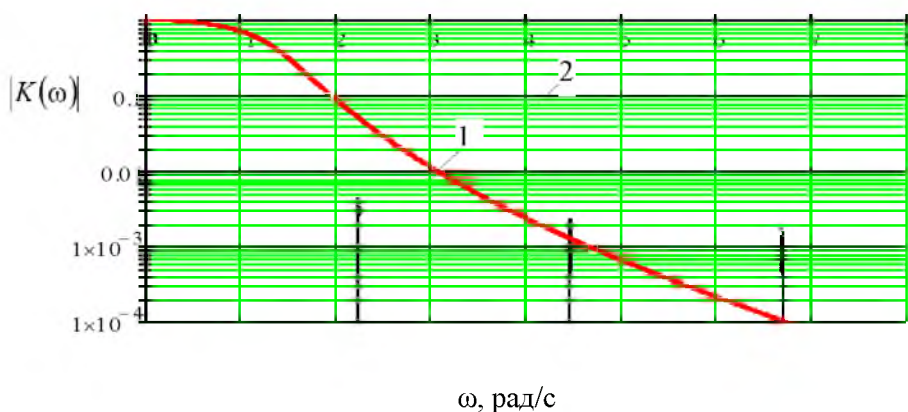


Рисунок 4. – АЧХ БИХ-фильтра с функцией передачи (8) (1) и КИХ-фильтра 5-го порядка (2)

Необходимо отметить, что задача повышения равномерности характеристики ГВЗ может быть решена и путем использования нарастающе-волновой функции передачи [6]. Данная аппроксимация применяется при необходимости совместного обеспечения большого внеполосного затухания, сравнимого с вносимым затуханием фильтров Чебышева. Такая задача решается путем перераспределения частотных свойств синтезированных цепей в полосе пропускания, что позволяет использовать только часть, хотя и большую, полосы пропускания. Предложенный в данной работе способ аппроксимации дает возможность обеспечить равномерность ГВЗ во всей полосе пропускания при меньшем вносимом внеполосном затухании, сопоставимом с затуханием фильтров Баттерворта.

Таким образом, синтез частотно-избирательных цепей с переходными свойствами на основе функций передачи фильтров Баттерворта и Бесселя предложенным в работе способом позволяет решить задачу компромиссного обеспечения равномерности характеристики ГВЗ и требуемой частотной избирательности. Предложенный способ аппроксимации позволяет задаваться полосой пропускания синтезируемых цепей, более вариативно учитывать требования конкретной решаемой задачи.

Список использованных источников

1. Гантмахер, В. Е. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка / В. Е. Гантмахер, Н. Е. Быстров, Д. В. Чеботарев. – СПб. : Наука и Техника, 2005. – 400 с. : ил.
2. Лезин, Ю. С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем : учеб. пособие для вузов / Ю. С. Лезин. – М. : Радио и связь, 1986. – 280 с. : ил.
3. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов : пер. с англ / Р. Лайонс. – 2-е изд. – М.: Бином-Пресс, 2006. – 656 с. : ил.
4. Улахович, Д. А. Основы теории линейных электрических цепей : учеб. пособие / Д. А. Улахович – СПб. : БХВ-Петербург, 2009. – 816 с. : ил.
5. Лэм, Г. Аналоговые и цифровые фильтры / Г. Лэм; пер. с англ. под ред. В. Л. Левина, М. Н. Микшиса, И. Н. Теплюка. – М., Мир, 1982. – 594 с.
6. Шашок, В. Н. Синтез цепей широкополосного согласования и фильтрации с повышенной равномерностью группового времени запаздывания: дис. ... канд. техн. наук : 05.12.04 / В. Н. Шашок. – Минск, 2013. – 164 л.

*Сведения об авторах:

Шашок Виктор Николаевич,

Коноплицкий Андрей Степанович,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 17.01.2018 г.

РАЗРАБОТКА, МОДЕРНИЗАЦИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 623.618

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ АВИАЦИОННЫХ РАКЕТ ТИПА С-8

О. К. Кривонос, кандидат военных наук;
А. Ф. Ильюшенко, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси;
Е. Е. Петюшик, доктор технических наук, профессор;
В. А. Конопляник*

В статье проведена оценка основных тактико-технических характеристик наиболее распространенных неуправляемых авиационных ракет (НАР) и проведено их сравнение с НАР С-8. На основании полученных по итогам сравнительного анализа результатов определены основные направления развития неуправляемой авиационной ракеты типа С-8 и сформулированы задачи, решение которых позволит выйти на разработку кардинального нового опытного образца 80-мм неуправляемой авиационной ракеты.

The article presents an evaluation of the main tactical and technical characteristics of the widespread unguided rockets and compares them with NAR C-8. Based on the results of comparative analysis, the main directions of C-8 unguided rockets development have been defined, as well as the tasks have been formulated. Their solution will make it possible to develop radically new 80-mm prototype of unguided rocket.

Введение

Неуправляемые авиационные ракеты типа С-8 (НАР С-8) являются одним из основных средств поражения живой силы и бронеемких объектов противника с борта летательного аппарата на дальностях до 4000 м. Начав поступать в войска с начала 70-х годов XX столетия НАР С-8 [1] до настоящего времени остается на вооружении многих стран мира. Ее производство, кроме Российской Федерации (ОАО «Институт прикладной физики»), освоено в Украине (ОККБ «Луч», Киев), Болгарии (Агмасо JSC, София) и ряде других государств.

НАР С-8 была построена по классической схеме и за весь период эксплуатации не претерпела существенных изменений. В начале 2000-х годов на Тульском ОАО «НПО «Сплав» началась разработка конструктивно обновленной С-8ОФ (С-8ОФП) с дальностью пуска до 6000 м, существенно измененными боевой и ракетной частями, а также другим составом твердого топлива [1]. Однако до настоящего времени эта ракета серийно в войска не поступала.

Работы по модернизации НАР С-8, а также разработке новых типов данной НАР проводятся на ОККБ «Луч». Информация об этих работах в открытой печати отсутствует. Можно предположить, что анонсированный совместный украинско-польский ракетный комплекс «Маргаритка» (Stokrotka) использует НАР С-80П (с дальностью пуска до 6000 м), разработанную этим КБ [2].

В зависимости от целевого предназначения данный класс ракет выпускался с различной боевой частью: от осколочной и осколочно-фугасной (кумулятивно-осколочной) до специальной – дымовой или осветительной. В настоящее время известно более 15 ее основных модификаций. Базовые тактико-технические характеристики (с учетом заявленной направленности исследования) некоторых модификаций НАР С-8 приведены в таблице 1.

Цель исследования

Как известно, влияние на формирование тактико-технических требований к образцам вооружения оказывают изменения в характере вооруженной борьбы и существующие подходы к производству аналогичного вооружения в других государствах. Последнее, как правило, также отражается в характере будущей вооруженной борьбы. Поэтому формулирование тактико-

технических требований к образцу вооружения целесообразно осуществлять с учетом тенденций развития его аналогов у иностранных производителей. Это позволит ему в мирное время успешно конкурировать на внешнем рынке вооружений, а в военное – на поле боя.

Таблица 1. – Характеристика ракет С-8 [3, 4]

Характеристики	С-8В	С-80Ф	С-8КОМ/ С-80ФМ	С-8ДФ	С-80ФП
Масса ракеты, кг	12,1	11,15	10,75	13,4	16,7
Тип и масса топливного заряда, кг	ВИК-2Д 3,6 (с бронировкой) 9-лучевая звезда	БН-К 3,87 (с бронировкой) 7-лучевая звезда	БНК-Р 3,1 (всестороннее горение) 3-лучевая звезда	БНК-Р 3,1 (всестороннее горение) 3-лучевая звезда	смесевое топливо (скреплен- ный заряд)
Тип соплового блока	шестисопловой	шестисопловой	односопловой, перья обеспечивают проворачивание НАР в ПУ	односопловой	односопловой с внутренними пазами
Максимальная скорость, м/с	626	654	610	500	680
Время горения заряда, с	0,74–0,94	1,14–1,56	0,45–1,3	0,45–1,3	–
Суммарный импульс, Н·с	6350	–	5984	5800	–
Дульная скорость, м/с	54–40	64–37	75–55	–	–
Тип ВВ и его масса, кг	А-IX-10 0,9	Гекфол-5 1,1	Гекфол-5, А-IX-1 1,0	ГАИ-50 3,3	– 2,7

На основании изложенного **основной целью** работы является определение путей повышения тактико-технических характеристик НАР С-8, не уступающих мировым аналогам, а также определение задач, решение которых позволит выйти на изготовление опытного образца изделия с улучшенными боевыми возможностями.

Исследовательская часть

Неослабевающий интерес в мире к НАР объясняется их простотой и надежностью, достаточно большим модернизационным потенциалом, а также универсальностью данного типа ракет, предполагающей возможность (при незначительной доработке) их использования в наземном варианте.

Наиболее распространенными неуправляемыми авиационными ракетами (без учета стоящих на вооружении НАР С-8) в настоящее время являются:

70-мм Hydra-70, производимая General Dynamics Armament and Technical Products (США);

70-мм CRV7, изготавливаемая на Magellan Aerospace (Канада);

70-мм FZ90, производимая Forges de Zeebrugge (Бельгия);

HSS-R80 Sura, разработанная фирмой «Hispano-Suiza» (Испания, Швейцария);

68 мм SNEB, производимая Thales/TDA Armements (Франция).

Наряду с вышеприведенными НАР достаточно перспективными сегодня считаются **81-мм Medusa**, разработанная фирмой «SNIA BPD» (Италия), и **70-мм SKYFIRE-70 M-10** (M-8; M-9) – «Avibras Aeroespacial» (Бразилия).

Основные тактико-технические характеристики перечисленных авиационных ракет приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Тактико-технические характеристики основных неуправляемых авиационных ракет [5]

Наименование НАР и страна – производитель	Калибр, мм	Дальность пуска, м	Ракетная часть, тип/вес, кг	Максимальная скорость, м/с	Время горения топлива, с	Суммарный импульс, Н·с	Типы применяемых БЧ	Тип топлива
Hydra-70 , США	70	8000	МК66/6,17	739	1,05–1,1	6546	М151 (4,5 кг фугасная); М229 (7,7 кг фугасная); М255А1 (с поражающими элементами), плюс варианты дымовой, осветительной и практической	экструдированное двухосновное NOSIH AA-2
CRV7 , Канада	70	8000	С-17, С-18/6,6	1030	1,72	8500	осколочно-фугасная М151; осветительная М257/258; кассетная противотанковая WDU-5002 (5 стреловидных ПЭ); кассетная общего назначения WDU-500Х (80 СПЭ); ОФ проникающая WDU-5001; практическая WTU-5001	смесевое безметалльное малодымное
FZ90 , Бельгия	70	9100 «земля – земля»)	FZ90 Mod.2S/6,3	680	1,07	6800	FZ71 (4,3 кг осколочная); FZ120 (4,3 кг учебная); FZ181 (4,3 кг осветительная); FZ122 и FZ149 (со стреловидными элементами, 2200 и 36 элементов соответственно); кассетная FZ100, 7 кг	экструдированное двухосновное бездымное, некоррозионное
SKYFIRE-70 , Бразилия	70	12 000	AV-SF-70 M10/8,6	700	0,9–1,75	7050	HE/M2 (осколочно-фугасная 6 кг); кассетная с 6 суббоеприпасами; со стреловидными ПЭ; с белым фосфором	смесевое
SNEB , Франция	68	3000	25F1B/5	600	0,7–0,8	–	фугасная; осколочная; противотанковая; со стреловидными элементами; дымовая; осветительная и учебная	экструдированное двухосновное
Medusa , Италия	81	12 000	–/8	650	0,85	–	Фугасная (масса ВВ 2 кг); осколочная (2000 стальных шариков, а также около 4000 осколков, образующихся при разрыве корпуса); противотанковая; кумулятивная. Бронепробиваемость составляет 450-мм. Кассетная с 11 суббоеприпасами	двухосновное малодымное
SuraD , Швейцария, Италия	80	12 000	–/8	650	0,7	5884	ОФ (HE); кумулятивная; зажигательная; целеуказательная; практическая. Масса БЧ до 7 кг.	двухосновное

Как видно из приведенных данных (таблица 2), за последние 30 лет эти ракеты значительно превзошли НАР С-8. Исключением из представленного списка ракет является французская 68-мм SNEB, которую нецелесообразно рассматривать в качестве прототипа, так как по основным характеристикам она существенно уступает НАР С-8.

Зарубежные аналоги НАР С-8 имеют лучшие значения по следующим характеристикам:

- суммарный импульс;
- скорость ракеты на активном участке траектории;
- дальность пуска;
- масса полезной нагрузки.

С учетом приведенных различий можно сделать вывод об использовании в иностранных НАР более эффективного топливного заряда, который на основании улучшенных базовых баллистических параметров твердого топлива и конструктивных особенностей топливной шашки обусловил необходимость соответствующих изменений конструкции ракетной части рассматриваемых образцов, как правило, дающих более высокие энергетические характеристики ракетного двигателя. В свою очередь увеличение энергетических характеристик ракетного двигателя создает благоприятные условия для улучшения боевых возможностей образца вооружения (увеличение дальности пуска, массы полезной нагрузки и т. д.).

В настоящее время существует два основных подхода по снаряжению ракетных двигателей НАР – это снаряжение гомогенным двухосновным пороховым или гетерогенным смесевым твердым ракетным топливом.

Большая часть производителей НАР по-прежнему используют двухосновные составы для изготовления топливных шашек. В целях повышения удельного импульса ракетного топлива в его состав вводят активные пластификаторы или высокоэнергетические материалы (гексоген, октоген и др.). Например, для 70-мм НАР **Hydra-70** (производство General Dynamics Armament and Technical Products, США) с двигателем МК66 Mod.6 разработан вкладной заряд экструдированного двухосновного топлива (NOSIN AA-2), выполненный в виде шашки с восьмилучевым внутренним каналом горения. Основные компоненты ракетного топлива – нитроцеллюлоза и нитроглицерин. Для образования плато горения в состав топлива добавляют цитрат свинца $Pb_3(C_6H_5O_7)_2$ (баллистический модификатор), а в качестве энергоемкого пластификатора используются 1,2,4-бутантриол тринитрат $C_4H_7O_9N_3$ [6].

Введение в состав ракетных топлив редких высокоэнергетических материалов требует соответствующего уровня развития химической науки и производства. Поэтому ряд производителей (Канада, Бразилия, последние модификации – Россия) используют в НАР более простые в изготовлении смесевые ракетные твердые топлива (СРТТ).

Смесевые составы в отличие от двухосновных топлив имеют более высокий удельный импульс тяги, обладают меньшей зависимостью скорости горения от начальной температуры заряда, а также способны к устойчивому горению при более низких давлениях – 1–2 МПа (для двухосновных топлив критическое давление от 3 до 6 МПа) [7].

В настоящее время в НАР С-8 в качестве источника энергии используется двухосновное топливо (ВИК-2Д или БНК), удельный импульс которого не превышает 160–180 с. За счет применения смесевых топлив удельный импульс может быть повышен на 20–25 % [7]. Однако применение смесевых ракетных топлив имеет ряд недостатков, которые ограничивают их применение в ракетных двигателях НАР.

Смесевое ракетное твердое топливо в своем составе имеет в качестве энергетической добавки мелкодисперсный сферический порошок алюминия или другого высокоэнергетического металла, его гидрида или бориды. Горение металлизированного СРТТ сопровождается высокотемпературным пламенем (более 3000 °С), дымностью и выбросом из сопла ракеты твердых частиц оксидов металлов [8]. Эти факторы на этапе пуска НАР оказывают разрушающее воздействие на внутренние стенки пусковой трубы

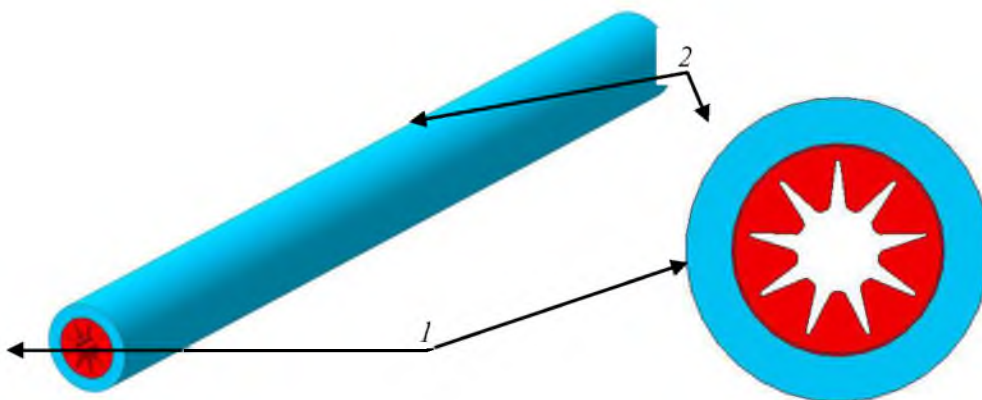
авиационного пускового устройства, элементы летательного аппарата, расположенные в непосредственной близости от авиационного пускового устройства, а при попадании в двигатель летательного аппарата – на его элементы, что может привести к их разрушению или помпажу двигателя.

В целях предотвращения помпажа авиационного двигателя от факела ракетного двигателя в состав СРТТ вводятся различные пламегасящие добавки (патенты US 3166896, US 2444957, US 4381270, RU 2225524, RU 2185356, US 6230626, RU 2425246 и др.). Однако введение таких добавок уменьшает значение удельного импульса ракетного топлива, что негативно сказывается на боевой эффективности НАР (уменьшении дальности применения, увеличении значения кругового рассеивания).

Введение пламегасящих добавок в состав СРТТ или дополнительных шашек пламегасящего состава в конструкцию топливного заряда также не предотвращает абразивного разрушающего воздействия вылетающих оксидов металлов на внутренние стенки пусковой трубы авиационного пускового устройства, элементы летательного аппарата, расположенные в непосредственной близости от авиационного пускового устройства, а при попадании в двигатель летательного аппарата – на его элементы.

Для снижения вероятности выброса частиц непрореагировавшего твердого топлива из сопла двигателя авиационных ракет с вкладным зарядом предложены различные конструктивные решения к профилированию поперечного сечения заряда (патент RU 2178092), способам скрепления заряда с внутренними стенками ракетного двигателя (патент RU 2298109), бронированию топливной шашки (патенты RU 2298109, RU 2355906), а также их сочетание. Указанные решения также не устраняют выброс твердых частиц оксида металла при горении СРТТ и не предотвращают их абразивно-разрушающее воздействие на элементы авиационного пускового устройства и летательного аппарата.

В целях повышения общего импульса НАР С-8 подобран состав СРТТ на основе гетерогенного композиционного материала. Для минимизации негативного воздействия продуктов сгорания компонентов топливного заряда на элементы вооружения и летательного аппарата разработана конструкция многослойной шашки СРТТ. В соответствии с разработанной конструкцией топливный заряд изготавливается в виде двухслойного цилиндра, бронированного по внешней поверхности с внутренним каналом горения в виде многолучевой звезды. Ортогональная проекция двухслойного заряда СРТТ и его сечение (сечение увеличено) показаны на рисунке 1. При этом бронирование заряда условно не показано.



1 – внутренний слой СРТТ; 2 – наружный слой СРТТ

Рисунок 1. – Ортогональная проекция двухслойного заряда СРТТ и его сечение

Сущность разработки заключается в обеспечении предложенной конструкцией заряда необходимого стартового импульса с последующим нарастанием тяги на маршевом участке работы РДТТ. При этом на старте за счет внутреннего слоя конструкции шашки (позиция 1 на рисунке 1), не содержащего компонентов, образующих твердые частицы в процессе горения СРТТ, исключается дымность выхлопной струи и абразивно-разрушающее воздействие на внутреннюю поверхность пусковой трубы авиационного

пускового устройства и элементы летательного аппарата. Наружный слой (позиция 2 на рисунке 1) может быть выполнен из состава, содержащего один или более высокоэнергетических металлов, их гидридов или боридов, чем обеспечивается максимальный импульс тяги.

В целях обеспечения лучшей адгезии между слоями топливные составы для внутреннего и наружного слоя целесообразно изготавливать на однотипном горючем – связующем.

Экспериментальная часть

В соответствии с предлагаемой конструкцией изготовлен топливный заряд из СРТТ, включающий полимерное горючее – связующее (ненасыщенную полиэфирную смолу) – 25 % по массе, энергетическую добавку – 5 % по массе, катализаторы горения и технологические добавки по 0,5 % по массе, окислитель (перхлорат аммония) – остальное. При этом наружный слой заряда СРТТ в качестве энергетической добавки включал мелкодисперсный сферический алюминий марки АСД-4, а внутренний слой – флегматизированный вторичный гексоген (А-IX-1). Объем СРТТ внутреннего слоя составил 30 % от общего объема топливной шашки.

СРТТ изготовлено в стандартном смесителе роторного типа. Используемые материалы: перхлорат аммония, полиэфирная смола, гексоген вторичный флегматизированный ТУ ВУ49031 6968014-2015, сферический порошок алюминия марки АСД-4 ТУ 48-5-226-87.

Предлагаемая конструкция двухслойного заряда СРТТ проверена моделированием и протестирована в ходе стендовых и натурных испытаний.

Время горения внутреннего слоя составило 0,4 с, а наружного – 0,8 с. При этом удельный импульс при горении внутреннего и наружного слоя составил 2294 Н·с/кг и 2420 Н·с/кг соответственно, а полный импульс – 7378 Н·с. Расчетная осевая перегрузка при горении внешнего слоя СРТТ составила 43,5 g, что достаточно для взведения взрывателя ракеты.

При горении внутреннего слоя СРТТ наблюдалась прозрачная небольшая по размеру выхлопная струя, а горение наружного слоя СРТТ сопровождалось увеличением факела выхлопной струи и визуально наблюдаемым выбросом раскаленных твердых частиц. Факел, полученный в ходе стендовых испытаний при горении внутреннего (а) и наружного (б) слоев разработанного ракетного топлива, показан на рисунке 2.

В целях проверки и подтверждения результатов моделирования и стендовых испытаний проводились реальные пуски экспериментального образца НАР, снаряженной топливной шашкой, изготовленной в соответствии с предлагаемой конструкцией. Пуски осуществлялись с наземного одноствольного пускового устройства. Боевая часть НАР изготавливалась в инертном снаряжении с общей массой до 4,5 кг.

Проведенные летные испытания экспериментальной НАР подтвердили результаты стендовых испытаний. Дальность пуска с наземного пускового устройства при углах возвышения пусковой трубы от 40° до 45° составила от 13 до 15 км. При этом в ходе летных испытаний установлено, что наиболее целесообразный объем внутреннего слоя составляет от 20 до 40 % от общего объема топливной шашки. Такой объем безметалльного топлива обеспечивает старт и разгон ракеты на дальность, исключаящую негативное воздействие остатков горения на элементы вооружения и летательного аппарата.



а – горение внутреннего слоя; *б* – горение наружного слоя

Рисунок 2. – Формирование факела пламени в ходе стендовых испытаний при горении двухслойной топливной шашки СРТТ

Применение заряда СРТТ с внутренним слоем менее 20 % от общего объема заряда повышает вероятность абразивно-разрушающего воздействия остатков прореагировавшего топлива на элементы летательного аппарата (прежде всего самолета), ввиду недостаточной дальности воспламенения наружного слоя топливного заряда от точки пуска. Применение заряда СРТТ с внутренним слоем более 40 % технически не оправданно, так как необоснованно ведет к снижению его полного импульса.

Второй слой СРТТ конструкции заряда с выходом ракеты на безопасное от летательного аппарата расстояние обеспечивает нарастание тяги, взведение взрывателя от осевой перегрузки и достижение авиационной ракетой требуемой дальности поражения. Образующийся в результате горения наружного слоя заряда факел позволяет экипажам летательного аппарата осуществлять корректировку исходных данных для последующего пуска авиационных ракет.

Выводы и формулирование дальнейших задач исследования

Полученные в ходе стендовых и натурных испытаний баллистические характеристики СРТТ соответствуют уровню, а по отдельным показателям (суммарный импульс) и превосходят зарубежные аналоги. В ходе летных испытаний подтверждена возможность использования в составе НАР С-8 двухслойной топливной шашки СРТТ с гарантированной степенью безопасности для авиационного пускового устройства и летательного аппарата в целом.

В то же время применение смесового топлива с более высокой температурой горения (у БНК – 1724 °С; у предлагаемой конструкции: внутренний слой – 2538 °С; наружный слой – 2765 °С) и большим временем горения (у штатной НАР С-8 – 0,7 с) требует доработки конструкции двигателя, обеспечивающего необходимый уровень надежности и безотказности НАР. Доработка конструкции двигателя при полученных энергетических характеристиках топлива позволит существенно увеличить дальность пуска ракеты и массу полезной нагрузки, а это соответствующим образом отразится на боевых возможностях системы вооружения в целом.

Полученная в ходе летных испытаний дальность пуска экспериментальной НАР (13–15 км) при увеличенной массе ее боевой части (4,5 кг) позволяет рассматривать данный образец как достаточно эффективное наземное средство поражения. В настоящее время

использование НАР в системах залпового огня малого калибра достаточно распространенная практика зарубежных производителей этого типа вооружения. Сведения об основных образцах таких систем приведены в таблице 3.

Определенный опыт применения НАР С-8 в качестве систем залпового огня наработан в ходе ряда локальных конфликтов конца XX – начала XXI веков. В наземном исполнении НАР С-8 впервые применили в Афганистане, затем – в Приднестровье, Нагорном Карабахе и Абхазии. В последние десятилетия их ставили на пикапы иррегулярные воинские формирования в арабских странах. Не стал исключением для применения С-8 в наземном исполнении и украинский конфликт.

Таблица 3. – Тактико-технические характеристики систем залпового огня малого калибра

Характеристики	LAU-97	MAKSAM	CRV-7	Спэммер-6	VAP	Фирос-6	SBAT-70
Страна	Бельгия	Турция	Канада	США	Египет	Италия	Бразилия
Тип шасси	самоходное (буксируемое)	буксируемое	буксируемое	самоходное (буксируемое)	самоходное	самоходное	буксируемое
Калибр, мм	70	70	70	70	80	51	70
Количество направляющих	40	40	19	19–114	12	48	36
Дальность стрельбы, км	8	7,4	10	11	8	6,5	7,5
Масса в боевом положении, т	2 (0,93)	1,69	0,5	2 (1)	1,2	2,67	4

Регулярное постоянство использования НАР С-8 в наземном варианте позволяет утверждать о давно назревшей потребности в таком образце вооружения в механизированных и мотострелковых подразделениях. Это подтверждается опытом ряда государств на постсоветском пространстве, которые по различным причинам вели военные действия уже в XXI веке. Так, на базе НАР С-8 созданы РСЗО или ее элементы в составе наземного боевого комплекса в Азербайджане, Грузии, Украине (в том числе и совместно с Польшей) [2].

Таким образом, дальнейшее развитие НАР С-8 предполагает решение следующих задач:

создание новой конструкции ракетного двигателя с учетом характеристик разработанного топлива;

разработка промышленной технологии изготовления топливной шашки СРТТ в соответствии с предложенной конструкцией;

разработка нового пиротехнического состава смеси воспламенительного устройства, обеспечивающей воспламенение ракетного топлива в заданных временных интервалах;

определение типов и разработка линейки различных по функциональному назначению боевых частей ракеты, разработка и изготовление специального технологического оборудования, испытательных стендов и макетов.

В свою очередь разработка отечественной системы, обеспечивающей возможность применения НАР в наземном варианте, обуславливает необходимость дополнительного решения следующих задач:

принятие соответствующего решения на уровне Министерства обороны как потенциального потребителя подобного средства вооруженной борьбы;

формирование облика боевой системы, в том числе определяющего требования к ее эксплуатации и обслуживанию;

разработка способов применения готового изделия в различных видах боевых действий;

разработка пусковой установки с механизмами прицеливания и наведения;
определение базового транспортного средства для монтирования пусковой установки;
определение порядка транспортировки ракет, перезаряжания пусковой установки
и разработка соответствующих устройств и приспособлений;
обеспечение необходимой точности поражения цели, в том числе и на максимальной
дальности пуска;
разработка таблиц и правил стрельбы, методик оперативно-тактических расчетов
планирования применения созданного класса вооружения;
решение других сопутствующих конструкторских, технологических,
эксплуатационных и организационных задач.

Заключение

Резюмируя изложенное, отметим, что основными направлениями развития НАР С-8, требующими глубокой теоретической проработки и многократной практической апробации, являются разработка промышленной технологии изготовления кардинально новой топливной шашки СРТТ и доработка ракетного двигателя под баллистические характеристики изготовленного топлива. Реализация этих направлений создаст основу для изготовления линейки отечественных НАР с различной целевой нагрузкой, не уступающей наиболее перспективным мировым аналогам, применение которых будет возможным как с борта летательного аппарата, так и с наземного пускового устройства.

Список использованных источников

1. НПО «Сплав» представило на МАКС-2017 неуправляемую авиационную ракету нового поколения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.aex.ru/news/2017/7/18/172512>. – Дата доступа : 19.07.2017.
2. Украинско-польский ракетный комплекс «Маргаритка» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://headnews.net/news-ukraine-europe-world/today-news-4005>. – Дата доступа : 10.09.2017.
3. Неуправляемые авиационные ракеты С-8 и С-8В / Техническое описание и рекомендации по подготовке к применению. – М. : Воениздат СССР, 1977. – 47 с.
4. Неуправляемый реактивный снаряд С-8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://xn--80aafy5bs.xn--p1ai/aviamuseum/dvigateli-i-vooruzhenie/aviatsionnoe-vooruzhenie/sssrg/aviatsionnye-rakety/neupravlyaemye-rakety/neupravlyaemyj-reaktivnyj-snyad-s-8>. – Дата доступа : 17.09.2017.
5. Hydra 70, CRV7, FZ90, SNEB, HSS-R80, Sura, SKYFIRE-70 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://en.wikipedia.org/wiki>. – Дата доступа : 19.09.2017.
6. About the Hydra-70 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.fi-aeroweb.com/Defense/Hydra-70-Rocket.html>. – Дата доступа : 13.10.2017.
7. Энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы на полимерной основе. Некоторые проблемы разработки и пути их решения / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия : Респ. межвед. сб. науч. трудов / редкол. : А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск : НАН Беларуси, 2016. – Вып. 39. – С. 12–16.
8. Энергетические добавки в составе смесевых энергонасыщенных композиционных гетерогенных материалов / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка : сб. докл. 10-го Междунар. симпозиума. – Минск : Беларуская навука, 2017. – С. 429–440.

*Сведения об авторах:

Ильющенко Александр Федорович,
Кривонос Олег Константинович,
Петюшик Евгений Евгеньевич,
ГНПО порошковой металлургии;
Конопляник Виктор Анатольевич,
ГНУ «Институт порошковой металлургии».
Статья поступила 27.11.2017 г.

ИЗУЧЕНИЕ АДСОРБЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НА НАНОУГЛЕРОДНОМ АДСОРБЕНТЕ ДЛЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ

Н. А. Макаревич, доктор химических наук, профессор;

А. В. Черный;

Н. И. Богданович, доктор технических наук, профессор;

С. И. Третьяков, кандидат технических наук, профессор;

Е. А. Лагунова;

А. А. Шутова*

В статье представлены результаты исследования равновесной адсорбции азота при 77К и кинетики адсорбции паров органических растворителей – углеводов, кетонов, спиртов и воды микропористым углеродным адсорбентом при 293К, 303К. Рассчитаны коэффициенты диффузии n-углеводородов.

Results of a research of equilibrium adsorption of nitrogen at 77 K and kinetics of adsorption of vapors organic substances at 293 K, 303 K on microporous carbon adsorbent for individual protection equipment of respiratory organs are presented in article. Coefficients of diffusion of n-hydrocarbons are provided.

Введение

Одной из важнейших задач, стоящих перед исследователями адсорбционных процессов и разработчиками специальных технических средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) и зрения – противогазов и респираторов, является обеспечение санитарно-гигиенических норм, предъявляемых к этому виду вооружения, и увеличение эффективности его действия. Последнее, практически, можно достигнуть за счет повышения условного времени защитного действия СИЗОД от ядовитых паров и газов [1], применяя современные научные подходы, например достижения в области наноматериалов и нанотехнологий [2–4] в сочетании с традиционными модельными представлениями реальных адсорбционных процессов [11,12].

Основным компонентом для снаряжения фильтрующих коробок фильтрующих противогазов военного и гражданского назначения, а также некоторых видов респираторов служит адсорбент – активный уголь (АУ). Наиболее универсальными адсорбентами являются составы, включающие как простой, так и импрегнированный кислотами, серой, серебром, карбонатами металлов Cu, Mo, Zn, Mn и другими активированный уголь различных марок (древесный, косточковый, коксовый, торфяной и т. д.). Фильтрующие коробки не универсальны, требуют замены по мере их отработки. Время защитного действия ($\tau_{пр}$, мин) фильтра определяется составом адсорбента, прежде всего его пористой структурой, удельной поверхностью $S_{уд}$ и различается от нескольких суток до десятков минут в зависимости от вида загрязнителя (отравляющего вещества), концентрации загрязнения окружающей среды. Эффективными адсорбентами считаются те, у которых пористая структура представлена преимущественно микро- и супермикропорами [2–4]. Область размеров (диаметра или ширины) микропор распределена на ультрамикропоры (собственно микропоры) – 1,2–1,4 нм и супермикропоры – от 1,2–1,4 до 3,0–3,2 нм. Поры с эффективными размерами в интервале ($3,0-3,2 < r < 100-200$ нм) выделены в класс мезопор. Мезопоры и макропоры в адсорбенте необходимы для транспорта (диффузии) адсорбата (загрязнителя) в микро- и супермикропоры. Современные порошкообразные микропористые адсорбенты могут достигать удельной поверхности $2000 \text{ м}^2/\text{г}$ и выше. Однако в промышленных адсорбентах эти значения пока не достижимы, так как для получения необходимой по ГОСТ механической прочности гранул адсорбента приходится жертвовать величиной удельной поверхности [10, 14].

На современном европейском [4] и российском рынках продукции [14–16], предназначенной для индивидуальной защиты органов дыхания, представлен широчайший спектр изделий противогазов и респираторов, различающимися функциональным назначением и дизайном. Принципиального различия этого вида продукции между военным и гражданским назначением нет, однако качество военной продукции, по понятным причинам, заметно выше. Следует отметить, что в настоящее время в РФ вся продукция для СИЗОД сертифицирована в соответствии с Международной системой стандартизации (The International Organization for Standardization (ISO)).

Представленный на рисунке 1 противогаз ПМК-4 – модернизированный противогаз ГП-7 с фильтрующе-поглощающей коробкой ГП-7кБ (ТУ 2568-090-00149392-2007), превосходящей по защитным характеристикам лучшие зарубежные СИЗОД.



Рисунок 1. – Маска противогаза ПМК-4 российского производства с фильтрующей коробкой высокоэффективного действия (Международный военно-технический форум – 2017, Москва)

Время защитного действия промышленных и военных противогазов от сильнодействующих ядовитых веществ (СДЯВ) зависит от состава сорбента, которым снаряжают фильтрующие коробки, вида и концентрации вредных веществ. Например, коробка с фильтром противогаза марки КД при концентрации аммиака в воздухе $2,3 \text{ г/м}^3$ защищает в течение 4 ч, коробка при концентрации оксида углерода $6,2 \text{ г/м}^3$ – 1,5 ч. Противогаз марки Г при концентрации насыщенных паров ртути $0,01 \text{ г/м}^3$ – 1 ч 20 мин, а коробка с фильтром и без фильтра с индексом 8 – 1 ч 40 мин [14].

Несмотря на длинную линейку выпускаемых различными странами изделий для средств индивидуальной защиты органов дыхания на основе активных углей, всех их отличает сравнительно низкая удельная поверхность около $800\text{--}900 \text{ м}^2/\text{г}$. Для достижения прогресса в производстве высокоэффективных фильтров для СИЗОД, а также, например, для суперконденсаторов [7] необходимы принципиально новые подходы. И они современной наукой обозначены. Это наноматериалы с размерами частиц менее 100 нм, при которых свойства по сравнению с традиционно получаемыми материалами качественно изменяются. Изделия из таких материалов значительно дороже аналогичных по своему применению. Но одним из путей по снижению стоимости наноматериалов для адсорбентов может быть использование отходов крупнотоннажных производств. Такими производствами являются предприятия целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП).

Проводя исследования по созданию СИЗОД, необходимо учесть, что в основе расчета процесса адсорбции лежат закономерности статистики, кинетики и динамики процесса [1, 11, 13]:

для характеристики адсорбционных свойств пористых тел используют равновесную изотерму адсорбции исследуемого вещества ($A_p = f(C)$), показывающую зависимость величины адсорбции A_p от равновесной концентрации C ;

для расчета процесса адсорбции используют кинетические кривые $A = f(\tau)$, показывающие степень приближения адсорбционного процесса к равновесному состоянию, где τ – текущее время адсорбции;

в динамических условиях, когда поток газа с заданной концентрацией поглощаемого вещества фронтом (последовательным перемещением профиля адсорбции от одного элементарного слоя адсорбента к другому) проходит через реальный стационарный слой адсорбента высотой H , м, определяют время защитного действия $\tau_{пр}$, согласно эмпирическому уравнению Н. А. Шилова [1], являющегося линейной функцией высоты адсорбционного слоя:

$$\tau_{пр} = KH - \tau_0, \quad (1)$$

где $\tau_{пр}$ – время, в течение которого сорбент задержал определенное количество адсорбата до момента его «проскока» на выходе из фиксированного слоя адсорбента высотой H ;

K – коэффициент защитного действия слоя, с/м;

τ_0 – потеря времени защитного действия, связанная с начальным периодом формирования фронта распределения адсорбата, мин.

Средняя концентрация адсорбтива во всем слое адсорбента, достигнутая к моменту «проскока» – динамическая активность A_d , г/м³, а работающий участок слоя – зона массопередачи [11, 12]. Важнейшей характеристикой в уравнении (1) является K , величина которого зависит от физико-химической природы адсорбента и адсорбата. Причем чем выше величина удельной поверхности $S_{уд}$, м²/г, активного угля, тем выше и величина равновесной адсорбции C , выше и коэффициент защитного действия адсорбционного слоя K , следовательно, выше и $\tau_{пр}$. В свою очередь, скорость продвижения адсорбционного фронта поглощаемого вещества $V = 1/K$ – величина, обратно пропорциональная K , следовательно, «отравление» адсорбента протекает медленнее, выше и срок службы СИЗОД. Поэтому при выборе эффективного адсорбента, при прочих равных условиях, прежде всего ориентируются на величину $S_{уд}$. Но при этом необходимо учитывать, что при технологических расчетах процесса адсорбции главную роль выполняют кинетические зависимости адсорбции $A = f(\tau)$, позволяющие получать равновесные значения A_p и рассчитывать коэффициенты диффузии $D_{эф}$, необходимые для прогнозирования времени защитного действия адсорбента.

Цель исследования – выбор эффективного микропористого наноглеродного адсорбента для СИЗОД, его адсорбционная характеристика и изучение кинетики адсорбции $A = f(\tau)$ некоторых органических веществ, взятых в качестве тестов адсорбционной активности исследуемых АУ с получением констант скоростей и коэффициентов диффузии адсорбатов.

В статье выбраны полученные нами ранее нанопористые активные угли из черного щелока сульфатной варки древесины методом термохимической активации [6, 7], отличающиеся смешанной микро-, супер- и мезопористой структурой и пригодные для работы в газовых и жидких средах, прежде всего для воздушных фильтров в СИЗОД, а также в процессах очистки питьевой воды и сточных вод, в качестве электродных материалов в производстве суперконденсаторов, косметологии, фармации и др.

Методика и результаты исследований

Для характеристики исследуемых АУ были получены изотермы равновесной адсорбции азота $A = f(P/P_0)$ и распределение пор по размерам нанопористых адсорбентов АУ на приборе ASAP 2020 MP производства США методом низкотемпературной адсорбции азота при 77 К и относительном давлении P/P_0 от 0 до 1. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 2 и в таблице 1.

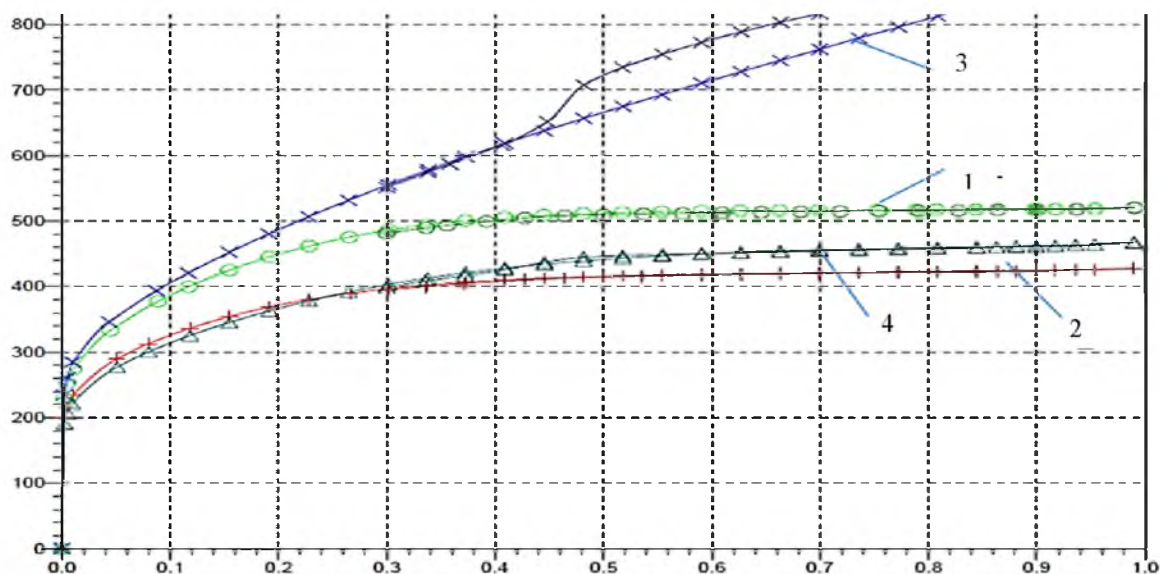


Рисунок 2. – Изотермы низкотемпературной адсорбции азота на нанопористых АУ

На рисунке 2 представлены изотермы адсорбции N₂ на четырех образцах нанопористых адсорбентов термохимической активации черного щелока. Черный или сульфатный щелок – отработанный раствор, образующийся после завершения варки целлюлозы из хвойных или лиственных пород древесины и представляющий собой сложную смесь органических и неорганических веществ. Адсорбенты получены практически из отхода крупнотоннажного производства целлюлозы сульфатным методом – самым распространенным в мире.

Полученные изотермы относятся к I типу по классификации Брунауэра [2, 4], характерные для микропористых твердых тел, содержащих в значительном количестве мезопоры.

Образцы 1, 2 и 4 представлены преимущественно микропорами, поскольку после первоначального крутого восхождения изотермы выходят практически на плато. Лишь образец 3 характеризуется наличием четкого гистерезиса в интервале относительных давлений от 0,45 до 0,95, что указывает на высокое содержание мезопор. Кроме того, изотерма этого образца не выходит на плато и характеризуется постепенным подъемом во всем интервале относительных давлений.

Таблица 1. – Результаты анализа удельной поверхности и пористости по общепринятым методам обработки адсорбционных данных

Номер образца	Уд. площадь поверхности по методу ВЕТ, м ² /г	V _{micro} по методу Н-К, см ³ /г	Уд. площадь поверхности мезопор по методу ВЖН, м ² /г	Общий объем пор/объем микропор по методу ВЕТ, см ³ /г	Ср. размер микропор по методу Н-К, нм
1	1438	0,62	129	0,81/0,62	1,15
2	1166	0,52	96	0,66/0,52	1,15
3	1710	0,65	774	1,15/0,65	1,16
4	1208	0,50	204	0,72/0,50	1,17

Изотермы адсорбции-десорбции азота использовались для расчета параметров пористой структуры следующими методами: удельная поверхность образцов $S_{уд}$ рассчитывалась по известному методу Brunauer – Emmet – Teller (BET); по десорбционной ветви изотермы определяли объемы мезопор и их распределение по размерам методом Barrett – Joyner – Halenda (BJH), объемы и распределение микропор по размерам в исследованных образцах оценивались методами Horvath – Kawazoe (H-K) [3].

Из таблицы 1 видно, что активные угли, полученные из черного шелока методом термохимической активации, отличаются высокой удельной поверхностью, достигающей по BET 1710 м²/г (образец 3). Объем микропор составляет при этом 56...78 % от общего объема пор, причем размер микропор – около 1,15...1,17 нм, что четко характеризует их как смешанную структуру микро и супермикропор.

Для сравнения с полученными образцами был взят широко используемый на практике промышленный образец активного угля СКТ-2 ТУ 2162-029-79906011-2011, у которого V_{micro} по методу H-K составил 43 см³/г; $V_{общ} = 67$ см³/г; $S_{уд} = 564$ м²/г, а $\tau_{пр}$ по ацетону – 68 мин.

Изучение кинетики адсорбции предельных углеводородов (н-пентан, н-гексан, н-гептан и н-декан), кислородсодержащих органических соединений (этанол, изобутанол, н-бутанол, ацетон, метилэтилкетон) и воды в неподвижном слое АУ при температуре 293 К в целях определения констант скорости адсорбции, коэффициентов внутренней диффузии и оценки природы поверхности АУ смешанной микро- и мезопористой структуры проведено на образце 3. Для этого брали навеску образца примерно по 0,1 г, предварительно тренированного АУ в сушильном шкафу при температуре 120 °С, взвешивали с точностью до 0,0003 г. Навеску переносили в специальную корзинку массой около 200 мг, подвешенную на тонкой шелковой нити. За петлю нити корзинку подвешивали к крючку в днище электронных весов, предварительно взвешивали и помещали в закрытую колбу с узкой прорезью и отверстием в крышке над исследуемым растворителем. Эксперимент проводили в изотермических условиях, с регулированием температуры $\pm 0,2$ °С, при которых для каждого растворителя характерна своя упругость насыщенных паров, сохраняющаяся постоянной при данной температуре. Взвешивание корзинки производили либо вручную через 0,5, 1, 2, 4, 30 мин и в последующем каждый час в течение 3–4 и через 24 ч, либо записывали кинетическую кривую адсорбции в автоматическом режиме на компьютере, подключенном через интерфейс к электронным весам. В условиях эксперимента парциальное давление паров адсорбтива практически равно давлению насыщенного пара, а скорость массопередачи определяется массопереносом в порах адсорбента.

Адсорбцию паров определяли по формуле

$$A = \frac{m_1 - m_2}{m_n} 1000,$$

где m_1 – масса корзинки с навеской АУ после взаимодействия с адсорбатом;

m_2 – масса корзинки с навеской угля до взаимодействия с адсорбатом;

m_n – масса навески;

1000 – переводной коэффициент для A , г/г.

На рисунке 3 представлена зависимость адсорбции A органических веществ (пропан, гексан, гептан, декап, этанол, н-бутанол, изобутанол, ацетон, метилэтилкетон и вода) на АЧ от продолжительности процесса при температуре 293 К.

По адсорбционной активности (максимальные, приближенные к равновесным, значения) адсорбаты располагаются в следующий ряд: н-бутанол < вода < декан << этанол < гептан < гексан < пентан < изобутанол < метилэтилкетон < ацетон. Кетоны и углеводороды относят к IV классу опасности. Именно пары этих органических соединений эффективно поглощает сорбент и, что важно, слабо поглощает пары воды, содержащиеся во влажном воздухе и оказывающие конкуренцию в реальной адсорбции.

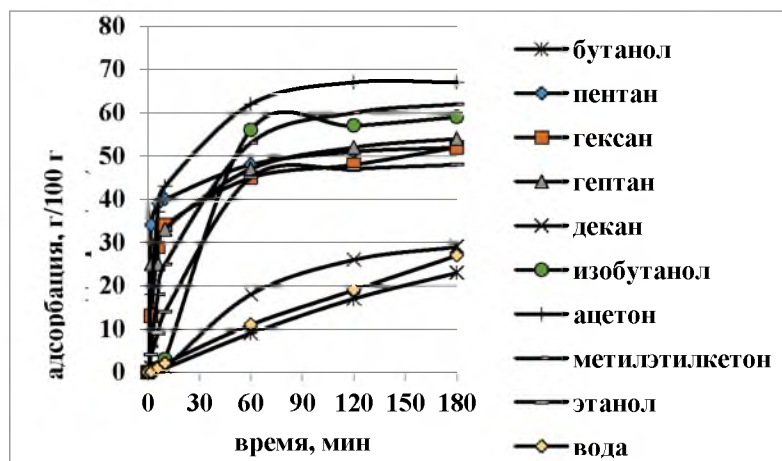


Рисунок 3. – Кинетика адсорбции органических веществ и воды на нанопористом АУ смешанной микро- и мезопористой структуры при 293К

Кроме того, установлено, что величины адсорбции при 303 К практически в 2 раза выше, чем при адсорбции 293 К (рисунок 4).

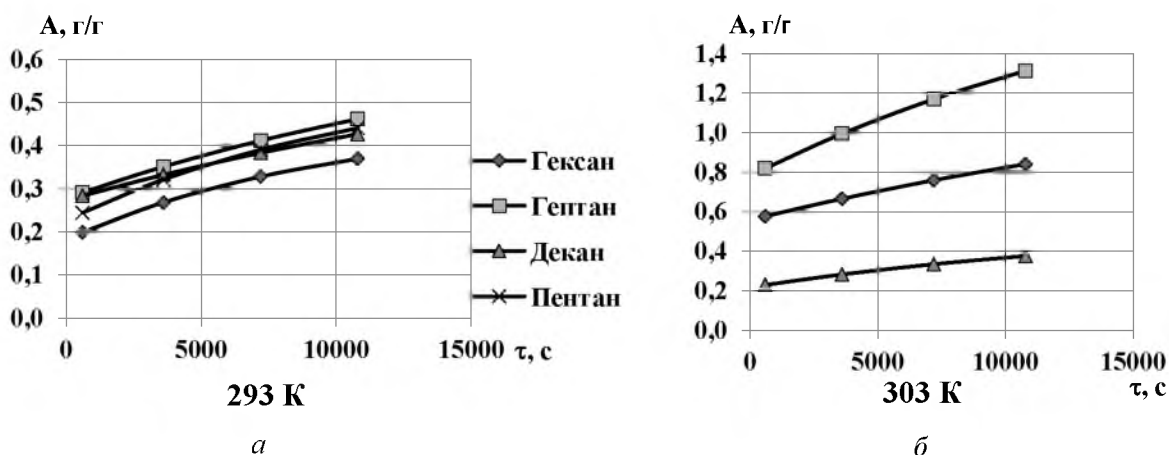


Рисунок 4. – Зависимость адсорбции n-углеводородов на АУ от продолжительности процесса при температуре 293 К (а) и 303 К (б)

На основании полученных экспериментальных результатов (рисунки 3 и 4) могут быть определены: константы скорости адсорбции, коэффициенты диффузии, энергии активации, степени гидрофобности и гидрофильности адсорбентов термохимической активации [4, 9].

Краткое теоретическое обоснование кинетики адсорбции на пористом материале

При описании внутридиффузионной кинетики физической адсорбции можно применить модель квазигомогенного пористого тела. Решения этих уравнений для постоянных коэффициентов диффузии хорошо изучены в [8, 11–13], и для гранул адсорбента правильной геометрической формы получены аналитические решения.

Считая процесс адсорбции внутридиффузионным и принимая форму частиц угля, близкой к шарообразной, кинетику процесса можно приближенно описать по уравнению для идеального процесса [8]:

$$E = B \exp(-k^* \tau), \text{ или } E = B \exp\left(-\pi^2 D^* \frac{\tau}{R^2}\right), \quad (2)$$

где симплекс $E = 1 - a/a_p$, a – текущая, a_p – равновесная адсорбция;

k^* – кажущаяся (эффе́ктивная) константа скорости адсорбции;

B – предэкспоненциальный экспериментальный множитель, зависящий от природы адсорбционной системы;

D^* – кажущийся (D_e – эффективный) коэффициент внутренней диффузии, м²/с;

τ – продолжительность адсорбции, с;

R – приведенный радиус частиц угля, м.

Значения D^* в модельном приближении для шара рассчитываются из выражения

$$k^* = \pi^2 D^* / R^2. \quad (3)$$

Уравнение (2) не учитывает пористость и природу поверхности адсорбента, но значения коэффициентов внутренней диффузии D^* могут быть использованы для расчета продолжительности процесса адсорбции в реальных условиях (время защитного действия адсорбента τ) для задаваемой величины адсорбции различных веществ, например в фильтрах средств индивидуальной и коллективной защиты органов дыхания, а также любых других реальных адсорбционных процессах как удобная технологическая (но не термодинамическая) характеристика:

$$\tau = \frac{R^2}{D_e \pi^2} \ln \frac{0,608}{E}. \quad (4)$$

Адсорбционный процесс (рисунок 5) удовлетворительно (коэффициенты достоверности $R^2 \geq 0,9$) описывается уравнением (2). $E = 0,3663 \exp(-1 \cdot 10^{-4} \tau)$ при $R^2 = 0,945$, из которого найден $k^* = 1 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$, а D легко вычисляются из (3) по задаваемым приведенным размерам частиц предварительно измельченного на шаровой мельнице адсорбента.

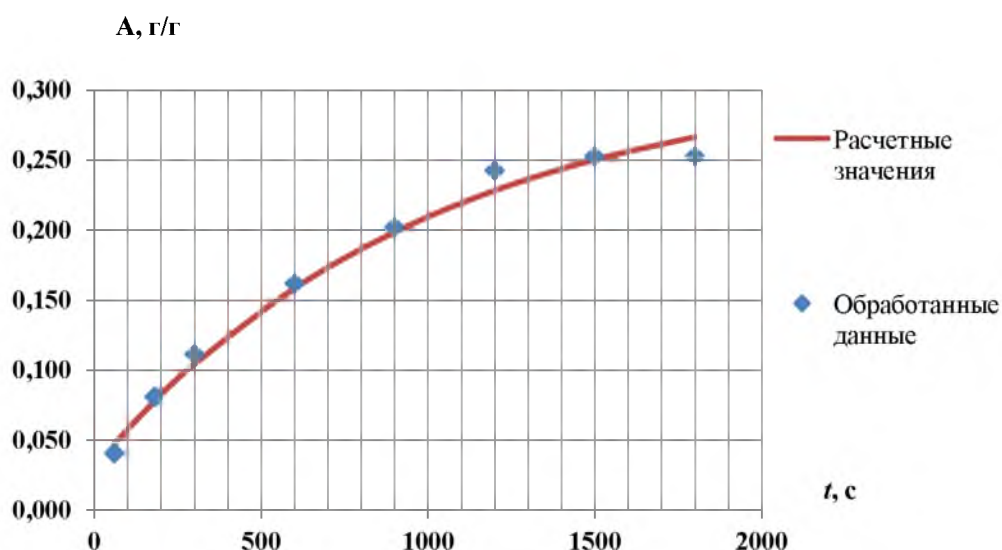


Рисунок 5. – Зависимость адсорбции гексана от продолжительности обработки угля при 293К

Коэффициенты диффузии можно найти также, логарифмируя (2) с получением линейной зависимости

$$\ln E = \ln B - \pi^2 D \frac{\tau}{R^2}, \quad (5)$$

из которой находят коэффициенты диффузии D по зависимости $\ln E$ от τ , приведенной на рисунке 6.

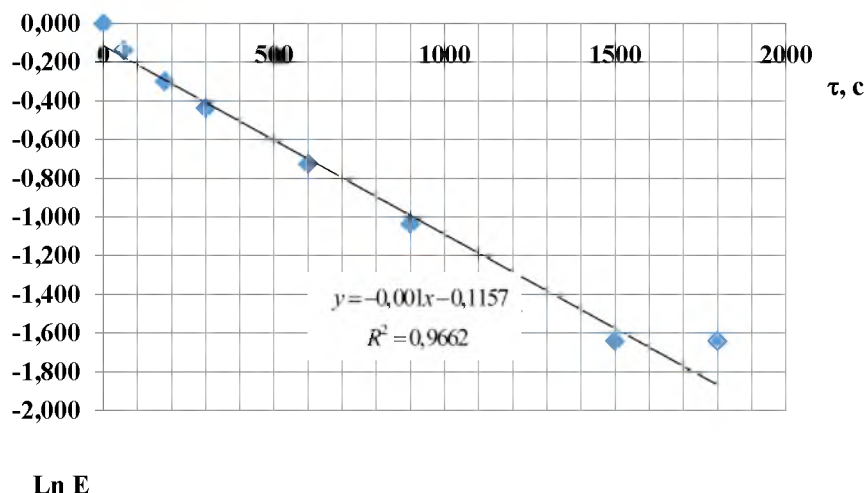


Рисунок 6. – Зависимость $\ln E = f(\tau)$ при адсорбции гептана активным углем

Из графика видно, что для гексана в исследуемом временном диапазоне зависимость линейная, следовательно, процесс адсорбции протекает по регулярному режиму, характерному для внутридиффузионной кинетики. Коэффициент аппроксимации составляет 0,97.

Коэффициент внутренней диффузии D рассчитывается по тангенсу угла наклона аппроксимирующей прямой. Для гексана $D = 2,56 \cdot 10^{-12}$ м²/с. Затем по величине коэффициента диффузии с помощью (2) рассчитывается степень «недонасыщения» и по ней величина адсорбции в данный момент времени.

Расчетные коэффициенты внутренней диффузии D для других углеводородов при двух температурах приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Расчетные коэффициенты внутренней диффузии D углеводородов

Углеводород	Коэффициент внутренней диффузии D , 10^{-12} м ² /с	
	293 К	303 К
н-пентан	2,22	–
н-гексан	2,56	0,93
н-гептан	1,30	1,36
н-декан	1,06	1,50

В процессе эксперимента установлено, что величины коэффициентов диффузии на разных стадиях адсорбции органических веществ на АУ могут принимать разные значения на начальной стадии адсорбции (быстрая адсорбция в микропорах – около 2 мин), на промежуточной и заключительной (медленная адсорбция в мезопорах – от 2...5 мин до 3...4 ч и более суток). В динамических условиях реального адсорбционного процесса при определении времени защитного действия по уравнению (1), как правило, на экспериментально получаемой зависимости $\tau_{пр} = f(H)$ до момента τ_0 (индукционный период) наблюдают экспоненциальный ход кривой с переходом в строго линейную зависимость. На этом и выстраивается методика измерения $\tau_{пр}$. Нами установлено, что в сопоставимых условиях на исследуемом мезосупермикропористом образце время его защитного действия по ацетону 170 мин значительно превосходит аналогичное время промышленного образца СКТ-2 68 мин. Это касается и структурных характеристик сравниваемых образцов: общего объема микропор и удельной поверхности.

На основании полученных экспериментальных и расчетных характеристик наномикропористых активных углей термохимической активации черного щелока можно утверждать, что этот класс активных углей более чем в два раза превышает по величине удельной поверхности и по времени защитного действия угли, применяемые для вооружения

в штатных составах фильтров для СИЗОД, имеет высокую долю микро- и супермикропор и достаточный объем мезопористой структуры для диффузии адсорбата в микропоры. Исследуемые АУ могут быть рекомендованы для дальнейших испытаний в целях изготовления более эффективных фильтрующих устройств в СИЗОД.

Выводы:

1. Методом термохимической активации синтезированы наноразмерные активные угли со смешанной микро-, супер-, и мезопористой структурой на основе черного щелока крупнотоннажного производства целлюлозы из хвойных и лиственных пород древесины.

2. По низкотемпературной адсорбции азота (77 К) на сорбтометре ASAP 2020 МР определены удельные поверхности синтезированных углей, размеры и распределение пор по размерам и установлено, что сорбенты относятся либо к типичной наномикропористой, либо к смешанной микро-, супер- и мезопористой структуре.

3. Предложена методика исследования и расчета кинетики адсорбции насыщенных в изотермических условиях паров органических растворителей и воды. В статическом режиме изучена кинетика адсорбции углеводородов, кетонов, спиртов, и воды активным углем со смешанной микро-, супер- и мезопористой структурой. Определены коэффициенты диффузии нормальных углеводородов в наномикропористом адсорбенте. Установлено, что при достижении определенного времени кинетика процесса адсорбции с достаточной точностью характеризуется регулярным режимом, что в значительной степени упрощает расчет параметров реального процесса адсорбции и позволяет прогнозировать его протекание.

4. Изученные адсорбенты могут быть рекомендованы для дальнейших испытаний в целях изготовления эффективных фильтрующих устройств в СИЗОД.

Список использованных источников

1. Шилов, Н. А. К вопросу об адсорбции постороннего газа из тока воздуха / Н. А. Шилов, Л. Н. Лепинь, С. А. Вознесенский // ЖРФХО. – 1964. – Т. 61, № 7. – С. 1107–1123.

2. Фенелонов, В. Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов / В. Б. Фенелонов. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск : СОРАН, 2004. – 442 с.

3. Елисеев, А. А. Функциональные наноматериалы / А. А. Елисеев, А. В. Лукашин ; под ред. акад. Ю. Д. Третьякова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 456 с.

4. Макаревич, Н. А. Теоретические основы адсорбции : учеб. пособие / Н. А. Макаревич, Н. И. Богданович. – Архангельск : САФУ, 2015. – 362 с.

5. Gorzkowska-Sobas, A. A. Adsorption performance of activated carbon towards toxic industrial chemicals [Electronic resource] / A. A. Gorzkowska-Sobas, K. M. Bjørge // Norwegian Defence Research Establishment (FFI). – 2015. – April. – Mode of access : <https://www.ffi.no/no/Rapporter/14-02304>.

6. Пиролиз черного щелока с получением активных углей и регенерацией химикатов / Е. А. Лагунова [и др.] // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., 26–28 нояб. 2014 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск : БГТУ, 2014. – С. 127–131.

7. Богданович, Н. И. Углеродные адсорбенты на основе лигноцеллюлозных материалов / Н. И. Богданович, Ю. А. Саврасова, Н. А. Макаревич // ИВУЗ «Лесной журнал». – 2012. – № 1. – С. 107–112.

8. Макаревич, Н. А. Экспоненциальное кинетическое уравнение адсорбции, экстракции, сушки / Н. А. Макаревич, Н. И. Богданович, С. И. Третьяков // Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57. – Вып. 7. – С. 108–112.

9. Белецкая, М. Г. Технология углеродных адсорбентов. Физико-химический анализ активных углей : учеб. пособие / М. Г. Белецкая, Н. И. Богданович, Н. А. Макаревич. – Архангельск : САФУ, 2015. – 96 с.
10. Мухин, В. М. Активные угли России / В. М. Мухин, А. В. Тарасов, В. Н. Клушин. – М. : Металлургия, 2000. – 353 с.
11. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1984. – 592 с.
12. Рудобашта, С. П. Карташов, Э. М. Диффузия в химико-технологических процессах / С. П. Рудобашта, Э. М. Карташов. – М. : Колос, 2010. – 478 с.
13. Фролов, В. Ф. Процессы и аппараты химической технологии: курс лекций / В. Ф. Фролов. – Л. : ХИМИЗДАТ, 2008. – 288 с.
14. Средства индивидуальной защиты органов дыхания : справ. рук-во / П. И. Басманов [и др.]. – СПб. : Искусство России, 2002. – 400 с.
15. Олонцев, В. Ф. Российские промышленные противогазы и респираторы : каталог-справ. / В. Ф. Олонцев. – Пермь : ГУ Пермского ЦНТИ, 2005. – 79 с.
16. Вознесенский, В. В. Средства защиты органов дыхания и кожи / В. В. Вознесенский. – М. : Воен. знания, 2013. – 80 с.

*Сведения об авторах:

Макаревич Николай Анатольевич,
Черный Александр Васильевич,
УО «Военная академия Республики Беларусь»;
Богданович Николай Иванович,
Третьяков Сергей Иванович,
Лагунова Елена Анатольевна,
Шутова Анна Андреевна,
Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова.
Статья поступила в редакцию 11.12.2017 г.

ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОЙ ПЕДАГОГИКИ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ

УДК 355. 233. 231

ИНФОРМАЦИЯ КАК СРЕДСТВО НАСИЛИЯ

- В. А. Ксенофонтов, кандидат философских наук, доцент,
профессор АВН Российской Федерации;
С. В. Верлуп, кандидат юридических наук, доцент,
профессор АВН Российской Федерации;
А. Г. Тицкий, кандидат психологических наук*

В статье обобщаются и рассматриваются взгляды на сущность и характер информационно-психологического оружия как средства информационного противоборства, а также подходы к его классификации. Систематизированы и расширены представления об актуальных возможностях информационного оружия как одного из главных инструментов современных и будущих войн, выработаны положения, способствующие уяснению и всестороннему осмыслению его особенностей и специфики, требующих учета при решении Вооруженными Силами Республики Беларусь задач по предназначению.

The article summarizes and analyses the views on the essence and nature of information confrontation in the context of ensuring the national security of the State. Particular attention is paid to the information-psychological weapons. Approaches to its classification are described. Views on the actual possibilities of information weapons under conditions of modern warfare are systematized. Proposals to further theoretical and practical solution of security problems in the military sphere are developed.

В условиях становления современного глобального сверхобщества и трансформации насилия актуализировался вопрос о формировании нового механизма власти, который позволил бы осуществлять контроль и принудительную нормализацию поведения целых государств, их союзов, неправительственных организаций, криминальных, террористических, иных национальных и транснациональных структур в составе системы международных отношений, организованных по сетцентрическому принципу [1, с. 164].

Республика Беларусь в силу своего геополитического положения и открытости «в полной мере подвержена воздействию большинства происходящих в мире геополитических процессов» [2, с. 7] и включена в глобальное противоборство между Западом и Востоком. Кроме того, «происходит эволюция информационного противоборства как новой самостоятельной стратегической формы глобальной конкуренции» [2, с. 6].

Как отмечается в Военной доктрине Республики Беларусь, «Использование информационно-коммуникационных и информационно-психологических методов и технологий в агрессивных целях приобретает угрожающие масштабы» [3, ст. 9]. Одним из основных направлений строительства военной организации государства как основного инструмента военной политики на современном этапе является «совершенствование идеологической работы в целях достижения и поддержания высокого морального духа военнослужащих и гражданского персонала, воспитания у граждан Республики Беларусь чувства патриотизма, укрепления законности, правопорядка и воинской (трудовой) дисциплины среди военнослужащих (служащих, сотрудников, работников) структурных компонентов военной организации государства» [2, ст. 39.7].

В условиях нарастающего информационного противоборства (ИП) человеческий фактор с его духовно-нравственной и гуманитарной культурой становится важнейшим фактором социально-экономического развития, соблюдения национальных интересов, а порой и сохранения государства.

Обобщение подходов, основанное на анализе результатов теории и практики информационного обеспечения государственной политики в сфере реализации целей и задач национальной безопасности, убедительно выявляет необходимость непрерывного осмысления такого сложного системного, противоречивого и развивающегося проблемного аспекта общественных отношений, как ИП [1–8]. Объективное наличие данного фактора, его устойчивое и нарастающее влияние на сферу обеспечения национальной и, прежде всего, военной безопасности Республики Беларусь в области содержания и характера современных и будущих вооруженных конфликтов делает актуальным решение научной задачи, нацеленной на непрерывную систематизацию знаний, раскрывающих характер и возможности используемых при этом соответствующих средств.

Проанализируем основные положения ИП и проблемы обеспечения национальных интересов.

Еще мыслители античности отмечали важность достижения победы без сражений, а в современных условиях можно утверждать, что при прочих равных условиях достижение государством стратегических преимуществ будет зависеть от имеющихся у него информационных возможностей.

Вспомним содержание постулатов древнекитайского философа и военного деятеля Сунь Цзы, который, по сути, заложил основы информационно-психологического противоборства. Они сводятся к следующему: 1. Разлагайте все хорошее, что имеется в стране вашего противника. 2. Вовлекайте видных деятелей противника в преступные предприятия. 3. Подрывайте престиж руководства противника и выставляйте его в нужный момент на позор общественности. 4. Используйте в этих целях сотрудничество с самыми подлыми и гнусными людьми. 5. Разжигайте ссоры и столкновения среди граждан враждебной вам страны. 6. Подстрекайте молодежь против стариков. 7. Мешайте всеми средствами работе правительства. 8. Препятствуйте всеми способами нормальному снабжению вражеских войск и поддержанию в них порядка. 9. Делайте все возможное, чтобы обесценить традиции ваших врагов и подорвать их веру в своих богов. 10. Посылайте женщин легкого поведения с тем, чтобы дополнить дело разложения. 11. Будьте щедры на предложения и подарки для покупки информации и сообщников. 12. Вообще не экономьте ни на деньгах, ни на обещаниях, так как они приносят прекрасные результаты [1, с. 86].

Особенностью ИП является то, что оно ведется как в мирное, так и в военное время (явно и скрытно) между государствами и другими геополитическими субъектами в защиту собственных интересов, за зоны политического влияния и контроля, за рынки сбыта, за спорную территорию и укрепление оборонного потенциала. Регулируя потоки информации и воздействуя на ее обработку, а также нарушая функционирование системы военного и государственного управления, можно влиять на те или иные события и процессы. В этом кроется одна из причин ожесточенной борьбы за контроль над средствами информации, а следовательно, и сознанием населения страны.

Можно с уверенностью утверждать, что будущее международных отношений, мировой политики и мировой экономики будет определять информационные ресурсы и услуги, а первенство в развитии информационной сферы существенно скажется на расстановке сил на мировой арене. Обеспечение информационной безопасности становится приоритетной задачей в деятельности государства, а защита государственного информационного ресурса, который содержит в себе важную политическую, экономическую, научно-технологическую и военную информацию, – геополитическим императивом нашего времени и важнейшим условием национальной безопасности.

Известно, что информационные ресурсы и технологии могут быть использованы как в созидательных, так и деструктивных целях.

Объектом ИП является любой объект, в отношении которого возможно осуществление информационного воздействия в целях модификации его свойств как информационной системы. Общим признаком такого объекта является любая форма использования информации в его функционировании.

Применительно к обществу объектами ИП являются системы социальных, политических и психологических отношений.

Объектом ИП может стать любой компонент или сегмент информационной сферы, в частности:

- массовое и индивидуальное сознание граждан;
- социально-политические системы и процессы;
- информационные и психологические ресурсы.

Иными словами, объектами опасного информационного воздействия и, следовательно, информационного противоборства могут быть сознание, психика отдельных людей и их сообществ, а также информационно-технические системы различного масштаба и назначения.

Под социально-психологическим ресурсом понимается совокупность следующих компонентов информационной сферы:

- система ценностей общества (устойчивость системы ценностей по отношению к внешним и внутренним деструктивным воздействиям);
- индивидуальное и массовое сознание граждан (устойчивость сознания граждан к манипулятивному воздействию и вовлечению в противоправную деятельность манипулятивными методами тайного принуждения личности);
- психическое здоровье граждан (устойчивость психического здоровья по отношению к внешним и внутренним деструктивным воздействиям).

Субъектами ИП являются:

- государства, их союзы и коалиции;
- международные и негосударственные организации;
- негосударственные незаконные (в том числе незаконные международные) вооруженные формирования и организации террористической, экстремистской, радикальной политической или религиозной направленности;
- транснациональные корпорации;
- медиакорпорации (контролирующие средства массовой информации и массовой коммуникации).

Признаками субъекта ИП являются:

- наличие у него в информационной сфере собственных интересов и специальных сил (структур), функционально предназначенных для ведения ИП;
- обладание и/или разработка информационных средств воздействия (в том числе и информационного оружия);
- сегмент информационной сферы, в пределах которого он обладает преимущественным правом устанавливать нормы регулирования информационных отношений (на правах собственности, закрепленных нормами национального и международного законодательства;
- существование в официальной идеологии положений, допускающих участие субъекта в информационном противоборстве [1, с. 72–74].

Базовым является понятие «информация», которое можно отнести к важнейшим системологическим и философским категориям. Данное понятие включает три основных аспекта: обыденный, естественно-научный и философский.

Для практической деятельности наибольший интерес представляет следующее определение информации.

Информация – это сведения об объектах и процессах любой природы:

- обладающие определенной полезностью для лица, принимающего решения (прагматический аспект);
- отражающие существенные свойства объектов или процессов с определенной степенью точности и достаточности (семантический аспект);
- представляемые с помощью определенной знаковой системы (синтаксический аспект);

материально существующие с помощью вещественно-энергетических носителей (электромагнитные излучения, бумага, магнитные носители) в различных системах (вещественно-энергетический аспект).

Такое определение позволяет выделить уровни ИП:

вещественно-энергетический – борьба в сфере носителей информации, т. е. все виды скрытия информации и уничтожения информационных систем, каналов и информации в них;

синтаксический – борьба структур знаковых систем, т. е. все виды кодирования, использования шифров и т. п.;

семантический – борьба в сфере смыслового содержания информации, т. е. предоставление противнику бессмысленной или недостоверной информации (дезинформация);

прагматический – борьба в сфере полезности информации, т. е. либо изменение целей противника по отношению к использованию информации, либо предоставление ему бесполезной информации [1, с. 76].

Решительность целей противоборства, масштабность и универсальность применения средств информационного воздействия, а также эффективность влияния на различные информационные объекты, в том числе и на человека, – все это позволило политикам и политологам говорить о противоборстве в информационной сфере как об информационной войне. Но это не война в классическом ее понимании, так как отсутствует существенная ее составляющая – вооруженная борьба. Корректнее говорить об информационном противоборстве (информационной борьбе в военном деле).

Противоборство в информационной сфере имеет свои особенности:

оно ведется постоянно, в различные периоды жизнедеятельности (при объявлении войны, в кризисных ситуациях, в мирное время) с использованием специальных средств (в том числе и средств информационного воздействия);

противоречия в информационной сфере между сторонами могут разрешаться с помощью информационных действий, которые обычно ведутся специализированными структурами;

информационные действия ведутся с помощью средств информационного воздействия;

основная цель информационных действий – достижение информационного превосходства путем влияния на информацию и информационные системы противной стороны при одновременной защите собственной информации и своих информационных систем;

информационные объекты могут выступать и как средства нападения, и как средства защиты;

скрытность воздействия на противную сторону и возможность масштабного применения средств информационного воздействия;

возможность прямого воздействия на психику человека [1, с. 79].

Уточним, что объектом воздействия в рамках ИП является информационный ресурс (ИР). По мнению специалистов, в понятие ИР входят:

информационные системы (включая человека-оператора и лиц, принимающих решения);

информационные каналы (образуемые системами – источниками информации, системами – получателями информации);

среда существования (распространения) носителей информации;

собственно информация, находящаяся и циркулирующая в информационных системах (библиотеках, архивах, фондах, банках данных).

Элементы ИР следует считать информационными объектами. Это организационные и технические системы и их персонал, специальные устройства, лица, принимающие решения и обеспечивающие протекание информационных процессов, в том числе и процесс принятия решения [1, с. 81].

Таким образом, ИП – это совокупность действий и мероприятий, проводимых специальными силами по единому замыслу и плану в целях достижения информационного превосходства, в том числе и в сфере управления, за счет информационного воздействия на информационный ресурс противной стороны и защиты своего ИР.

Важной составляющей ИП является информационно-психологическое противоборство (ИПП), которое представляет собой комплекс мероприятий и действий специализированных организаций, обеспечивающих информационное воздействие на сознание, чувства и волю лица, принимающего решение, на общественные группы и население в целом противной стороны для достижения политических и экономических целей [1, с. 86].

Раскрывая разные аспекты информационно-психологического воздействия, противоборства, Ю. Балуюевский выделил значимую составляющую – психологическую, а также проблемы, связанные с психологическим воздействием и возможностью глубокого поражения ментальной основы населения и его переформатирования. Системно интегрированная в различные ее компоненты (экономическую, политическую, дипломатическую, информационную и т. д.) психологическая компонента способствует достижению различных целей. Поэтому на методологическом уровне теория психологического воздействия выступает в качестве стержневой и одновременно системообразующей категорией. Большинство авторов отмечают, что информационно-психологическое воздействие, т. е. воздействие словом, информацией в целях формирования определенных идеологических (социальных) идей, взглядов, представлений, убеждений, является основным видом психологического воздействия.

Системный анализ психологического воздействия в качестве явления раскрывает его как многоуровневый и многокачественный процесс детерминации и регуляции (саморегуляции) функциональных систем и состояний организма на всех уровнях целостной психической организации человека. При воздействии специальных органов на человека, группу лиц оказывается целенаправленное влияние специально-психологическими, экологическими, социальными, культурологическими и другими средствами. Данный процесс запускает межуровневые и внутриуровневые механизмы настройки различных контуров внутренней системы психического регулирования, которые составляют функциональную архитектуру (от неосознаваемых форм сенсорно-перцептивных и эмоциональных процессов до высших форм сознательной регуляции деятельности и поведения субъекта). В связи с этим каждый из условно выделенных классов влияний на человека определяет особенности конкретной формы психической трансформации сознания и поведения человека.

Анализ опыта применения несиловых средств решения политических и военных конфликтов в течение последних десятилетий показал высокую эффективность целенаправленного психологического воздействия (психологическое давление, незаметное проникновение в сознание, массированное распространение слухов и сплетен, скрытое нарушение и искажение законов логики и т. д.) на их участников. По оценке западных экспертов, стало возможным управление общественным мнением вплоть до изменения системы ценностей населения [9–11]. Так, манипуляции информацией могут в значительной степени трансформировать психологический комплекс человека – самый уязвимый, и привести к кардинальному изменению восприятия и поведения избранных (целевых) аудиторий [12].

В настоящее время в западных государствах имеются специальные органы по оказанию психологического воздействия, которые носят наименования подразделений «психологических операций» (США, Великобритания, Южная Корея), «психологического обеспечения» (Израиль), «психологической обороны» (Швеция), «психологических действий» (Польша), «психологической войны» (Турция) и т. д.

Большинство военных аналитиков и западных экспертов достаточно высоко оценивают эффективность психологического воздействия, полагая, что сторона,

совершившая прорыв в этой сфере, получит преимущество над своим противником, сравнимое с монопольным обладанием ядерным оружием.

Опасной формой ИПП являются концентрированные операции, имеющие целью разрушение сознания и менталитета народа (нации) и превращение его (ее) в население, не способное и, главное, не желающее отражать информационно-психологические воздействия и сохранять себя как полиэтнос [1, с. 88]. Такие операции представляют собой согласованную по целям, задачам, месту и времени систему информационно-пропагандистских и психологических мер, проводимых с привлечением СМИ, культуры и искусства, а также других средств (психотропных, психотронных и пр.), как правило, в течение длительного времени, по тщательно разработанным сценариям и программам.

Уточним сферы психики отдельного человека, групп людей и общественного сознания в целом, на которые оказывается психологическое воздействие:

потребностно-мотивированная (знания, убеждения, ценностные ориентации, влечения, желания);

интеллектуально-познавательная (ощущения, восприятия, представления, воображения, память и мышление);

эмоционально-волевая (эмоции, чувства, настроения, волевые процессы);

коммуникативно-поведенческая (характер и особенности общения, взаимодействия, взаимоотношений, межличностного восприятия).

Основные направления психологического воздействия:

1. Трансформация убеждений – осмысленных, устойчивых мотивов деятельности людей, имеющих обычно идеологическую основу и проявляющуюся в их чувствах, поступках и поведении.

2. Трансформация стереотипов – распространенных в определенных социальных и этнических группах схематизированных представлений о фактах действительности, которые приводят к упрощенным оценкам и суждениям.

3. Трансформация установок – состояние внутренней готовности (настроенности) людей на специфическое для них проявление чувств, интеллектуально-познавательной и волевой активности, динамики и характера общения.

Отметим, что информационное противоборство – широкое и емкое понятие, выступающее системным интегратором самостоятельной подсистемы собственного понятийного аппарата, включающего такие категории, как информация, информационная безопасность, угрозы информационной безопасности, информационное общество, информационная борьба и война, информационное противодействие и ряд других. Но в данном случае информационное противоборство рассматривается в контексте аспекта вооруженной борьбы (войны), соответственно, и того оружия, которое в этой борьбе используется. При этом принципиально важно, чтобы осмысление и познание осуществлялось сообразно классификации войн для представления реального состояния этих общественных отношений и всех их структурных компонентов.

Нами разделяется научная классификация в отношении того, что сегодняшние вооруженные конфликты определяются как войны седьмого поколения, т. е. информационные сетевые, сетевые войны, развивающие и реализуемые стратегии не прямых действий. Данные стратегии являются следствием появления таких факторов, как формирование коммуникационных систем, построенных по сетевому принципу и влекущих возрастание влияния информации на все сферы жизнедеятельности личности и общества, а также на успехи психологии в области изучения и управления поведением людей, позволяющие оказывать на них программное воздействие [13]. Такой подход основан на анализе реальных международных событий последних десятилетий, показавших, что война (противоборство) возможна и без применения прямой военной силы. Речь идет о том, что противоборство осуществляется в первую очередь в информационной, экономической, психологической, гуманитарной и других сферах, а сама вооруженная борьба и непосредственно боевые действия отходят на второй план (не умаляя при этом роль и значение военной силы, мощи).

В указанных условиях противоборствующие стороны активно решают проблему своевременной разработки такого средства, как информационное оружие (ИО).

Рассмотрим общее понимание сущности и содержания информационного оружия для того, чтобы затем в контексте данной темы уяснить его особенности и специфические характеристики.

На основании анализа литературы считаем, что современным и продуктивным представляются следующие определения [13–18].

Информационное оружие – это совокупность средств и способов воздействия на информацию, информационно-психологические, информационно-технические объекты и информационный ресурс в целях решения задач воздействующей стороны [13, 14].

Актуально также определение, когда под ИО понимается совокупность информации, а также специальных методов, устройств и средств манипуляции ею для скрытого воздействия на информационный ресурс противника в целях достижения поставленных целей и решения задач информационной борьбы (войны) [14, с. 53].

Интерес для осмысления сущности ИО представляет также и подход В. Г. Гавриленко, рассматривающий его природу в контексте прямого отношения к сфере гуманитарного права. В этом плане он подчеркивает, что применение ИО способно привести к бесчисленным жертвам, а суть проблемы заключается в том, что этот процесс регулируется лишь общими принципами и нормами гуманитарного права. Главная же особенность заключается в том, что установленные международным гуманитарным правом нормы, защищающие права и интересы человека, действуют (применимы) в экстремальных условиях вооруженного конфликта. При этом все четко понимают, что ИО применяется в любых условиях социально-экономической и военно-политической обстановки, так как информационное противоборство есть процесс непрерывный, осуществляемый как в мирное, так и в военное время [15, с. 316].

Исследованы и другие теоретико-прикладные наработки, которые дают основания рассматривать ИО как оружие, обладающее рядом уникальных достоинств:

неограниченная область применения в пределах практически всей Земли;

уникальность, т. е. с его помощью возможно создание в различных телекоммуникационных сетях противника управляемого хаоса, приводящего к разрушению системы государственного и военного управления, а также к параличу транспортной, энергетической, финансовой, экономической и других систем инфраструктуры государства;

максимальное быстродействие по сравнению с другими видами оружия;

скрытность применения как в мирное, так и в военное время;

возможность осуществления быстрого пространственно-временного маневра (стратегическая мобильность);

по разрушительной силе (мощи) считается вторым, уступает только ядерному оружию;

способность резко увеличивать продолжительность цикла «обнаружение – опознавание – целеуказание – поражение», что сводит на нет все преимущества сетецентрического способа ведения боевых действий противником;

многократное (в 30–50 раз) превышение всех других видов оружия, включая ядерное, по показателю «эффективность – стоимость» [16, с. 36].

На основании вышеизложенного актуальной является проблема классификации ИО, анализ подходов к решению которой показал, что общепринятым критерием выступает выбор объектов воздействия, к которым большинство исследователей относят информационно-технические системы и средства, созданные человеком, а также психику человека (людей). Основываясь на вышеприведенных фактах, ИО подразделяется на два основных вида: информационно-техническое (главный объект – техника) и информационно-психологическое (главный объект – люди) оружие.

Для объективности здесь уместно отметить и согласиться с мнением В. К. Новикова,

который предлагает дополнить процесс классификации ИО, т. е. выделить в качестве объекта воздействия информационные признаки соответствующих объектов и их действий, человека (людей) и его (их) действий, которые становятся основой для технических средств разведки (в статье не рассматривается) [14, с. 55].

Исходя из того, что в современной вооруженной борьбе – войнах седьмого поколения и на перспективу – главной движущей силой определяется человек, точнее его сознание, морально-психологические свойства и качества, особый интерес представляют взгляды на выбор критериев классификации информационно-психологического оружия.

Нами разделяется подход, при котором *информационно-психологическое оружие* (ИПО) в современном понимании – это совокупность специальных методов и средств скрытого и насильственного воздействия на психику человека (людей) в целях управления его (их) поведением (деятельностью) в нужном для воздействующей стороны направлении или уничтожение (гибель) человека (людей) [14, с. 145].

Обобщение и анализ результатов работ, посвященных решению проблемы классификации ИПО, дают основание выделить следующие, наиболее продуктивные, по нашему мнению, взгляды и положения, способствующие научному и системному познанию данной сложной сферы социальной практики.

Указанный выше подход, основанный на избрании в качестве критерия классификации ИО главного объекта воздействия, считается общепринятым. Напомним и уточним, что этот метод (на основе закона сохранения элементом системы свойств самой системы) правомерен и для ИПО как вида ИО, т. е. для определения главных объектов воздействия, которыми являются психика человека (личности), группы, общества (форма отражения действительности).

В отношении *особенных подходов*, применяемых для классификации непосредственно ИПО, нами предлагаются для использования в научно-исследовательской и практической деятельности некоторые обобщенные положения и наработки.

В контексте познания проблемы социального насилия В. Г. Гавриленко выделяет систему средств влияния, с помощью которых осуществляется навязывание определенного типа социального поведения. Специфические средства реализации такого влияния рассматриваются в качестве оружия, которое классифицируется по критерию ранжирования приоритетов [15, с. 654–655]. На этом основании ученый выделяет три типа приоритетов, классифицирующих и характеризующих данное оружие.

Оружием первого приоритета является ИПО, в состав которого В. Г. Гавриленко включил *концептуально-методическое, хронологическое (историческое), фактологическое и лингвистическое оружие*. В качестве последующей подклассификации избирается информация соответствующего вида, характера и окраски. Перечисленные составляющие в системе данного подхода становятся, по сути, относительно самостоятельными подвидами ИПО.

Концептуально-методическое оружие включает в себя в качестве средства влияния информацию мировоззренческую, методологическую, что позволяет выделить общий и частный ход вещей. На базе этих знаний формируются картина мира человека, его ценностное сознание и методологическая культура, определяются направления развития и стратегия защиты базовых ценностей общества (безопасность, благосостояние, справедливость). Большую опасность представляет системное применение этого оружия в деструктивных целях, результатом которых являются:

мировоззренческий хаос, не критичность мышления и диктат предрассудков, позволяющий осуществлять манипулирование индивидуальным и общественным сознанием; комплекс меньшей значимости народа или даже психология раба; гражданский инфантилизм и крайне низкий уровень религиозной и этической культуры, другие негативные социально-общественные проявления.

В *хронологическом (историческом) оружии* средством влияния на общественное сознание является информация хронологического порядка прохождения фактов и явлений,

их взаимосвязи. При владении соответствующей методологией это оружие позволяет рассматривать явление как включение в глобальный исторический процесс, определять вектор национальной политики. Именно фундаментальные знания исторической реальности – знание законов, противоречий, разногласий, тенденций, движущих сил общественного развития и определение его перспектив путем научного прогнозирования, дает в руки человека историческое оружие для целенаправленного влияния на формирование исторического сознания личности как гражданина и общества. По содержанию это течение охватывает такие взаимосвязанные направления, как *историческая память, исторические традиции, уроки прошлого, исторический опыт* и т. п.

Конструктивное применение исторического оружия направлено на формирование исторического сознания народа, что является ручательством его самоидентификации на фоне исторической наследственности и развития национальной идеологии.

Деструктивное применение (так называемые «исторические войны») – информационная моральная ликвидация всех национальных героев и выдающихся людей, уничтожение исторической памяти, исторических традиций народа, возведение его к категории неисторических народов. Это позволяет глобальным игрокам на международной арене использовать данный народ в качестве разменной монеты в геополитических «играх» или же как «строительный материал» в реализации собственных геополитических проектов.

Фактологическое оружие – это информация прикладного характера: религия, идеология, политические мифы, избирательные технологии и технологии манипулирования индивидуальным и общественным сознанием средствами массовой информации. *Конструктивное применение* этого оружия направлено на консолидацию нации, *деструктивное* – на раскол последней и подрыв исторических основ духовной целостности народа, его дезориентацию и дезорганизацию. В обоих случаях предполагается возможность использования как пространственной, так и временной парадигмы формирования идеополя нации (вера как основа любой религии образует наиболее сильное идеополе в сравнении с другими идеологиями).

Значительно опасным считается изменение идеополя на протяжении трех-четырех поколений, поскольку с точки зрения массовой психологии это приводит к психомутациям, что характеризуется массовой потерей веры, мировоззренческим хаосом и хаотичным движением в социальной сфере. Все это содействует проникновению в социальную область общественных отношений вируса тоталитарного сектантства самого различного, прежде всего, деструктивного характера.

Лингвистическое оружие – средство влияния с помощью языка. Последний является одновременно средством как общения, так и контроля, поскольку языковая форма позволяет передавать информацию и опровергать ее. Языковой фактор также влияет на изменение образовательных моделей. Если в аграрной и индустриальной цивилизациях образование выступало главным образом транслятором знаний, традиций культуры, то в информационной цивилизации оно становится своеобразным посредником (медиумом) в приобретении знаний, т. е. язык является не только средством передачи готовых знаний, но и средством обучения приобретать, находить и применять их.

Оружие второго приоритета применяется в составе так называемого организационного оружия (оргоружия).

Организационное оружие (оргоружие) – это, по мнению В. Г. Гавриленко, многопрофильная и широкомасштабная система организационных влияний на противника, которая побуждает его двигаться «самостоятельно» и «независимо», в выгодном для активной стороны направлении.

Для объективности считаем важным привести и другие, продуктивные на взгляд авторов, определения рассматриваемого понятия.

Оргоружие – это система организационных (согласованных по целям, месту и времени разведывательных, пропагандистских, психологических, информационных и др.) воздействий на противника, заставляющих его двигаться в удобном для активной стороны русле [17, с. 34–35].

Интересно также и определение, исходя из которого *оргоружие* – это совокупность «рефлексивных технологий управления», используемых для внедрения в управляющие структуры страны, подвергающейся информационным атакам, социально-экономических и политических концепций развития, методов принятия решений, полезных для себя, но разрушительных для противника, которые предлагаются ему под видом «нововведений» и способствуют политическому хаосу в стране, противоречат национальным традициям и разрушают историческую память народа» [18, с. 19].

В историческом плане еще раз отметим, что уже в «Трактате о военном искусстве» Сунь-Цзы при рассмотрении проблемы борьбы с противником подчеркивалось, что она решается наиболее эффективно, если созданы условия для его (противника) «самодезорганизации» и «самодезориентации». Исходя из этого основу «оргоружия» составляют развивающиеся специальные рефлексивные технологии организационного управления, или *новые организационные технологии (НОТ)*. Они представляют собой упорядоченные совокупности постоянно совершенствующихся методов (программ, стратегий, процедур, форм) реализации управленческих решений, внедрения инноваций, поддержания информационных и других необходимых структурных связей, подбора, подготовки и воспитания персонала, планирования, отчетности и др. По своему характеру НОТ подразделяются на *конструктивные* (предназначенные для эффективного выполнения национальными оргструктурами, ведомствами и предприятиями своих целевых и функциональных задач в условиях меняющейся экономико-социальной и военно-политической обстановки) и *деструктивные* (предназначенные для внедрения в систему государственного управления противника, с тем чтобы развитие ее функциональных подсистем шло, но неэффективным, зачастую тупиковым направлениям). С помощью деструктивного оргоружия можно направить политику противника в стратегический тупик, измотать его экономику неэффективными (непосильными) программами, затормозить развитие вооружения, исказить основы национальной культуры, создать среди интеллигенции «пятую колонну», всемерно поддерживающую, пропагандирующую и проводящую псевдореформы, и т. п. В итоге в государстве создается обстановка внутривнутриполитического хаоса, ведущая к снижению его экономической, политической, военной мощи и даже к гибели.

Оружие третьего приоритета – это средства влияния на физическое пространство существования человека и общества. В его состав В. Г. Гавриленко включает *психотронное оружие, оружие геноцида, экономическое и боевое оружие*.

В контексте рассматриваемой темы считаем необходимым раскрыть только понятие *психотронного оружия*, под которым понимаются знания и возможности психотроники, ее средства и генераторы специальных энергоинформационных полей, которые применяются для целенаправленного разрушения психики противника.

Вышерассмотренные положения считаем правомерными рассматривать в качестве фундаментальной научно-теоретической основы формирования знаний в сфере изучения природы и сущности аспектов информационной борьбы в современных условиях.

Другим особенным подходом к классификации ИПО авторы считают необходимым отнести критерии, используемые В. К. Новиковым. Указанным исследователем предложена следующая классификация ИПО:

- массмедиа-оружие (СМИ): устное вещание; печатные и изобразительные средства; радио- и телевещание; аудио-, видео- и киносредства;
- энергоинформационное психологическое оружие (СВЧ-генераторы; ультразвуковые генераторы; генераторы инфразвука; источники когерентного (согласованного по времени) и некогерентного света);
- биоэнергоинформационное оружие (гипнодопрос; передача нужных сведений; сотворение дезинформации; программирование на нужное (желаемое) поведение; экстрасенсорные методы воздействия);

- соматропно-психоинформационное оружие (средства обездвиживания людей; средства постановки «психологических заграждений»; биологическое оружие нелетального действия; экологическое оружие нелетального действия);

- лингвистические методы;

- флешмоб – внезапная толпа;

- виртуальное информационно-психологическое оружие (виртуальные игрушки, программные игры, комплексы, системы, города; комплексы сопряжения с открытыми телекоммуникационными системами, в том числе глобальными);

- психотронно-информационное оружие (психотронные генераторы узконаправленного действия; психотронные формообразующие генераторы; ретрансляторы энергии космоса; многополюсные генераторы; спинорные генераторы (ПЖД-генераторы));

- психотропно-информационное оружие (нейролептики; транквилизаторы; психостимуляторы; психотомиметические средства; психолептики; ноотропы; наркотики; отравляющие вещества (яды); нервнопаралитические отравляющие вещества и т. п.);

- информационно-генетическое оружие (этническое; радиологическое);

- нейролингвистическое воздействие (программирование);

- электронные (виртуальные) деньги [14, с. 146–150].

В отношении данного подхода считаем, что он носит ярко выраженную прикладную направленность и на этом основании его правомерно использовать для разработки тем факультативов или курсов специальных дисциплин при подготовке соответствующих профильных специалистов по проблематике информационного противоборства.

Рассмотренные положения дают основания сделать следующие выводы, актуальные как для современной практики, так и в перспективе:

1. Система организации информационного обеспечения сил национальной безопасности предполагает обязательный учет того, что информационно-психологическое воздействие (ИПВ) на лиц, принимающих политические решения, на общественные группы и население страны в целом – важнейшая и составная часть подготовки и проведения «цветной революции». Очевидно, что в борьбе с использованием технологий дестабилизации социума будет побеждать тот, кто выигрывает в первую очередь информационно-психологическое противоборство. Обратим внимание на слова военных экспертов о том, что «линии фронта сегодня проходят по улицам городов, в школах и университетах, в магазинах и кафе... через сознание и сердца людей, разрушая семейные и родственные связи, делая из друзей врагов, раздваивая индивидуальное сознание и психику людей. Нападение на человеческое тело было грубым и неэффективным средством ведения войны. Нападение на разум может оказаться кульминацией военной истории» [5]. Это уже реалии современного насилия. Большинство военных аналитиков и западных экспертов достаточно высоко оценивают эффективность психологического воздействия, полагая, что сторона, совершившая прорыв в этой сфере, получит преимущество над своим противником, сравнимое с монопольным обладанием ядерным оружием.

2. В рамках совершенствования организации образовательного процесса в Военной академии Республики Беларусь назрела необходимость осмыслить и рассмотреть ряд следующих теоретических и практических шагов:

в целях формирования необходимых мировоззренческих установок у обучающихся усилить гуманитарную и идеологическую составляющую образовательного процесса, а идеологическую работу «следует выстраивать в строгом соответствии с национальными интересами Республики Беларусь» [6];

продолжать в комплексе линию однозначного понимания необходимости глубокого и постоянного изучения современной и перспективной войны, технологий геополитической борьбы, проблем нетрадиционного насилия. Проводить целенаправленные и адресные научные исследования по данной проблематике с широким вовлечением всех категорий обучающихся, научно-практические конференции с такой общей тематикой, как «Геополитика и война XXI века» с изданием комплексного научного труда для

преподавателей и обучающихся. Представляется важным изучение проблем современного насилия осуществлять не только в рамках военно-специальных дисциплин, а возможно и в дополнительном спецкурсе для всех слушателей и курсантов с акцентом на гуманитарную составляющую;

необходимо отдельной темой в процессе изучения соответствующих дисциплин давать основы концепции «сетевидной войны» как совокупности действий, направленных на формирование модели поведения друзей, нейтральных сил и врагов в ситуациях мира, кризиса и войны. Следует обратить особое внимание на осмысление сущности идеологической борьбы, роли и значения противоборства в сфере смыслов [7], информационной компоненты в современной войне [8], а специалистов идеологического профиля учить основам контрпропаганды. Для этих целей осуществить необходимую коррекцию программ по дисциплинам социально-гуманитарного профиля в целях изучения сущностного содержания технологий современного информационного противоборства (социально-политический и гуманитарный аспект), а также путей и способов защиты национальных интересов на всех уровнях, от тактического до стратегического.

Список литературы

1. Сетевидность: геополитические и военно-политические аспекты современности : учеб. / В. И. Анненков [и др.] ; под общ. ред. проф. В. И. Анненкова. – М. : РУСАВИА, 2013. – 496 с.
2. Концепция национальной безопасности Республики Беларусь : Указ Президента Респ. Беларусь, 9 нояб. 2010 г, № 575.
3. Военная доктрина Республики Беларусь : утв. Законом Респ. Беларусь 20.07.2016 г. № 412-3.
4. Ксенофонов, В. А. Война, национальная безопасность, гражданско-военные отношения, гуманитарное знание: взаимосвязь явлений / В. А. Ксенофонов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 1(50). – С. 75–88.
5. Попов, И. М. Война будущего. Концептуальные основы и практические выводы. Очерки стратегической мысли / И. М. Попов, М. М. Хамзатов. – М. : Кучково поле, 2016. – 832 с.
6. Гура, А. Н. Основы консолидации общества / А. Н. Гура // Беларус. думка. – 2017. – № 8. – С. 80–85.
7. Матвейчев, О. Информационные войны 21 века. «Мягкая сила» против атомной бомбы / О. Матвейчев. – М. : Кн. мир, 2016. – 352 с.
8. Макаров, В. М. Контрпропаганда в системе идеологической деятельности : учеб. пособие / В. М. Макаров. – Минск : ВА РБ, 2015. – 350 с.
9. Волкогонов, Д. А. Психологическая война / Д. А. Волкогонов. – М. : Воениздат, 1983. – 288 с.
10. Кара-Мурза, С. Манипуляция сознанием / С. Кара-Мурза. – М. : Алгоритм, 2000. – 688 с.
11. Панкратов, В. Н. Психотехнология управления людьми / В. Н. Панкратов. – М. : Изд-во Института Психотерапии, 2001. – 336 с.
12. Psychological Warfare. – Sasebook. Baltivore, 1982. – 210 p.
13. Словарь-справочник по информационной безопасности: в 2 т. / под общ. ред. д-ра воен. наук, акад. А. А. Павловского; сост.: У. А. Шпаковской, С. В. Бачило, Д. Ф. Муравьев. – Минск : ИНБ РБ, 2015. – Т. 1. – 248 с.
14. Новиков, В. К. Информационное оружие – оружие современных и будущих войн / В. К. Новиков. – М. : Горячая линия – Телеком, 2014. – 264 с.
15. Гавриленко, В. Г. Национальная безопасность : энциклопед. слов.-справ. / В. Г. Гавриленко ; под науч. ред. В. Ф. Медведева, Н. И. Ядевича. – Минск : Право и экономика, 2014. – 845 с.

16. Косачев, И. М. Проблемы обеспечения военной безопасности Союзного государства / И. М. Косачев, В. А. Ксенофонтов / Актуальные проблемы социально-гуманитарного знания в контексте обеспечения национальной безопасности : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 10–11 апр. 2014 г. : в 2 ч. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск : ВА РБ, 2015. – Ч.1. – 119 с.

17. Ловцов, Д. А. О проблеме «организационного оружия» / Д. А. Ловцов, Н. А. Сергеев // Воен. мысль. – 1999. – № 1. – С. 34–40.

18. Бабосов, Е. М. Информационные войны: сущность и тенденции развития / Е. М. Бабосов // Проблемы управления. – 2005. – № 4 (17). – С. 17–29.

*Сведения об авторах:

Ксенофонтов Владислав Анатольевич,
Верлуп Сергей Владимирович,
Тицкий Александр Геннадьевич,
УО «Военная академия Республики Беларусь».
Статья поступила в редакцию 06.02.2018 г.

**Требования к статьям, представляемым для опубликования
в военном научно-теоретическом журнале
«Вестник Военной академии Республики Беларусь»**

Представляемые в редакцию материалы должны отражать оригинальные результаты исследований авторов по актуальной тематике в области военных наук, технических наук (радиотехника, связь, электроника и микроэлектроника, информатика, вычислительная техника и управление, вооружение и военная техника), педагогических наук (воинское обучение и воспитание, военная педагогика). Статья должна быть посвящена решению важной самостоятельной теоретической или прикладной задачи, характеризоваться научной новизной, цельностью, последовательностью и логичностью изложения материала.

Рекомендуется в каждой из статей выделять:

введение с характеристикой состояния дел в соответствующей области исследования, обоснованием актуальности рассматриваемой задачи, а также изложением общего подхода к ее решению;

основную часть, отражающую используемый метод исследования и его результаты в сопоставлении с известными ранее;

выводы, характеризующие обобщения и умозаключения авторов, непосредственно вытекающие из представленного в основной части материала, а также возможные направления и перспективы использования полученных результатов.

К опубликованию не принимаются материалы, представляющие собой компиляцию известных результатов исследований других авторов, а также статьи публицистического характера, не связанные с решением конкретной научной задачи.

В конце статьи приводится список литературных источников, на которые даются ссылки при изложении основного текста. Автор несет ответственность за достоверность цитирования, а также отсутствие плагиата.

Требования к оформлению статей:

общий объем 6–8 страниц формата А4; в исключительных случаях общий объем может быть аргументированно увеличен до 12 страниц;

текстовый редактор Word for Windows версии 6.0 или выше;

редактор формул MathType версий 6.0–6.7;

поля 2 см (со всех сторон);

шрифт Times New Roman Cyr, 12 pt;

межстрочное расстояние 1 интервал.

Основной текст статьи должны предварять:

УДК (выравнивание по левой стороне);

название (шрифт полужирный, буквы прописные, выравнивание по центру);

инициалы, фамилия, ученая степень и ученое звание автора (-ов) (выравнивание по центру);

аннотация на русском и английском языках (курсив, отступ первой строки 1,25 см, выравнивание по ширине).

Форматирование основного текста: отступ первой строки 1,25 см; выравнивание по ширине. Форматирование подписей к рисункам: шрифт светлый, выравнивание по центру. Форматирование заголовков таблиц: шрифт светлый, выравнивание по левому краю таблицы. Форматирование формул: выравнивание по центру, последовательная нумерация (по правому краю, в скобках).

Промежутки между структурными элементами статьи (УДК, название, авторы, аннотация, основной текст, список литературы) по вертикали – 6 pt.

На обороте последней страницы необходимо указать фамилию, имя, отчество автора, подразделение, организацию, номер контактного телефона.

Текст статьи (в распечатанном и электронном вариантах) вместе с выпиской из протокола заседания кафедры (НИЛ), рекомендующей ее к опубликованию, направляется в редколлегия. Если авторы статьи являются сотрудниками внешней организации, дополнительно требуется представить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в открытой печати.