

№ 7 ДЕКАБРЬ 2022
ISSN 2707-6989

БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ

АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК

*The aviation
herald*

Научно-практический журнал

THE AVIATION HERALD, 2022, no. 7

АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК. 2022. № 7

Главный редактор:
А.А. Шегидевич, к.т.н., ректор БГАА, Республика Беларусь

Заместители главного редактора:
Л.И. Гречишин, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин БГАА, Республика Беларусь;
А.П. Кульпанович, к.т.н., доцент, начальник научно-технического отдела БГАА, Республика Беларусь;
А.А. Жукова, к.т.н., Республика Беларусь

Технический секретарь:
Е.А. Шапорова, к.х.н., заведующий аспирантурой БГАА, Республика Беларусь

Редколлегия
Технические науки:
С.А. Чижик, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси, Республика Беларусь;
А.П. Ласковнев, академик НАН Беларуси, д.т.н., главный научный сотрудник ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;
В.Г. Залесский, д.ф.-м.н., директор ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;
А.Т. Волочко, д.т.н., профессор, начальник отдела материаловедения и литейно-деформационных технологий ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;
Ю.Ю. Михальчевский, к.т.н., д.э.н., доцент, ректор ФГБОУ ВО СПбГУ ГА, Российская Федерация;
М.М. Хақдод, д.т.н., профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Таджикистан, чрезвычайный и Полномочный Посол Республики Таджикистан в Республике Беларусь, государственный советник I-й степени, Республика Таджикистан;
А.Х. Гильмутдинов, помощник Президента Республики Татарстан, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой лазерных технологий ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Российская Федерация;
И.В. Яцкив, д.т.н., профессор, проректор по науке и развитию TSI, Латвийская Республика;
А.Н. Медведев, д.т.н., профессор, профессор кафедры транспорта TSI, Латвийская Республика;
Ши-Хонг Джанг, д.т.н., профессор, исполнительный секретарь Китайского исследовательского объединения глубокой вытяжки металлов, профессор IMR CAS, Китайская Народная Республика;
Воонг Шин Квак, президент компании SafeUsDrone, Республика Южная Корея;
В.П. Бабак, член-корреспондент НАН Украины, д.т.н., профессор, заместитель директора по научной работе ИТТФ НАН Украины, Украина;
С.Н. Неделько, д.т.н., профессор, начальник ЛА НАУ, Украина.

Юридические науки:
Б.П. Елисеев, д.ю.н., профессор, ректор МГТУ ГА, Российская Федерация;
В.С. Каменков, д.ю.н., профессор, профессор кафедры финансового права и правового регулирования хозяйственной деятельности юридического факультета БГУ, Республика Беларусь;
Э.Э. Халилов, к.ю.н., доцент кафедры «Правоведение» НАА, Республика Айзербаиджан;

Педагогические науки:
А.М. Волочко, к.фил.н., д.пед.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории гуманитарного образования НИО, Республика Беларусь;
Т.В. Казак, д.псих.н., профессор, член-корреспондент Международной академии психологических наук, заведующий кафедрой инженерной психологии и эргономики БГУИР, Республика Беларусь;
В.Г. Стуканов, к.псих.н., д.пед.н., профессор, заведующий лабораторией проблем воспитания личности НИО, Республика Беларусь;
Г.М. Булдык, д.пед.н., профессор, профессор кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи, Республика Беларусь.

АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК

Научно-практический журнал

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИЯ В ЛИЦАХ

Летчик должен летать руками 4

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

А. В. Дубовский, И. В. Рубанов. Современные подходы к методике расчета пропускной способности элементов системы обслуживания воздушного движения 10

С. В. Василевич, М. М. Лузан, Е. В. Шаршуков, В. Л. Червинский. Применение ANSYS для описания обтекания ветроэнергетической установки малой мощности воздушным потоком 17

В. П. Тузлуков. Итерационное подавление помех и оценка параметров канала связи при ортогональном частотном разделении каналов 23

А. Г. Капустин. Эффективность систем охлаждения авиационных генераторов коммерческих воздушных судов 34

А. А. Жукова, Е. Д. Процкая, Е. Г. Крылов, Е. В. Каминская. Анализ рисков развития пассажирских перевозок воздушным транспортом в Республике Беларусь 43

А. Г. Боровой, А. П. Кульпанович, А. С. Маликов. Математическая модель разностно-дальномерной системы дальней навигации 47

В. А. Красковский, В. П. Тузлуков. Имитационная модель обработки радиолокационных сигналов 52

К. В. Терещенко, А. Г. Капустин. Адаптивная система управления электрической машиной на основе правил нечеткой логики 60

А. А. Шейников, В. А. Малкин, А. А. Санько, Л. А. Иваницкий. Математическая модель ошибок высотомера беспилотного летательного аппарата на базе стереосистемы технического зрения 68

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Г. М. Булдык. Методика формирования высокопрофессионального инженера 78

В. Н. Сивицкий, В. Г. Тарасюк. Актуальные проблемы и перспективы социально-гуманитарных исследований авиации Беларуси 83

Зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь №1951 от 20 декабря 2019 года.

Учреждение образования
 «БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ»

Республика Беларусь, 220096, г. Минск, ул. Уборевича, 77
 Тел. +375 (17) 378 94 22, факс (017) 271 66 32
 academy@bsaa.by
 bgaa.by

THE AVIATION HERALD

Scientific and practical journal

CONTENTS

AVIATION IN PERSONS

A pilot is to control aircraft manually 4

TECHNICAL SCIENCES

A. Dubovsky, I. Rubanov. Modern approaches to the methodology of calculating the flow capacity of air traffic service system elements ... 10

S. Vasilevich, M. Luzan, Y. Sharshukou, V. Charvinski. Application of ANSYS to describe the flow of a low-power wind power plant with an air flow ... 17

V. Tuzlukov. Iterative interference cancellation and parameter estimation for OFDM channels 23

A. Kapustin. Effectiveness of cooling aviation generators systems of commercial aircraft 34

H. Zhukova, E. Protskaya, E. Krylov, E. Kaminskaya. Risk analysis of the development of passenger transportation by air in the Republic of Belarus 43

A. Borovoy, A. Kulpanovich, A. Malikov. Mathematical model of the difference-range long range navigation systems 47

V. Kraskovsky, V. Tuzlukov. Simulation model for radar signal processing .. 52

K. Tereshchenko, A. Kapustin. Adaptive control system for electric machine based on fuzzy logic rules 60

A. Sheinikov, V. Malkin, A. Sanko, L. Ivanitski. Mathematical model of errors of the unmanned aerial vehicle altimeter based on the stereo system of technical vision 68

PEDAGOGICAL SCIENCES

H. Buldyk. Method of forming a highly professional engineer 78

U. Sivitsky, V. Tarasyuk. Current problems and prospects of socio-humanitarian aviation studies in Belarus 83

Educational establishment
 BELARUSIAN STATE ACADEMY OF AVIATION

220096, Minsk, Uborevich St., 77
 Tel. +375 (17) 378 94 22, fax (017) 271 66 32
 academy@bsaa.by
 bgaa.by

Колонка
 главного редактора



**Шегидевич
 Артем Артурович**

*Ректор
 Белорусской
 государственной
 академии авиации*

Подготовка научных кадров высшей квалификации не только лежит в основе стратегии развития учреждения высшего образования, но и обеспечивает повышение конкурентоспособности национальной экономики.

Современный уровень развития авиационной техники обуславливает необходимость осуществлять подготовку грамотного специалиста авиационной отрасли с проведением научных, методологических и практико-ориентированных исследований с использованием результатов научной деятельности. Поэтому одним из приоритетных направлений деятельности учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации» (БГАА) является подготовка научных кадров высшей квалификации, для чего выстроена вполне логическая цепочка: курсант – магистрант – аспирант.

Научно-ориентированное образование в аспирантуре БГАА по специальности 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта» функционирует с 2018 года и включает углубленное изучение общеобразовательных и специальных дисциплин, овладение методами и средствами научных исследований, выполнение научных исследований по актуальной тематике, систематизацию и обобщение полученных результатов.

В текущем году состоялся первый выпуск аспирантов дневной формы получения образования с присвоением им квалификации «Исследователь», характеризующей выпускников, как сформировавшихся специалистов, имеющих навыки планирования и самостоятельного проведения научных исследований, обладающих глубокими теоретическими знаниями, позволяющими подготовить квалификационную научную работу (диссертацию) на соискание ученой степени кандидата наук.

Аспирантура БГАА – это кузница научных кадров, в которой готовят исследователей, преподавателей и уникальных специалистов – будущих интеллектуальных лидеров отрасли.

ЛЕТЧИК ДОЛЖЕН ЛЕТАТЬ РУКАМИ

**Олег Юрьевич Салтовский — командир авиационного отряда
ОАО «Авиакомпания «Белавиа», шеф-пилот**



Олег Юрьевич Салтовский

— Многие мальчишки мечтают о небе с детства, и, например, занимаются авиамодельным спортом, что приближает их к выбору профессии пилота. Это похоже на вашу историю?

— Боюсь вас разочаровать, но мои интересы и увлечения в детстве были связаны больше не с небом, а с морем. Я родился в Херсонской области, и наш дом стоял буквально в ста метрах от воды. Как и все пацаны, я часто пропал на берег, купался, рыбачил. Наверное, благодаря воспоминаниям из детства, я люблю отдыхать на море и стараюсь именно так проводить свой отпуск. Когда смотрю на прилив, слышу шум прибоя, вижу, как ритмично бьются о берег волны, — это успокаивает, отвлекает от суеты, помогает расслабиться. И виды бесконечной голубой глади и морского побережья, открывающиеся из кабины пилота, всегда восхищают. Один из самых любимых видов — Средиземное море, Лазурный Берег, район аэропорта Ниццы.

— Если не детские мечты, то, возможно, ваш выбор профессии определило то, что в вашем род-

ственном кругу были мужчины, связавшие свою жизнь с авиацией?

— Мой дедушка, профессиональный военный, служил в Витебске в знаменитой 103-й гвардейской воздушно-десантной дивизии. Хотя он и не работал в авиации, но с небом, как видите, был связан самым непосредственным образом. Но на выбор профессии пилота прежде всего повлиял мой отец. Его совершенно «земные» профессии — а работал он горняком, металлургом — не ориентировали меня на летную карьеру, но в нужный момент именно отец поддержал мое решение. Когда я учился в выпускном классе, то прочитал в газете статью о Кировоградском высшем летном училище гражданской авиации, и мне захотелось попробовать себя в этой сфере. Отец поехал со мной в Кировоград во время зимних каникул. Там я прошел предварительную медкомиссию, был признан годным по здоровью к обучению, и принял окончательное решение поступать.

— Сложно было поступить?

— Экзамены — это точно не прогулка. Сдавали письменно математику, физику, русский язык

и литературу. Также надо было сдать вступительные испытания по физической подготовке по нормативам комплекса ГТО («Готов к труду и обороне») и пройти проверку на профессионально-психологическую пригодность. Я справился, поступил, а впереди меня ждали 4 года и 2 месяца непростой, но интересной учебы. И, конечно, курсантская жизнь со всеми незабываемыми событиями, что свойственны юности. С теплотой вспоминаю эти годы.

— А что-нибудь из курсантского фольклора, прибауток можете вспомнить?

— Юморили, конечно, как же без этого. Но чтобы вот так навскидку сказать — затрудняюсь. Впрочем, постойте, вот такая, к примеру, поговорка на занятиях по авиационной картографии: «Чтобы не было залетов, изучай район полетов». Пилоту надо многое знать и уметь, чтобы количество взлетов и посадок совпадали.

— На каких воздушных судах осуществлялась подготовка в училище?

— Первоначальную летную подготовку проходили на само-

летах Як 18-Т, а затем осваивали эксплуатацию АН-24 и АН-26. Лучшие выпускники после окончания училища направлялись на подготовку для работы на воздушных судах 2-го класса — ТУ-134. Я учился хорошо и по окончании училища в 1989 году был направлен на работу в Белорусское управление гражданской авиации, где мне предстояло освоить полеты на ТУ-134 и ТУ-154.

— Где вам еще довелось работать?

— Я горжусь тем, что в мою трудовую книжку внесено только мое первое и оно же единственное место работы — вот уже 33 года я работаю в Минске — сначала в Белорусском управлении гражданской авиации (позже — Белорусском объединении гражданской авиации), а затем в созданной на его основе Национальной авиакомпании «Белавиа» (ОАО «Авиакомпания «Белавиа»). Могу без преувеличения сказать, что «Белавиа» — моя семья и мой родной дом. Я в авиакомпании с первых дней ее основания, рос вместе с ней, и прошел здесь все ступеньки становления профессионала — от штурмана, второго пилота до командира воздушного судна, заместителя командира эскадрильи, а затем руководителя авиационного отряда и шеф-пилота. Без отрыва от работы успешно окончил Ордена Ленина Академию гражданской авиации в Санкт-Петербурге (ныне Санкт-Петербургский университет гражданской авиации).

— В чем секрет такой притягательности для вас работы именно в «Белавиа»?

— Здесь много причин сложилось воедино. Но, если попытаться выделить первоочередное, то главное все же — это уникальный трудовой коллектив «Белавиа», состоящий из талантливых людей, преданных общему делу, своей профессии. Здесь налицо сплав молодости и опыта, и к каждому, кто приходит сюда работать, относится с уважением и вниманием — будь то молодой специалист или человек, у которого за плечами долгие годы работы в авиации. У меня, в свое время еще молодого и неоперившегося, было на кого



19 апреля 2018 года с Анатолием Гусаровым на презентации самолёта Embraer-175

опереться, спросить совета, найти поддержку. Я благодарен своим наставникам, и особенно моему учителю и предшественнику на должности командира отряда — заслуженному пилоту Республики Беларусь Виталию Владимировичу Мелешко. И, конечно, отдельные слова благодарности адресую Анатолию Николаевичу Гусарову — бессменному руководителю «Белавиа» с момента основания авиакомпании в 1996 году и до 2021 года, когда он, к сожалению, ушел из жизни. Это был человек с большой буквы и как личность, и как руководитель.

— Каким требованиям должен соответствовать претендент на работу в авиационном отряде «Белавиа»?

— Во-первых, необходимо профильное высшее образование по специальности «Летная эксплуатация воздушных судов гражданской авиации» с присвоением квалификации «инженер-пилот» или среднее специальное профильное образование. Во-вторых, требуется профессиональное владение английским языком в соответствии с требованиями 4-го уровня ИКАО. Это обязательно и очень важно, так как вся техническая документация в авиации исключительно на английском языке, на нем осуществляется и радиообмен. В-третьих, надо иметь допуск к полетам на Международных воздушных линиях. И, конечно, приветствуется опыт работы, высокое число часов налета. Практические навыки претендента проверяются на тренажере, в том числе дей-

ствия в нестандартных ситуациях, например, при посадке с отказавшим двигателем. Смотрим также как претендент справляется с управлением самолетом с отключенной автоматикой.

— То есть у вчерашних курсантов, выпускников без опыта работы нет шансов на трудоустройство в «Белавиа»?

— Шансы есть всегда, если человек мотивирован, отлично учился и обладает необходимыми компетенциями. Мы неоднократно брали на работу по окончании учебы выпускников авиационных вузов из-за пределов Беларуси — из Ульяновска, Санкт-Петербурга, Кировограда. Ранее подготовка пилотов гражданской авиации в Беларуси не осуществлялась, и знаковым событием для всех нас стал первый набор инженеров-пилотов в Белорусской государственной академии авиации в 2021 году. Хочу пожелать курсантам настойчиво овладевать знаниями, практическими умениями и навыками, и тогда их будут рады принять на работу не только в «Белавиа», но и в любую авиационную ближнего и дальнего зарубежья. Что касается «Белавиа», то мы трудоустроиваем выпускников, имеющих диплом с отличием, либо пилотов с допуском на один из типов самолетов, используемых авиакомпанией. За последние 10 лет мы активно принимали в штат молодежь, благодаря чему средний возраст пилотов существенно снизился. Есть пилоты со стажем 1,5 года, есть командиры воздушных судов в возрасте до 30 лет, но все



В кабине пилота

они получают достаточное количество часов налетов в год и проходят регулярную тренажерную подготовку.

— В современных самолетах многие функции автоматизированы, и управление доверяют автопилоту. Это упрощает подготовку?

— Ни в коем случае! Техника никогда не заменит человека. Большая часть авиакатастроф связана не с отказом техники, а с переходом экипажа от автоматического полета на ручное управление, и его неполной готовностью к этому. Вот почему в авиационном отряде мы строго придерживаемся раз и навсегда сформулированного правила: «Белавиа» — это полет вручную. Это основа, это фундамент. Пилот должен быть всегда готов к тому, что что-то пойдет не так. Автопилот — это хорошо, но летчик начинается с ручного управления самолетом. Летчик должен летать руками. Поэтому рабочие навыки пилота необходимо постоянно тренировать, а его знания должны быть всегда в актуальном состоянии.

— Расскажите немного поподробнее о том, как эта задача решается в авиационном отряде.

— «Белавиа» уделяет особое внимание вопросам безопасности выполнения полетов и подготовке летного состава. Раз в полгода все линейные пилоты садятся на тренажер и сдают квалифика-

ционный экзамен. Это обязательное условие нахождения в авиационном отряде. У нас действует принцип «перед штурвалом все равны». Поэтому не только пилоты, но и руководители отряда — я, и мои заместители — проходят тренажерную подготовку как со своими инструкторами, так и с независимыми.

Мы сотрудничаем с зарубежными центрами, имеющими богатый опыт переподготовки экипажей на воздушные суда западного производства. На тренажерах регулярно отрабатываются нештатные ситуации, такие как пожар в двигателе, отказ обоих двигателей в полете и другие. Возможные решения отрабатываем на летно-методическом совете, получаем разрешение на действия именно по такому сценарию от Департамента по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь.

Подчеркну, что в авиационном отряде «Белавиа» руководящие должности занимают только летные специалисты. То есть летают все, в том числе и я. И такой подход абсолютно оправдан — летная практика позволяет руководителям четко представлять условия работы пилотов, видеть, на каких самолетах и маршрутах есть свои особенности, что потом учитывается в программе подготовки пилотов. В итоге каждый пилот компании в среднем может управлять четырьмя типами самолетов, имеет высокую квалификацию и

обеспечивает надежный уровень безопасности полетов. По оценке Европейского авиационного агентства безопасности (EASA) рейтинг «Белавиа» находится на уровне передовых европейских авиакомпаний — S7, Lufthansa, British Airways, «Аэрофлот».

— На каких воздушных судах вы любите летать?

— За годы работы в «Белавиа» я освоил полеты и получил допуски на все типы воздушных судов западного производства, которые составляют воздушный парк «Белавиа» — Boeing, CRJ, Embraer. Но мне всегда интересно постигать новое, добиваться большего. Поэтому я очень люблю летать на новейших самолетах «Белавиа», и как руководитель отряда лично пилотировал их при доставке с заводов-изготовителей в США и Бразилии в Национальный аэропорт «Минск». Это почетная и ответственная миссия.

Так, в апреле 2021 года мы своими силами пригнали в Минск Boeing 737-8 прямо с завода в американском Сизтле, с дозправкой в Исландии. Самолет самый современный — у него хорошая устойчивость, управляемость, прекрасная авионика, кондиционирование, другие системы, расход топлива на 10 % меньше, чем у предыдущей серии, рассчитан на 174 пассажира, включая 12 пассажиров бизнес-класса. Инструкторы Boeing обучали пилотов «Белавиа» на сертифицированных симуляторах в Стамбуле и принимали экзамен на допуск к управлению данным типом воздушного судна. При этом руководство Boeing запрашивало данные на каждого пилота, и к полетам допускались, как правило, только командиры с налетом от 15 000 часов — это лучшие из лучших.

— Сколько у вас часов налета?
— Свыше 18,5 тысяч часов. Это более двух лет в небе.

— Случаются ли с самолетами «Белавиа» авиационные происшествия, несмотря на большой опыт и хорошую подготовку летного состава?

— Да, случаются, но крайне редко, и, как правило, не по вине или с частичной виной летного со-

става. Обычно это столкновение с птицами в период их миграции. С этим борются все аэропорты мира, но исключить такие столкновения на 100 % не удается.

— А более серьезные инциденты? Из разряда тех, что отрабатываются в ходе занятий на тренажерах.

— Такие примеры можно привести из уже достаточно далекого прошлого. Показателен инцидент 1989 года, когда в Ту-154, следовавший рейсом Минск-Берлин, попала шаровая молния, вышли из строя два двигателя из трех, но благодаря мастерству пилотов самолет со 160 пассажирами на борту благополучно приземлился в аэропорту прибытия Шенефельд. Широкою известность получил инцидент 1994 года в аэропорту Шеннон в Ирландии, когда пилоту Юрию Анатольевичу Каменеву удалось удержать в воздухе при взлете, а затем посадить Ту-134, у которого разрушилась половина одного из двигателей. Из инцидентов с самолетами западного производства всем запомнились события февраля 2008 года, когда самолет CRJ-101, следовавший рейсом Ереван-Минск, потерпел крушение в международном аэропорту «Звартноц» в Ереване — при взлете он сошел с полосы, произошел взрыв, но обошлось без жертв.

— Да, риски профессии пилота очевидны. В каждой профессии, связанной с риском, есть свои суеверия, приметы, и пилоты не являются исключением. Например, говорят, что перед рейсом пилот обходит самолет строго по часовой стрелке, слева направо, а никак не наоборот. Почему?

— Те, кто считает, что это дань какому-то суевию, просто никогда не читали руководство по летной эксплуатации воздушного судна. Во всех руководствах предписывается, что обход при осмотре осуществляется слева, начиная с носа. Так что, как говорится, «а ларчик просто открывался», и никакого суеверия здесь нет.

— То есть пилоты не суеверны?

— Ну почему же. Есть определенные профессиональные «табу». Например, пилоты, как, впрочем, и другие специалисты,

работающие в авиации, стараются не использовать слово «последний», заменяя его синонимом «крайний». Также, говоря о рейсе, пилот не будет обещать что-то заранее и на вопрос «Во сколько мы прибудем?», как правило, ответит «Расчетное время прибытия — столько-то часов, столько-то минут». Или, к примеру, если бортпроводники прибыли к началу рейса раньше пилотов, и среди них нет мужчин, то они не поднимутся на борт, не дождавшись пилотов, так как первым на борт из экипажа должен подняться мужчина.

— Зато, когда пассажиры поднимаются на борт, их у входа встречает широкой улыбкой бортпроводник. Дань гостеприимству и качеству обслуживания?

— Да, в том числе. Но это прежде всего забота о безопасности. На входе всегда находится один бортпроводник, в конце салона — второй бортпроводник. Они смотрят на поведение пассажиров. Если есть какие-то отклонения либо сомнения, надо докладывать командиру, который дальше сообщает о ситуации наземным службам безопасности, и может быть принято решение о снятии пассажира с рейса. Вообще у людей бытует поверхностное представление о профессии бортпроводника. Она очень ответственная. В небе мы — единый экипаж, и многие вопросы пилоты решают в тесном взаимодействии с бортпроводниками. Например, в случае экстраординарной ситуации бортпроводник способен даже сесть на место заболевшего или потерявшего работоспособность пилота и подсказывать порядок действий по заранее подготовленным картам и чек-листам.

— А как вы поддерживаете работоспособность, боретесь со стрессами?

— Прежде всего, стараюсь соблюдать режим дня. Занимаюсь физкультурой по мере возможности: езжу на велосипеде, зимой много хожу по снегу, иногда посещаю фитнес-зал. Люблю простые

армейские упражнения — например, подтягиваться на перекладине.

— Какие важные личные качества пилотов авиационного отряда «Белавиа» вы можете выделить?

— Каждому пилоту присущи ясность сознания, выдержка, самообладание, выносливость, разностороннее развитие. Кроме того, каждый пилот наделен чувством высокой ответственности за порученное дело.

— Что самое приятное в профессии пилота?

— Возвращаться домой — много уставшим, с чувством выполненного долга.

Самое важное в жизни — получать удовольствие от своей работы.

— И вы его получаете?

— Без сомнения!

— А как же трудности? В том числе искусственно созданные благодаря санкциям. Западные страны не принимают самолеты «Белавиа». Непростые времена...

— Слушайте, были времена гораздо хуже. Вспомните перестройку. Был хаос, людям есть было нечего. А сейчас все есть, страна — красавица! Не ленись и живи нормально! Я помню, когда люди летали один раз в 90 дней. Теперь же средний налет на командира на «Боинге» 80 часов. Рейсы прекрасные, зарплата растет. Чувствуется поддержка руководства компании, директора департамента, министерства, Главы государства. Это не громкие слова, так и есть. В «Белавиа» хороший коллектив, мужественные и ответственные люди, профессионалы. Все заняты работой. Ну нет полетов на Запад — полетим на Восток. Любые события открывают новые возможности, просто их надо видеть.

Спасибо, Олег Юрьевич, за интервью.



13 марта 2021 года после приземления нового Embraer-195 E-2

Материал подготовил проректор по воспитательной работе БГАА, кандидат исторических наук, доцент И. Г. Яцкевич



Учреждение образования
«Белорусская государственная
академия авиации»



Аспирантура Эксплуатация воздушного транспорта

Аспирантура академии авиации — это кузница научных кадров, в которой готовят исследователей, преподавателей и уникальных специалистов.



Специальность
05.22.14
Эксплуатация
воздушного транспорта

Научная квалификация «Исследователь»

Аспирантура является первой ступенью научно-ориентированного образования и направлена на подготовку специалистов, обладающих:

- ✓ навыками планирования;
- ✓ самостоятельностью проведения научных исследований;
- ✓ глубокими теоретическими знаниями.

Обучение в аспирантуре

- ✓ углубленное изучение общеобразовательных и специальных дисциплин;
- ✓ сдача установленных кандидатских экзаменов и зачетов (для обучающихся в форме соискательства);
- ✓ овладение методами и средствами научных исследований;
- ✓ выполнение научных исследований по актуальным темам;
- ✓ систематизация и обобщение полученных результатов.

Период обучения

- ✓ в дневной форме – 3 года;
- ✓ в заочной форме – 4 года;
- ✓ в форме соискательства – 5 лет.

Преимущества получения образования

- ✓ рост уровня образования;
- ✓ саморазвитие и личностное развитие;
- ✓ развитие критического мышления;
- ✓ расширение спектра возможностей для карьерного роста;
- ✓ возможность преподавать в учреждении высшего образования или работать в науке;
- ✓ возможности для исследований своих собственных теорий или работы над перспективными проектами;
- ✓ получение признания международного сообщества.

Требования к кандидатам

- ✓ высшее образование;
- ✓ склонность к научным исследованиям, что подтверждается научными публикациями, участием в научно-исследовательских и инновационных проектах, конференциях или другими материалами;
- ✓ рекомендация ученого совета учреждения высшего образования или факультета этого учреждения (для поступающих в год окончания обучения в данном учреждении) либо опыт практической работы не менее 2 лет на должностях, требующих наличия высшего образования.

**Приглашаем будущих
лидеров отрасли!**

220096, Республика Беларусь, г. Минск,
ул. Уборевича, 77, кабинет 1105,
тел.: +375 17 249-97-65



УДК 351.814.33

А. В. ДУБОВСКИЙ, И. В. РУБАНОВ

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

Алексей Викторович Дубовский – заведующий кафедрой организации движения и обеспечения безопасности на воздушном транспорте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
alekseya59@mail.ru

Alexey Dubovsky – Head of the Department of Traffic Management and Air Transport Security of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
alekseya59@mail.ru

Игорь Владимирович Рубанов – старший преподаватель кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
rubanov.i@bgaa.by

Igor Rubanov – Senior Lecturer of the Department of Natural science and general professional disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
rubanov.i@bgaa.by

Аннотация: в статье рассмотрены методики расчета пропускной способности элементов воздушного пространства, произведено сравнение показателей пропускной способности, рассчитанной по разработанным методикам и с учетом психофизиологических возможностей человека. Предложен также метод расчета пропускной способности с использованием кусочно-непрерывных функций основных параметров, определяемых психофизиологическими возможностями оператора.

Ключевые слова: интенсивность воздушного движения, структура воздушного пространства, пропускная способность, человеческий фактор, маршрут обслуживания воздушного движения.

Annotation: the article considers the methods of calculation the capacity of the elements of the airspace. Produced a comparison of the capacity indicators calculated according to the developed methods and calculated with regard the human psychophysiological capabilities. We also propose a method for capacity calculating using piecewise continuous functions of the main parameters determined by the psychophysiological capabilities of the operator.

Keywords: air traffic intensity, airspace structure, capacity, human factor, air traffic service route.

Введение

Способность обеспечения безопасного обслуживания предельно возможного потока воздушных судов, обусловленная психофизиологическими качествами диспетчера, степенью его обучения и натренированности, с использованием имеющихся технических средств при существующей структуре воздушного пространства, характеристиках воздушного движения и применяемой технологии представляет

собой пропускную способность диспетчера по обслуживанию воздушного движения, знание которой необходимо для стратегического и оперативного планирования и управления воздушным движением (УВД), с учетом сохранения требуемого уровня безопасности полетов [1].

Интенсивность воздушного движения по прогнозам ИКАО будет удваиваться каждые 20 лет, если не будет мировых кризисов таких, например, как пандемия COVID-19, которая нанесла ощу-

тимый удар по всей мировой экономике [2]. Авиационная отрасль пострадала в первую очередь, так как закрытие границ сделало невозможным авиасообщение между государствами. Тем не менее, прогнозирование пропускной способности районов, зон, секторов, рабочих мест персонала по обслуживанию воздушного движения является важным при планировании работы пунктов УВД.

Разработанные методики расчета пропускной способности

Существует несколько методик расчета пропускной способности [3–7], в том числе: методика «DORATASK» [3] для оценки пропускной способности секторов УВД на маршрутах, проведенная Директоратом оперативных исследований и анализа Соединенного Королевства.

Методика расчета DORATASK сосредоточена на оценке рабочей нагрузки диспетчера радиолокационного контроля, посредством суммирования времени, затрачиваемого на выполнение текущих и связанных с разрешением конфликтных ситуаций (требующих наблюдения) задач с одной стороны, и задач планирования (не требующих наблюдения), с другой стороны. Помимо этих двух взаимосвязанных элементов задач, рассматривается третий элемент – время «восстановления сил». Это минимальное время, в течение которого диспетчер не выполняет задач непосредственного обслуживания воздушного движения, однако имеющее важное значение для обеспечения безопасности полетов. Следовательно, время диспетчера делится на периоды выполнения задач, связанных с наблюдением, не связанных с наблюдением и периоды восстановления работоспособности. Хотя рабочая нагрузка определяется суммарным временем, затрачиваемым на выполнение задач, связанных и не связанных с наблюдением, тем не менее пропускная способность оценивается уровнем нагрузки с учетом запаса времени для восстановления работоспособности диспетчера.

Задачами, связанными с наблюдением, являются те, которые могут быть легко зафиксированы и хронометрированы внешним наблюдателем: ведение радиосвязи с экипажами воздушных судов; ведение телефонной связи с взаимодействующими органами обслуживания воздушного движения; выполнение операций взаимодействия с интерфейсом.

Последовательность указаний, обычно передаваемых воздушному судну, фактически будет определяться его маршрутом

в пределах сектора, а также пунктами вылета и назначения. Следовательно, обычная рабочая нагрузка определяется назначением воздушному судну одного из нескольких стандартных профилей полета в пределах сектора. Каждому из них соответствует определенная последовательность задач и, следовательно, время их выполнения. Была разработана соответствующая модель для использования оценки количества случаев, когда диспетчеру необходимо принимать дополнительные меры из-за возникновения конфликтных ситуаций.

Таким образом, мерой рабочей нагрузки для данного сектора и воздушного движения является суммарное время рабочих нагрузок, связанных и не связанных с наблюдением. Для расчета полной пропускной способности требуется определить минимальное время, необходимое диспетчеру для восстановления работоспособности, с тем чтобы не снизился уровень безопасности полетов в данном секторе. Это время, вероятно, будет нарастать по мере увеличения продолжительности сохранения данной интенсивности потока при «полной загрузке». Первоначально предполагалось, что сектор будет работать при полной загрузке не более 1 часа, после чего потребуются либо сменить диспетчера, либо уменьшить интенсивность движения.

Исходя из этого, был сделан следующий вывод: **средняя рабочая нагрузка должна составлять менее 80 % полной загрузки сектора, а продолжительность рабочей нагрузки более 90 % не должна превышать 2,5 % рабочего времени.**

Метод количественной оценки пропускной способности рабочих мест диспетчеров УВД, известный как «метод МВВ», разработанный немецкой фирмой «Мессершмидт, Бельков и Блом» [3].

В процессе оценки производились:

- категоризация всех наблюдаемых рабочих действий, диспетчера;
- измерение времени всех наблюдаемых категорий;
- рассмотрение пропускной способности воздушного

пространства, которая зависит от риска возникновения конфликтных ситуаций в секторе и, следовательно, его структуры и характеристики потока воздушного движения.

Были определены категории рабочих действий для оценки временных затрат на их выполнение:

- время ведения радиосвязи диспетчера с экипажем воздушного судна;
- время регистрации, анализа и обработки информации;
- координация и взаимодействие между диспетчерскими пунктами;
- время анализа воздушной обстановки на устройствах отображения;
- мыслительный процесс;
- процесс принятия решений.

Исследования в течение нескольких периодов наблюдения показали, что различные ситуации или потоки воздушного движения соответствуют различным уровням загруженности диспетчера.

Следовательно, прямое преобразование затраченного времени в количество обслуженных воздушных судов невозможно. Поэтому необходимо предпринять еще один шаг: оценить каждое воздушное судно в соответствии с рабочей нагрузкой, созданной на рабочем месте по типу и этапу полета, и соответствующую потребность во времени, которое необходимо для обслуживания данных воздушных судов.

Оценка, определяемая как «степень сложности контрольной задачи», была получена путем измерения времени переговоров между диспетчером и пилотом.

За основу бралась продолжительность связи для выполнения задачи по управлению пролетом воздушного судна в простейшей возможной конфигурации без изменения каких-либо параметров полета.

Однако метод МВВ не является бесспорным. В ходе работы над этим методом было несколько видов модификации критериев оценки, которые отчасти привели к разным результатам. Прежде всего, определение степени сложности сектора подверглось критике: например, некоторые элементы работы диспетчера, такие как задача разрешения конфликтных

ситуаций, не нашли достаточного отражения. Следовательно, применяемые пороговые значения нагрузки органом управления потоками воздушного движения опираются на опыт диспетчеров, оценивающих возможности своих подразделений. Изменение размеров секторов привело к соответствующей адаптации значений пропускной способности, опять же на основе опыта, с учетом метода МВВ.

Методика, разработанная ГосНИИ Российской Федерации [4] заключается в измерении времени, необходимого для всех действий диспетчера, и соотношении его суммарным располагаемым временем, которое рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{зан} = t_{св.ВС} + t_{свс} + t_{вз} + t_{ин.су} + t_{п.р} + t_a,$$

где $t_{св.ВС}$ – суммарное время связи «диспетчер УВД – экипаж воздушного судна (ВС)». Для диспетчера районного центра (РЦ) определено 15 с, для диспетчера аэродромного диспетчерского центра (АДЦ) – 10 с;

$t_{свс}$ – суммарное время на координацию по согласованию передачи управления ВС со смежным диспетчерским пунктом (сектором УВД) – 25 с на одну координацию;

$t_{вз}$ – операционное время, затрачиваемое на интерфейс взаимодействия «человек-машина» для комплекса средств автоматизации (КСА) УВД или время, затрачиваемое на ведение графика, планшета и т. п. для неавтоматизированных диспетчерских пунктов (секторов УВД) [5];

$t_{ин.су}$ – время, затрачиваемое на координацию со специалистами служб, обеспечивающих полеты – 10 с на одну операцию;

$t_{п.р}$ – время, затрачиваемое на принятие решения (5 с на одно решение);

t_a – время, затрачиваемое на анализ воздушной обстановки (максимально 90 с).

Перечисленные временные параметры определяются опытным путем в процессе тренажерного моделирования и могут отличаться в зависимости от местных ус-

ловий ОрВД на конкретном диспетчерском пункте (секторе УВД).

Следует отметить, что вышеуказанные методы позволяют оценить производительность, относящуюся только к состоянию оборудования, укомплектованию персоналом, структурой воздушного пространства, которые преобладали во время наблюдения. Они не могут быть легко использованы для оценки пропускной способности в рамках будущей организации воздушного пространства с различным оборудованием или процедурами, при различном трафике.

В данных методиках не учитываются такие параметры, как:

- влияние человеческого фактора;

- средневзвешенное время нахождения ВС в зоне ответственности диспетчера УВД ($T_{ср.взв}$);

- количество ВС, одновременно находящихся на управлении.

Учет влияния человеческого фактора

Влияние человеческого фактора выражается в ограничениях психофизиологической деятельности человека-оператора (диспетчера). Многочисленные опыты мировой практики говорят, что человек-оператор, в частности диспетчер, легко оперирует разносторонней информацией, если число логических понятий в их логически незавершенном состоянии не более семи. Второй основополагающий постулат, который необходимо учитывать при расчетах, связанных с человеческим фактором – это свойство неспособности человеческой психики переводить вновь поступающую информацию, из кратковременной (оперативной) памяти в долгосрочную, а также ее сравнение с ранее полученной. Это происходит, если временной интервал между сеансами связи будет менее 15 секунд. В этом случае «размывается» общая картина аэронавигационной обстановки и возможность возникновения ошибок резко возрастает.

Время нахождения в секторе можно вычислить, зная расстояние, проходимое ВС, которое определено отрезками маршрутов ОВД (приблизительно равны-

ми 300 км) и средней скоростью ВС, которая лежит в пределах 800–900 километров в час в слое RVSM.

$$T_{ср.взв} = \frac{300 \text{ км}}{900 \text{ км/ч}} = 0,3 \text{ ч (20 мин)}.$$

Учитывая эти факторы, можно вычислить оптимальную пропускную способность:

$$НПС = \frac{N}{T_{ср.взв} \text{ (в часах)}},$$

где N – количество одновременно обслуживаемых ВС;

НПС – значение норматива пропускной способности для конкретного диспетчерского пункта (сектора УВД).

$T_{ср.взв}$ – средневзвешенное время в часах нахождения ВС в районе ответственности.

$$НПС = 7 \text{ ВС} : 0,3 \text{ ч} \approx 23 \text{ ВС/ч}.$$

Расчет по методике ГосНИИ Российской Федерации [4] дает нам:

$$T_{зан} = 15 \text{ с} + 25 \text{ с} + 30 \text{ с} + 10 \text{ с} + 5 \text{ с} + 90 \text{ с} = 175 \text{ с}.$$

Диспетчер затрачивает на обслуживание одного ВС, тогда за один час он сможет обслужить 3 600 с : 175 с \approx 20,5 ВС.

С учетом коэффициента загрузки K_z , который принимается равным 0,55 (предельно допустимое значение K_z принимается равным 0,70).

$$НПС = 20,5 \text{ ВС/ч} \cdot 0,55 \approx 11 \text{ ВС/ч}.$$

Далее производится учет влияния дополнительных, повышающих пропускную способность факторов, связанных с применением средств автоматизации:

- наличие автоматизированной системы управления прибавляет 25 % к НПС;
- наличие вторичного локатора, работающего в режиме «S» – 5 % к НПС;
- наличие передачи управления по протоколу OLDI – 15 %;
- централизованное распределение кодов ВОРЛ – 3 %;
- автоматизированная координация с ВВС и ПВО – 5 %;
- автоматическая передача сообщений – 6 %;

- наличие диспетчера процедурного контроля – 15 %.

В сумме 74 %, увеличивает НПС приблизительно на 20 ВС/ч.

Приведенный пример демонстрирует как постулаты человеческой психической деятельности согласуются и не противоречат проведенным исследованиями по определению базовых величин организации потоков воздушного движения, с учетом организации воздушного пространства и человеческого фактора.

Кусочно-непрерывная модель определения пропускной способности

Мы можем предложить также достаточно простую кусочно-непрерывную модель для определения НПС, учитывающую только суммарное время занятости диспетчера, приходящееся на один самолет, и максимальное допустимое количество самолетов, одновременно находящихся на связи. Модель не учитывает влияние на пропускную способность других факторов, например, как и ранее рассмотренные методы, ограничений на сближение в точках пересечения маршрутов и т. д.

В данном варианте модели предполагается, что можно сделать следующие допущения:

1. Скорости всех самолетов можно усреднить и далее оперировать полученной величиной $v_{ср}$.

2. Ограничение по занятости диспетчера означает, что величина $T_{зан}$ не должна превышать средний временной интервал между пересечениями самолетами границы сектора, в случае единственного маршрута – его начала.

Сектор, в котором присутствует единственный маршрут

Допустим, через сектор, обслуживаемый одним диспетчером, проходит единственный маршрут. Минимально допустимую дистанцию $S_{мин}$ между самолетами, исходя из параметра $T_{зан}$, можно определить как:

$$S_{мин} = T_{зан} \cdot v_{ср}.$$

Максимальное количество самолетов, которые могут одновременно находиться на маршруте ($N_{одноврем.макс}$), равно среднему количеству минимальных дистанций $S_{мин}$, приходящихся на маршрут длины L :

$$N_{одноврем.макс} = L/S_{мин}$$

откуда можно определить максимально допустимую длину маршрута, исходя из заданного максимально допустимого количества N самолетов, которые могут одновременно находиться на маршруте:

$$L_{макс} = N \cdot S_{мин} = N \cdot T_{зан} \cdot v_{ср}.$$

При длине L маршрута более $L_{макс}$ потребуется увеличивать допустимую дистанцию S между самолетами:

$$S = L/N,$$

и соответственно временной интервал T между моментами начала движения самолетов по маршруту:

$$T = S/v_{ср} = L/(N \cdot v_{ср}) = L \cdot T_{зан}/L_{макс}.$$

Пропускная способность НПС сектора определяется по максимально допустимому количеству $N_{нач}$ самолетов, проходящих за час через границу сектора, см. первую часть статьи. Среднее значение $N_{нач.ед}$ равно среднему количеству периодов T за час, и НПС для случая сектора из единственного маршрута можно предложить определять по следующей формуле:

$$НПС_{ед} = N_{нач.ед} = \begin{cases} \frac{3600}{T_{зан}}, & L \leq L_{макс} \\ \frac{3600}{T} = \frac{3600}{T_{зан}} \cdot \frac{L_{макс}}{L}, & L > L_{макс} \end{cases} \quad (1)$$

или

$$НПС_{ед} = N_{нач.ед} = \begin{cases} \frac{3600}{T_{зан}}, & L \leq L_{макс} \\ \frac{3600}{T} = 3600 \cdot \frac{N \cdot v_{ср}}{L}, & L > L_{макс} \end{cases}, \quad (1a)$$

если такое представление более удобно.

Таким образом, в данной модели при длине маршрута не более $L_{макс} = N \cdot T_{зан} \cdot v_{ср}$ пропускная способность сектора из единственного маршрута остается постоянной с увеличением L и может определяться по первой части формул (1), (1a). При заданных параметрах $N=7$, $T_{зан}=175$ с и $v_{ср}=900/3600$ км/с $L_{макс} = 7 \cdot 175 \cdot 900/3600 = 306,25$ км и НПС при $L \leq L_{макс}$ будет равна $3600/175 \approx 20,75$, приближаясь к ранее полученному значению 20 ВС/час. При длине маршрута, превышающей 306,25 км, НПС может считаться по второй части формулы, в этом случае НПС уменьшается обратно пропорционально длине маршрута. Здесь и далее в аналогичных формулах мы можем назвать значение, рассчитываемое по первой части формулы, начальным значением пропускной способности.

Исходя из этого, можно предложить считать оптимальными по показателю пропускной способности размеры сектора и/или расположение маршрута в нем такие, в которых длина маршрута будет максимальной без уменьшения пропускной способности, то есть $L = L_{макс}$.

Сектор, включающий несколько маршрутов

Теперь предположим, что в секторе имеется n маршрутов разной протяженности. В случае нескольких маршрутов величина N должна обозначать максимально допустимое суммарное количество самолетов, находящихся одновременно на всех маршрутах.

Далее будем предполагать, что величина $T_{зан}$ не должна превышать средний временной интервал между пересечениями самолетами границы всего

сектора, имея в виду сделанное вначале второе допущение.

Обозначим $N_{\text{однoврeм}}$ количество самолетов, одновременно находящихся в секторе, при условии, что они пересекают точку начала относящегося к ним маршрута i длиной L_i через интервал T_i . Тогда $N_{\text{однoврeм}}$ можно рассчитать как:

$$N_{\text{однoврeм}} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{T_i \cdot v_{\text{cp}}} = \frac{1}{v_{\text{cp}}} \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{T_i}.$$

Маршруты с одинаковой средней нагрузкой

Предположим сначала, что все маршруты имеют одинаковую в любой момент времени среднюю ожидаемую нагрузку. При таком допущении можно считать, что в среднем $T_i = n \cdot T$, тогда

$$N_{\text{однoврeм}} = \frac{1}{n \cdot T \cdot v_{\text{cp}}} \sum_{i=1}^n L_i.$$

При сделанном в начале пункта допущении о величине $T_{\text{зан}}$ при $N_{\text{однoврeм}} \leq N$ пропускная способность, как и в случае с единственным маршрутом, будет зависеть только от $T_{\text{зан}}$. То есть для выполнения условия по $N_{\text{однoврeм}}$ должно выполняться $N \geq \frac{1}{n \cdot T \cdot v_{\text{cp}}} \sum_{i=1}^n L_i$,

где $\sum_{i=1}^n L_i = L_{\text{общ}} \leq N \cdot n \cdot T_{\text{зан}} \cdot v_{\text{cp}} = L_{\text{макс.общ}} = n \cdot L_{\text{макс}}$ или $L_{\text{общ}}/n = L_{\text{cp}} \leq L_{\text{макс}}$, где $L_{\text{общ}}$ – суммарная длина всех маршрутов, $L_{\text{макс.общ}}$ – суммарная длина всех маршрутов и L_{cp} – средняя длина маршрута, максимально допустимые для определения пропускной способности только по $T_{\text{зан}}$.

При $N_{\text{однoврeм}} > N$ для расчета пропускной способности предположим, как и ранее, выполнение

$$N = \frac{1}{n \cdot T \cdot v_{\text{cp}}} L_{\text{общ}} = \frac{L_{\text{cp}}}{T \cdot v_{\text{cp}}}, \text{ тогда } T = \frac{1}{n \cdot N \cdot v_{\text{cp}}} L_{\text{общ}} = \frac{T_{\text{зан}}}{n} \cdot \frac{L_{\text{общ}}}{L_{\text{макс}}} = \frac{T_{\text{зан}}}{n} \cdot \frac{L_{\text{общ}}}{L_{\text{макс}}}.$$

Таким образом, можно предложить формулу, аналогичную (1), для определения НПС в рассматриваемом случае:

$$\text{НПС}_{\text{равн.л}} = N_{\text{нач.равн.л}} = \begin{cases} \frac{3600}{T_{\text{зан}}}, & L_{\text{cp}} \leq L_{\text{макс}} \\ \frac{3600}{T} = \frac{3600}{T_{\text{зан}}} \cdot \frac{L_{\text{макс}}}{L_{\text{cp}}}, & L_{\text{cp}} > L_{\text{макс}} \end{cases} \quad (2)$$

или

$$\text{НПС}_{\text{равн.л}} = N_{\text{нач.равн.л}} = \begin{cases} \frac{3600}{T_{\text{зан}}}, & L_{\text{cp}} \leq L_{\text{макс}} \\ \frac{3600}{T} = 3600 \cdot \frac{N \cdot v_{\text{cp}}}{L_{\text{cp}}}, & L_{\text{cp}} > L_{\text{макс}} \end{cases} \quad (2a)$$

То есть аналогично случаю с единственным маршрутом, в данной модели при средней длине L_{cp} всех маршрутов, при их одинаковой средней загруженности не более $L_{\text{макс}}$

пропускная способность сектора остается постоянной с увеличением L_{cp} и может определяться по первой части формул (2), (2a), а при L_{cp} , превышающей $L_{\text{макс}}$, НПС может считаться по второй части приведенной формулы, НПС уменьшается обратно пропорционально L_{cp} .

Оптимальными по показателю пропускной способности размером сектора и/или расположением маршрутов в нем можно предложить считать такие, в которых $L_{\text{cp}} = L_{\text{макс}}$.

Маршруты с разной средней нагрузкой

Далее предположим, что маршруты имеют разную известную среднюю нагрузку. Мы можем ввести показатель $K_{\text{отн.з.и}}$ относительной загруженности маршрута i , определяемый по данным долговременных наблюдений.

$$K_{\text{отн.з.и}} = \frac{N_{\text{набл.и}}}{\sum_{j=1}^n N_{\text{набл.ж}}},$$

где $N_{\text{набл.и}}$ ($N_{\text{набл.ж}}$) – количество самолетов, прошедших через начало i -го (j -го) маршрута за период наблюдений, $\sum_{i=1}^n K_{\text{отн.з.и}} = 1$. Тогда можно предположить в среднем $T_i = T/K_{\text{отн.з.и}}$, при равных для каждого маршрута коэффициентах получается $K_{\text{отн.з.и}} = 1/n$ и $T_i = n \cdot T$, что совпадает с предположением для T_i в случае

одинаковой средней ожидаемой нагрузки. Тогда $N_{\text{однoврeм}} = \frac{1}{v_{\text{cp}}} \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{T_i} = \frac{1}{T \cdot v_{\text{cp}}} \sum_{i=1}^n (L_i \cdot K_{\text{отн.з.и}})$. Для выполнения $N_{\text{однoврeм}} \leq N$ и расчета НПС только по $T_{\text{зан}}$ должно выполняться $\sum_{i=1}^n (L_i \cdot K_{\text{отн.з.и}}) = L_{\text{cp.взв}} \leq N \cdot T_{\text{зан}} \cdot v_{\text{cp}} = L_{\text{макс}}$, иначе расчет НПС производится исходя из соотношения $T = \frac{1}{N \cdot v_{\text{cp}}} L_{\text{cp.взв}} = T_{\text{зан}} \cdot \frac{L_{\text{cp.взв}}}{L_{\text{макс}}}$, здесь величину, обозначенную как $L_{\text{cp.взв}}$ можем назвать средневзвешенной длиной маршрута. Итоговая формула для расчета НПС в рассматриваемом случае будет выглядеть следующим образом:

$$\text{НПС}_{\text{разн.л}} = N_{\text{нач.разн.л}} = \begin{cases} \frac{3600}{T_{\text{зан}}}, & L_{\text{cp.взв}} \leq L_{\text{макс}} \\ \frac{3600}{T} = \frac{3600}{T_{\text{зан}}} \cdot \frac{L_{\text{макс}}}{L_{\text{cp.взв}}}, & L_{\text{cp.взв}} > L_{\text{макс}} \end{cases} \quad (3)$$

или

$$\text{НПС}_{\text{разн.л}} = N_{\text{нач.разн.л}} = \begin{cases} \frac{3600}{T_{\text{зан}}}, & L_{\text{cp.взв}} \leq L_{\text{макс}} \\ \frac{3600}{T} = 3600 \cdot \frac{N \cdot v_{\text{cp}}}{L_{\text{cp.взв}}}, & L_{\text{cp.взв}} > L_{\text{макс}} \end{cases} \quad (3a)$$

В этом случае пропускная способность с увеличением $L_{\text{cp.взв}}$ начинает уменьшаться обратно про-

порционально параметру $L_{\text{cp.взв}}$ при его превышении величины $L_{\text{макс}} = N \cdot T_{\text{зан}} \cdot v_{\text{cp}}$. В оптимальной по показателю пропускной способности конфигурации сектора будет $L_{\text{cp.взв}} = L_{\text{макс}}$.

Учет корректирующих факторов

Можно также предложить способ учета корректирующих факторов, например, для разных маршрутов на разной высоте либо в случае применения средств автоматизации. Можно предположить, что какой-либо корректирующий фактор влияет, в основном, на величины необходимого времени для связи диспетчера с бортом и допустимого количества самолетов в секторе.

Обозначим $T_{\text{зан.и}}$ величину времени, необходимо для связи диспетчера с бортом, относящуюся к маршруту i , определяемую опытным путем в случае, если маршрут единственный в секторе. Мы можем ввести параметр $K_{\text{корр.и}} = T_{\text{зан.и}}/T_{\text{зан}}$, корректирующий для маршрута i известное среднее время $T_{\text{зан}}$. Таким образом, при $K_{\text{корр.и}} < 1$ ($K_{\text{корр.и}} > 1$) маршрут имеет характеристики сложности обслуживания лучше (хуже), чем известные средние.

Для учета корректирующих факторов до достижения соответствующими параметрами L_i , L_{cp} , $L_{\text{cp.взв}}$ значения $L_{\text{макс}}$ можно предложить в определениях величины $L_{\text{макс}}$ и в первых частях формул (1) – (3)

вместо величины $T_{\text{зан}}$ использовать $\sum_{i=1}^n T_{\text{зан.и}}/n$, в случае единственного маршрута $n = 1$. Таким образом, при усредненных лучших (худших) характеристиках сложности обслуживания маршрутов значение $L_{\text{макс}}$ будет достигаться быстрее (медленнее) с увеличением соответствующих параметров, чем в среднем, а начальное значение пропускной способности будет выше (ниже).

Для учета корректирующих факторов при превышении соответствующими параметрами значения $L_{\text{макс}}$ можно предложить вместо L и в определении L_{cp} , $L_{\text{cp.взв}}$ во вторых частях формул (1) – (3) вместо L_i использовать $K_{\text{корр.и}} \cdot L_i$, $K_{\text{корр.и}} \cdot L_i$. Тогда при лучших (худших) средних характеристиках сектора его пропускная способность будет убывать медленнее (быстрее) с ростом длин маршрутов.

Размеры секторов
Отдельно подытожим предложения по расчету оптимальных по показателю пропускной способности конфигураций секторов перечисленных здесь типов с использованием описываемой методики. Заметим, что ранее при формулировке предложений, касающихся этого вопроса, делалось неявное допущение о том, что желательна максимальная суммарная или каким-либо образом усредненная длина маршрутов в секторе.

1. Сектор, включающий единственный маршрут, предлагается конфигурировать так, чтобы длина L этого маршрута была близка к величине $L_{\text{макс}} = N \cdot S_{\text{мин}} = N \cdot T_{\text{зан}} \cdot v_{\text{cp}}$.

2. Сектор, включающий n маршрутов разной протяженности, предлагается конфигурировать так, чтобы:

а) при одинаковой средней загруженности маршрутов средняя длина маршрутов L_{cp} была близка к величине $L_{\text{макс}}$;

б) при разной средней загруженности маршрутов с показателем относительной нагрузки

$$K_{\text{отн.з.и}} = \frac{N_{\text{набл.и}}}{\sum_{j=1}^n N_{\text{набл.ж}}}$$

величин $L_{\text{cp.взв}} = \sum_{i=1}^n (L_i \cdot K_{\text{отн.з.и}})$, названная средневзвешенной длиной маршрутов, была близка к величине $L_{\text{макс}}$.

3. При наличии корректирующих факторов, о которых говорится в первой части статьи, предлагается заменять величины L_i , L_i во всех расчетных формулах величинами $K_{\text{корр.и}} \cdot L_i$, $K_{\text{корр.и}} \cdot L_i$ соответственно, где $K_{\text{корр.и}} = T_{\text{зан.и}}/T_{\text{зан}}$ и $T_{\text{зан.и}}$ это величина времени, необходимо для связи диспетчера с бортом, относящаяся к маршруту i .

Во всех трех случаях определена некоторая пороговая величина, ниже которой конфигурируемый параметр, выражающий усредненную длину маршрутов в секторе, дает в результате постоянную пропускную способность, названную здесь начальной пропускной способностью, а при ее превышении пропускная способность уменьшается обратно пропорционально параметру.

Заключение

В статье рассмотрены некоторые методики расчета пропускной способности элементов воздушного пространства. В первой части сделан вывод о примерном соответствии результата, рассчитанного по разработанным методикам и рассчитанного с возможным учетом показателей, определяемых психофизиологическими возможностями человека, а также показателей, определяемых применением средств автоматизации работы оператора.

Во второй части предлагается метод расчета при некоторых допущениях пропускной способности с использованием кусочно-непрерывных функций от двух основных и нескольких дополнительных параметров. Основными являются определяемые в основном психофизиологическими возможностями оператора минимальные суммарное время занятости диспетчера УВД и количество ВС, одновременно находящихся на управлении. Дополнительные параметры вводятся для учета объективных факторов относительной загруженности маршрутов и наличия средств автоматизации. Метод также предлагает вариант определения наилучшей по показателю пропускной способности конфигурации сектора при возможности пренебречь влиянием других факторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Филин, А. Д. Основы организации воздушного движения: учебник для ВУЗов / А. Д. Филин, А. Р. Бестугин, В. А. Санников; под науч. ред. Ю. Г. Шатракова. – М : Юрайт, 2020. – 515 с.
2. DOC-4444. Организация воздушного движения. – 6-е изд. – Монреаль : ИКАО, 2016. – 508 с.
3. DOC-9624. Руководство по планированию обслуживания воздушного движения. – I-е изд. – Монреаль : ИКАО, 1984. – 411 с.
4. Об утверждении Методики определения нормативов пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения: приказ Федерального агентства воздушного транспорта, 7 ноября 2012 г., № 757. – М., 2012. – 35 с.
5. Методика определения пропускной способности органов диспетчерского обслуживания воздушного движения РБ: Авиационные правила [Электронный ресурс]: постановление Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, 31 марта 2008 г., № 43 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. Центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2016.
6. Chen, H. S. Weifang H. Method and computer technique for control sector optimum partition [J] / H. S. Chen, Z. Ming // Journal of Traffic and Transportation Engineering. – 2003. – Vol. 3, no. 1. – P. 101–104.
7. Capacity Assessment Method Based on Airspace Utilization Efficiency / J. Zhang [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 976. – P. 16.
8. Richmond, G. C. The DORATASK Methodology of Sector Capacity Assessment: an Interim Description of its Adaptation to Terminal Control (TMA) Sectors. DORA Report 8916 / G. C. Richmond. – London : Civil Aviation Authority, 1989. – 74 p.

REFERENCES

1. Filin, A. D. Fundamentals of air traffic management: textbook for universities / A. D. Filin, A. R. Bestugin, V. A. Sannikov; under scientific. ed. SOUTH. Shatrakova. – M : Yurayt, 2020. – 515 p.
2. DOC-4444. Air Traffic Management. – 6th ed. – Montreal: ICAO, 2016. – 508 p.
3. DOC-9624. Air traffic services planning manual. – 1th ed. – Montreal: ICAO, 1984. – 411 p.
4. On approval of the Methodology for determining the standards for the throughput of control points (sectors) of air traffic services: Order of the Federal Air Transport Agency, November 7, 2012, № 757. – M., 2012. – 35 p.
5. Methodology for determining the throughput of air traffic control bodies of the Republic of Belarus: Aviation rules [Electronic resource]: Resolution of the Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus, March 31, 2008, № 43 // ETALON. Legislation of the Republic of Belarus / Nat. Center for Legal Inform. Rep. Belarus. – Minsk, 2016.
6. Chen, H. S. Weifang H. Method and computer technique for control sector optimum partition [J] / H. S. Chen, Z. Ming // Journal of Traffic and Transportation Engineering. – 2003. – Vol. 3, no. 1. – P. 101–104.
7. Capacity Assessment Method Based on Airspace Utilization Efficiency / J. Zhang [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 976. – P. 16.
8. Richmond, G. C. The DORATASK Methodology of Sector Capacity Assessment: an Interim Description of its Adaptation to Terminal Control (TMA) Sectors. DORA Report 8916 / G. C. Richmond. – London : Civil Aviation Authority, 1989. – 74 p.

Статья поступила в редакцию
31.01.2022

УДК 33.6.076

С. В. ВАСИЛЕВИЧ, М. М. ЛУЗАН,
Е. В. ШАРШУКОВ, В. Л. ЧЕРВИНСКИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ ANSYS ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

Сергей Владимирович Василевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической эксплуатации воздушных судов и двигателей учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
svasilevich@yandex.ru

Siarhei Vasilevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Engines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
svasilevich@yandex.ru

Михаил Михайлович Лузан – доцент кафедры технической эксплуатации воздушных судов и двигателей учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
aviario79@mail.ru

Mikhail Luzan – Associate Professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Engines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
aviario79@mail.ru

Евгений Викторович Шаршуков – магистрант физического факультета Белорусского государственного университета, Республика Беларусь
ezhik.rockiy@gmail.com

Yauheni Sharshukou – Master's student at the Faculty of Physics of Belarusian State University, Republic of Belarus
ezhik.rockiy@gmail.com

Вячеслав Леонидович Червинский – кандидат технических наук, доцент кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» учреждения образования «Белорусский национальный технический университет», Республика Беларусь
chervinsky@mail.ru

Viachaslau Charvinski – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of UNESCO «Energy saving and renewable sources of energy» of Belarusian National Technical University, Republic of Belarus
chervinsky@mail.ru

Аннотация: отмечена актуальность использования возобновляемых источников энергии, в том числе и энергии ветра, для энергообеспечения аэропортов, перспективность и важность разработки методов моделирования поведения ветроколеса для проверки и оценки их характеристик. Приведен расчет процесса обтекания ротора ветроэнергетической установки малой мощности. В ходе моделирования в программном комплексе ANSYS CFX были получены зависимости средних значений механической мощности и средних значений коэффициента использования энергии ветра от скорости воздушного потока. Для проверки адекватности модели были проведены эксперименты в аэродинамической трубе. Представлены результаты проведенных экспериментов с использованием аэродинамической трубы, а также сравнения данных результатов с расчетными значениями, полученными с использованием разработанной модели. Показано, что выбранная модель достаточно хорошо описывает рассматриваемый авторами процесс обтекания ротора ветроэнергетической установки воздушным потоком.
Ключевые слова: ветер, ветроэнергетическая установка, ветроколесо, программный комплекс ANSYS, скорость потока, мощность, коэффициент использования энергии ветра.

Annotation: the relevance of the use of renewable energy sources, including wind energy, for the energy supply of airports was noted. The prospects and importance of developing methods for modeling the behavior of wind turbines for testing and evaluating their characteristics are noted. The calculation of the process of flow around the rotor of a wind power plant of low power is given. In the course of modeling in the ANSYS CFX software package, the dependences of the average values of the mechanical power and the average values of the wind energy utilization factor on the air flow speed were obtained. To test the adequacy of the model, experiments were carried out in a wind tunnel. The results of the experiments performed using a wind tunnel, as well as a comparison of these results with the calculated values obtained using the developed model, are presented. It is shown that the chosen model quite well describes the process of air flow around the rotor of a wind power plant considered by the authors.

Keywords: wind, wind power plant, wind turbine, ANSYS software package, flow velocity, power, wind energy utilization factor.

Основное электроснабжение аэропорта осуществляется обычно по двум независимым линиям электропередачи, одна из линий при этом является резервной. В крупных аэропортах может быть три независимых ввода от внешних систем электроснабжения [1]. Кроме того, в аэропортах устанавливаются автономные аварийные электростанции, которые обеспечивают электроснабжение в случаях повреждения или обесточивания внешних систем электроснабжения. Известно, что при проектировании независимых взаимно резервирующихся источников питания, относящихся к энергосистеме аэропорта, следует учитывать вероятность одновременного зависящего кратковременного снижения или полного исчезновения напряжения на время действия релейной защиты и автоматики при повреждениях в электрической части энергосистемы, а также одновременного длительного исчезновения напряжения на этих источниках питания при тяжелых системных авариях [1]. Все это указывает на необходимость использования различных источников энергии, не привязанных к системе централизованного электроснабжения. В качестве таких источников могут выступать местные возобновляемые источники энергии.

Интерес к проблемам использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) связан с необходимостью уменьшения потребления ископаемых топлив. За последние 10 лет наблюдается значительный рост использования ВИЭ. Доля возобновляемой энергии в энергобалансе Европы по данным на 2020 год составляет 39 % [2, 3].

Одним из перспективных направлений энергетики Европы является использование ветроэнергетических ресурсов [4, 5]. В настоящее время в мире ежегодный прирост ветроэнергетики составляет в среднем около 10 % [3]. Однако для того, чтобы энергия ветра смогла принести значительную пользу, должны быть решены следующие проблемы, главные из которых: снижение высокой стоимости ветроэнергетических установок (ВЭУ), обе-

спечение их способности надежно работать в автоматическом режиме в течение многих лет и обеспечивать бесперебойное электроснабжение.

Расчет обтекания ветроколеса ВЭУ может способствовать решению задач проектирования и отработки конструкции ВЭУ с целью достижения оптимальных технико-эксплуатационных характеристик.

Объект моделирования представляет собой осевую ветроустановку с одним ветроколесом. Актуальность выбора в качестве объекта исследования модели ветроэнергетических установок малой мощности с вертикальной осью вращения определяется их перспективностью совершенствования в силу спроса на мировом рынке и достаточным для промышленной эксплуатации коэффициентом использования энергии ветра.

Характеристики ветрового потока

Известно, что мощность ветрового потока находится в кубической зависимости от величины скорости ветра. Удвоение скорости ветра дает увеличение мощности ветрового потока в 8 раз. Таким образом, средняя скорость ветра 5 м/с может дать примерно в 2 раза большую мощность, чем ветер со средней скоростью 4 м/с [6].

К основным факторам, влияющим на точность оценки энергии ветра, относятся: изменение плотности воздуха в зависимости от высоты над уровнем моря и температуры и соответствие имеющихся данных по ветру, ветровым условиям конкретного местоположения ветродвигателя [7].

Основные параметры ВЭУ

В настоящее время применяются две основные конструкции ВЭУ: горизонтально-осевые и вертикально-осевые [8, 9]. Оба типа ВЭУ имеют примерно равный КПД. Мощность ВЭУ может быть от сотен ватт до нескольких мегаватт [6].

Мощность ВЭУ определяется как

$$P = P_0 \cdot \eta, \quad (1)$$

где P_0 — мощность ветрового потока и определяется по формуле (2); η — КПД ВЭУ.

Выражение для определения мощности ветрового потока имеет вид:

$$P_0 = \frac{\rho \cdot S_0 \cdot v_0^3}{2} \quad (2)$$

где ρ — плотность набегающего воздушного потока;
 S_0 — ометаемая поверхность;
 v_0 — скорость набегающего воздушного потока.

КПД ВЭУ определяется по выражению

$$\eta = C_p \cdot \eta_a \cdot \eta_m \cdot \eta_{пр}, \quad (3)$$

где C_p — коэффициент использования энергии ветра;

η_a — коэффициент аэродинамических потерь в ветроколесе;
 η_m — коэффициент механических потерь (редуктор, подшипник);

$\eta_{пр}$ — коэффициент потерь в системе преобразования энергии после редуктора.

Величина коэффициента использования энергии ветра C_p , прежде всего, зависит от типа ветродвигателя, формы его крыльев и качества их изготовления, а также от ряда других факторов [10].

Для целей модельных расчетов коэффициент использования энергии ветра C_p можно вычислить по формуле

$$C_p = \frac{M_{вт} \cdot \omega}{0,5 \cdot S_0 \cdot \rho \cdot v_0^3}, \quad (4)$$

где $M_{вт}$ — момент ветроколеса;
 ω — угловая частота вращения ветроколеса.

Моделирование поведения лабораторного образца вертикально-осевого ветроколеса в программном комплексе ANSYS

Для предварительного исследования свойств и моделирования поведения ветроколеса могут использоваться различные программные комплексы. Одним из них является конечно-элементный программный комплекс ANSYS CFX (№ 2017-6/140).

Основные этапы моделирования с использованием программного пакета ANSYS CFX вклю-

чают в себя: создание геометрии (модуль ANSYS DesignModeler), создание сетки (модуль ANSYS Meshing), предобработка (модуль ANSYS CFX-Pre), непосредственно решение (модуль ANSYS CFX-Solver), постобработка (модуль ANSYS CFD-Post). ANSYS CFX использовался в данной работе как основной инструмент моделирования поведения ветроколеса [11].

В работе использовалось обтекание воздушным потоком лабораторного образца вертикально-осевого ветроколеса. Внешние аэродинамические обводы ветроколеса представлены 11 изогнутыми лопастями, расположенными на вертикальной оси ротора. Общий вид модельного образца ветроколеса представлен на рисунке 1, а.

Геометрические параметры исследуемого ветроколеса: длина — 230 мм, диаметр — 250 мм, радиус закругления лопасти — 90 мм.

Для моделирования ветроколеса в программном комплексе необходимо заранее определить экспериментальную зависимость частоты вращения колеса от скорости воздушного потока.

В работе использовалась аэродинамическая труба открытого типа, оснащенная вентилятором типа АХС 560-6/26-2 (рисунк 1, б).

Испытания проводились в тестовой секции, которая монтируется между конфузуром и диффузором и не имеет поддерживающей рамы (крепится к фланцам соседних секций). Секция имеет квадратное сечение рабочей зоны, боковые стенки выполнены из прозрачного материала толщиной 10 мм. В стенках тестовой секции предусмотрены отверстия с резьбой для введения измерителей скорости потока и давления — трубок Пито.

Были проведены экспериментальные исследования зависимости частоты вращения ветроколеса от скорости потока воздуха. Для этого ветроколесо устанавливалось в аэродинамической трубе так, чтобы ось вращения была перпендикулярна направлению движения воздушного потока. На торце ветроколеса устанавливался датчик, позволяющий фиксировать частоту вращения ветроколеса при набегаии на него воздушного потока.

В ходе эксперимента через аэродинамическую трубу проходил воздушный поток. При этом скорость потока изменялась от 2 м/с до 12 м/с. Фиксировалось значение частоты вращения ветроколеса при каждом значении скорости потока.

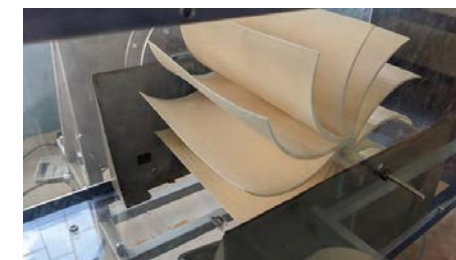
На рисунке 2 представлен график зависимости частоты n вращения ветроколеса от скорости v воздушного потока.

Из графика видно, что данная зависимость имеет линейный вид и описывается выражением

$$n = 75,773 \cdot v - 196,8. \quad (5)$$

В дальнейшем данная зависимость использовалась в процессе моделирования при задании начальных параметров процесса.

Геометрия и основные конструктивные параметры ветроколеса и участка аэродинамической трубы были заданы пакетом трехмерных чертежей в формате m3d (КОМПАС-3D (№ Бл-17-00044)). На рисунке 3, а



а



б

Рисунок 1 — Общий вид модельного ветроколеса (а) и аэродинамической трубы (б)

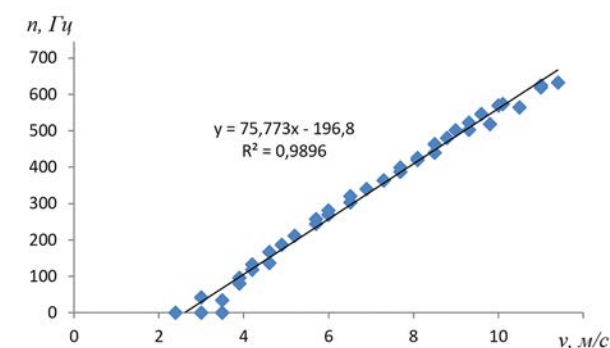
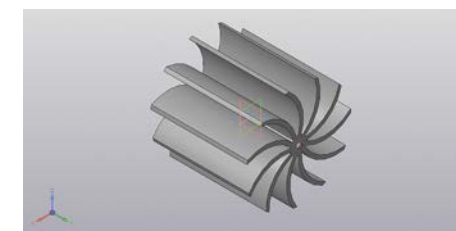
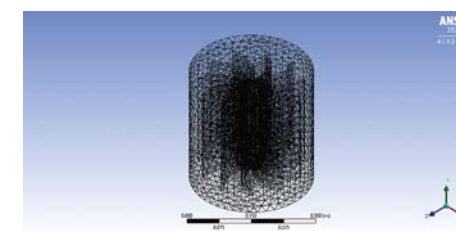


Рисунок 2 — График зависимости частоты вращения ветроколеса от скорости воздушного потока



а



б

Рисунок 3 — CAD-модель ветроколеса (а) и фрагмент расчетной сетки вращающегося домена (б)

представлено изображение твердотельной CAD-модели ветроколеса.

Генерация расчетной сетки проводилась в полуавтоматическом режиме в ANSYS Meshing (рисунок 3, б).

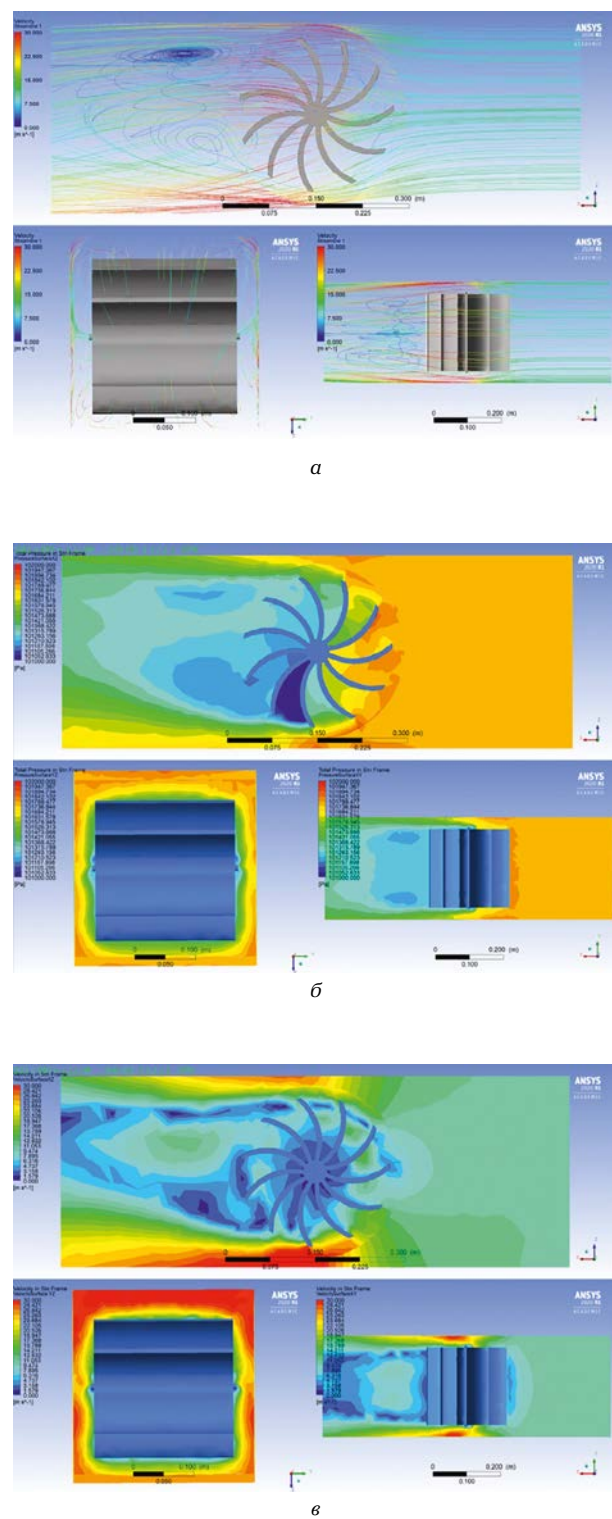


Рисунок 4 – Визуализация линий тока (а), поля давлений (б) и поля скоростей (в) в плоскостях YZ (сверху), XZ (слева), XY (справа)

Для решения поставленной задачи компьютерного моделирования численно интегрировались трехмерные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса. Для замыкания уравнений движения была взята модель турбулентности SST (Shear Stress Transport), в качестве рабочей среды использовался вязкий несжимаемый газ (воздух), плотность воздуха $1,25 \text{ кг/м}^3$.

Время расчета обтекания ветроустановки (фиксированы скорость ветра и число оборотов вращения ветроколеса) составляет в среднем 4 ч.

Результаты моделирования

На рисунке 4 приведена серия компьютерных визуализаций для ветроколеса, позволяющая выявить основные закономерности обтекания ветроустановки (скорость потока задавалась равной 11 м/с).

Как видно из рисунка 4, а, в области за ветроколесом происходит турбулизация потока, которая сохраняется на протяжении всего эксперимента.

В пространстве за ветроколесом образуются области низкого давления (см. рисунок 4, б). Также видно, что в пространстве между некоторыми лопастями наблюдаются области низкого давления.

В области за ветроколесом наблюдается пространство со скоростью меньшей, нежели скорость вокруг него (см. рисунок 4, в). Это объясняется наличием турбулентных потоков в этой области.

Для проверки адекватности расчетов были проведены эксперименты в аэродинамической трубе (см. рисунок 1, б). В ходе экспериментов измерялись значения скоростей воздушного потока в тестовой секции. Замеры проводились в положениях трубки Пито, представленных на рисунке 5.

Для измерения скорости потока воздуха трубка Пито располагалась в тестовой секции слева и справа от ветроколеса на расстоянии 35 см от оси вращения на различных высотах относительно горизонтальной оси симметрии колеса. Стрелками на схеме показано направление движения потока воздуха.

Замеры скоростей потока проводились для различных средних скоростей на входе в тестовую зону.

Экспериментальные зависимости скорости потока воздуха (слева а и справа б от ветроколеса) от высоты относительно оси симметрии ветроколеса при различных средних скоростях потока на входе в тестовую зону приведены на рисунке 6.

Были проведены сравнения экспериментальных данных с расчетными. На рисунках 7 и 8 представ-

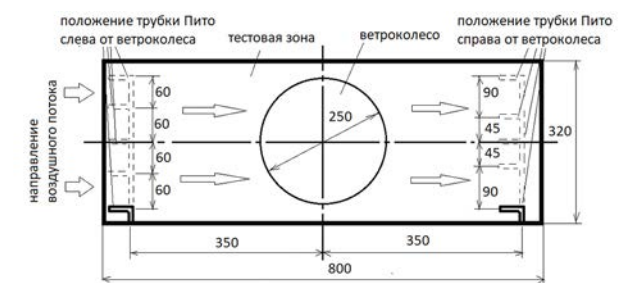


Рисунок 5 – Схема размещения трубки Пито в ходе эксперимента

лены графики зависимости расчетных (линии) и экспериментальных (символы) значений скоростей потока воздуха от высоты относительно оси симметрии ветроколеса.

Оценка полученных результатов показала достаточно хорошее согласование экспериментальных и расчетных данных.

Были проведены расчеты значений механической мощности и коэффициента использования энергии при различных скоростях воздушного потока. На рисунке 9 представлены графики зависимости средних значений механической мощности (а) и коэффициента использования энергии (б) от скорости воздушного потока.

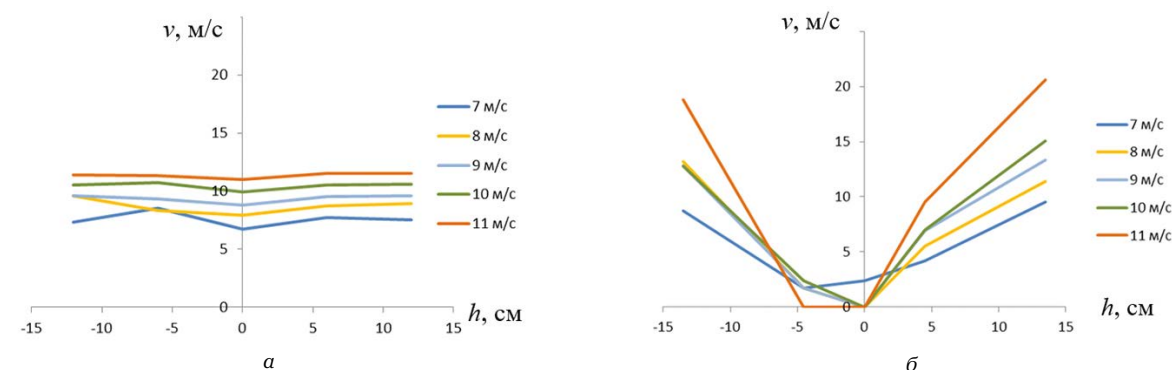


Рисунок 6 – Экспериментальные зависимости скорости потока воздуха (слева (а) и справа (б) от ветроколеса) от высоты относительно оси симметрии ветроколеса при различных средних скоростях потока на входе в тестовую зону

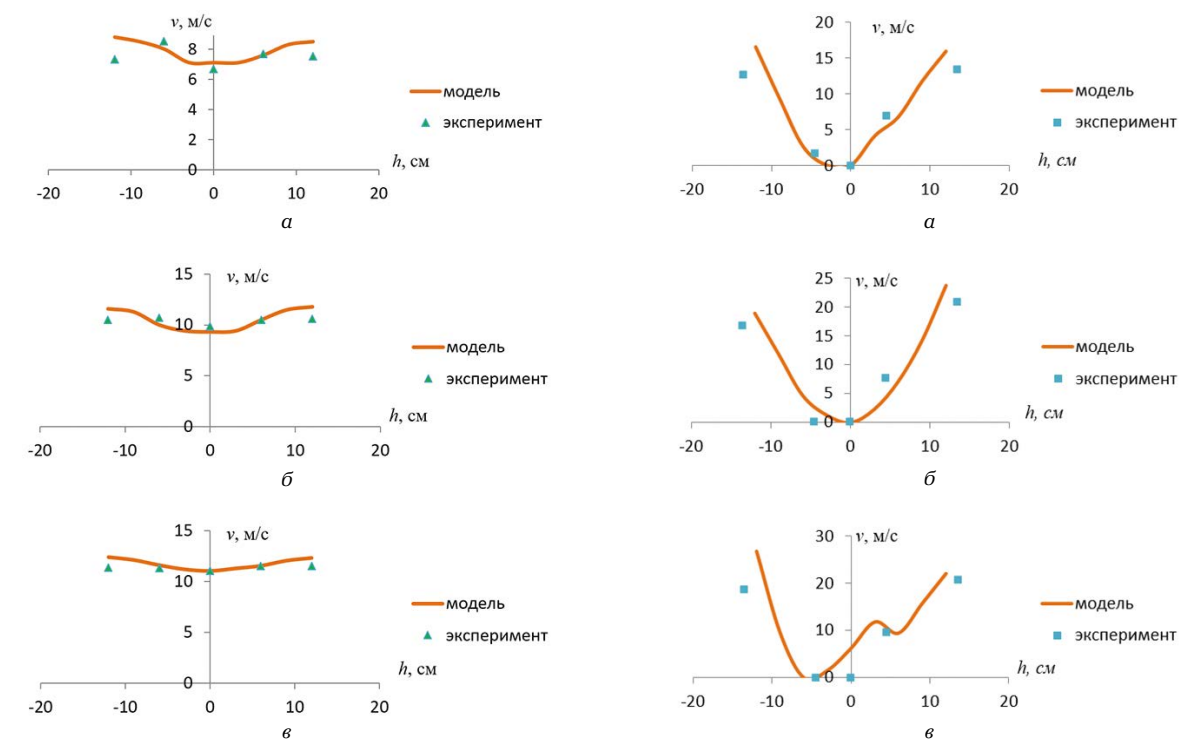


Рисунок 7 – Графики зависимости расчетных и экспериментальных значений скоростей потока воздуха (слева от ветроколеса) от высоты относительно оси симметрии ветроколеса при средней скорости потока воздуха на входе в тестовую зону 7 м/с (а), 10 м/с (б) и 11 м/с (в)

Из графиков видно, что наблюдается максимум зависимости мощности от скорости потока. Этот максимум соответствует скорости потока воздуха $9,9 \text{ м/с}$. При данной скорости мощность ветроколеса составила $3,067 \text{ Вт}$, а коэффициент использования энергии потока ветра – $0,1005$. Таким образом, оптимальная скорость работы ветроколеса рассмотренного типа составляет $9,9 \text{ м/с}$.

Следует отметить, что полученные значения не стоит сравнивать с реальными ВЭУ без использования коэффициентов масштабирования.

Рисунок 8 – Графики зависимости расчетных и экспериментальных значений скоростей потока воздуха (справа от ветроколеса) от высоты относительно оси симметрии ветроколеса при средней скорости потока воздуха на входе в тестовую зону 7 м/с (а), 10 м/с (б) и 11 м/с (в)

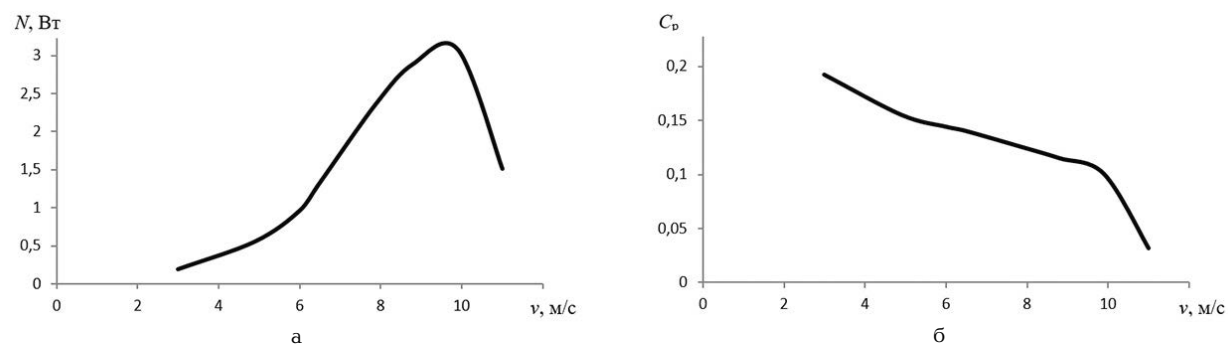


Рисунок 9 – Графики зависимости средних значений механической мощности (а) и коэффициента использования энергии (б) от скорости воздушного потока

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Фрид, Ю. В. Электросветосигнальное оборудование аэродромов / Ю. В. Фрид [и др.]. – М.: Транспорт, 1988. – 318 с.
- Доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии [Электронный ресурс] / Статистический ежегодник мировой энергетики. – Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.ru/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html>. – Дата доступа: 26.01.2022.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable capacity statistics 2020 / International Renewable Energy Agency (IRENA). – Abu Dhabi, 2020. – 66 p.
- Петруша, Ю. С. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь / Ю. С. Петруша, Н. А. Попкова // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2019. – № 62 (2). – С. 124–134.
- Charvinski, V. Possibility of the electric vehicle-to-home charging using renewable energy sources / Viachaslau Charvinski, Helene Kostukevich, Artur Rusowicz // Rynek Energii. – 2020. – №1 (146). – P. 76–78.
- Аванесова, Т. И. Экономическая оценка использования ветровых энергетических установок в Камчатской области / Т. И. Аванесова, А. В. Мокряк // Вестник КамчатГУ. – 2006. – № 5. – С. 25–28.
- Ветроэнергетика / ред. Д. де Рензо; пер. Я. И. Шефтер. – Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.
- Гордов, Р. В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Р. В. Гордов, В. Е. Губин, А. С. Матвеев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 294 с.
- Михайленко, Е. Ю. Обзор существующих конструкций ветроэнергетических установок / Е. Ю. Михайленко // Праці ТДАТУ. – 2013. – Т. 2, № 13. – С. 188–193.
- Германович, В. Альтернативные источники энергии и энергосбережение. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы / В. Германович, А. Турилин. – СПб.: Наука и Техника, 2014. – 320 с.
- ANSYS CFX [Электронный ресурс] / CAE Expert. – Режим доступа: <https://cae-expert.ru/product/ansys-cfx>. – Дата доступа: 18.04.2020.

REFERENCES

- Frid, Yu. V. Electrical lighting equipment of airfields / Yu. V. Frid [et al.]. – M.: Transport, 1988. – 318 p.
- The share of renewable energy sources in electricity generation [Electronic resource] / Statistical Yearbook of World Energy. – Mode of access: <https://yearbook.enerdata.ru/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html>. – Date of access: 01.26.2022.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable capacity statistics 2020 / International Renewable Energy Agency (IRENA). – Abu Dhabi, 2020. – 66 p.
- Petrusha, Yu. S. Prospects for the development of wind energy in the Republic of Belarus / Yu. S. Petrusha, N. A. Popkova // Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. – 2019. – № 62 (2). – P. 124–134.
- Charvinski, V. Possibility of the electric vehicle-to-home charging using renewable energy sources / Viachaslau Charvinski, Helene Kostukevich, Artur Rusowicz // Rynek Energii. – 2020. – No. 1 (146). – P. 76–78.
- Avanesova, T. I. Economic assessment of the use of wind power plants in the Kamchatka region / T. I. Avanesova, A. V. Mokryak // Bulletin of KamchatGU. – 2006. – No. 5. – P. 25–28.
- Wind power / ed. D. de Renzo; per. ME AND. Shefter. – Energoatomizdat, 1982. – 272 p.
- Gordov, R.V. Non-traditional and renewable energy sources: textbook / R. V. Gordov, V. E. Gubin, A. S. Matveev. – Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2009. – 294 p.
- Mikhailenko, E. Yu. Review of existing designs of wind power plants / E. Yu. Mikhailenko // Pratsi TDAU. – 2013. – V. 2, No. 13. – P. 188–193.
- Germanovich, V. Alternative energy sources and energy saving. Practical designs for the use of wind energy, sun, water, land, biomass / V. Germanovich, A. Turilin. – St. Petersburg.: Science and Technology, 2014. – 320 p.
- ANSYS CFX [Electronic resource] / CAE Expert. – Mode of access: <https://cae-expert.ru/product/ansys-cfx>. – Date of access: 04.18.2020.

Статья поступила в редакцию
27.01.2022

ИТЕРАЦИОННОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА СВЯЗИ ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМ ЧАСТОТНОМ РАЗДЕЛЕНИИ КАНАЛОВ

Вячеслав Петрович Тузлуков – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
slava.tuzlukov@mail.ru

Vyacheslav Tuzlukov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department of Technical Maintenance of Aviation and Radio Electronic Hardware, Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
slava.tuzlukov@mail.ru

Аннотация: при передаче сигналов с базовой станции на мобильную платформу пользователя (беспилотный летательный аппарат (БЛА)) эксплуатационная надежность ортогонального частотного разделения каналов ограничивается изменяющимися во времени параметрами канала связи, что является причиной возникновения перекрестных помех, увеличивает ошибки при определении ширины полосы пропускания канала связи. В данной работе, мы моделируем перекрестные помехи, используя изменения амплитуды сигналов в канале связи в зависимости от времени, что позволяет нам разработать относительно простую структурную схему приемного устройства, которая способна многократно компенсировать перекрестные помехи и получить максимальное значение отношения сигнал/(шум+перекрестные помехи) на выходе обнаружителя. Предлагается новый подход для оценивания параметров канала связи с целью повышения эксплуатационной надежности в реальных условиях при использовании наземных или спутниковых систем связи. Моделирование характеристик приемника с одной или двумя принимающими антеннами показывает, что небольшое число итераций для подавления перекрестных помех и оценивания параметров канала связи обеспечивает устойчивый прием сигналов при скорости движения БЛА выше 100 км/час.

Ключевые слова: оценка параметров канала связи, компенсация помехи, система связи с мобильными объектами, ортогональное частотное разделение каналов.

Annotation: in mobile reception, the reliability of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is limited because of the time-varying nature of the channel. This causes intercarrier interference (ICI) and increases inaccuracies in channel tracking. In this paper, we model the ICI using derivatives of the channel amplitude. This allows us to design a relatively simple receiver scheme that iteratively cancels the ICI. The design of the canceller aims at maximizing the signal-to-noise-plus-ICI ratio at the detector input. We also propose a new channel estimator, and we show that it achieves reliable mobile reception in practical situations that are relevant to terrestrial Digital Video Broadcasting. Extensive simulations for a receiver with one or two antennas show that a small number of iterations between ICI cancellation and channel estimation allow a reliable reception at remotely-piloted aerial vehicle speeds above 100 km/h.

Keywords: channel estimation, interference cancellation, mobile communications, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM).

Введение

Ортогональное частотное разделение каналов является общепризнанным и эффективным методом модуляции в широком смысле для систем радио- и спутниковой связи. При использовании ортогонального частотного разделения каналов поток

сигналов модулируется с использованием большого количества несущих частот, равноудаленных друг от друга в частотной области [1]. Демодуляция и модуляция сигналов эффективно осуществляется посредством прямого и инверсного (обратного) быстрого преобразования Фурье, соответственно. При передаче сигналов

по радиоканалу ортогональность сигналов поддерживается только в случае медленных замираний в канале связи, и параметры канала связи медленно изменяются с течением времени. Однако в случае рассеивающего канала связи встречаются взаимные и собственные помехи как при одном и том же значении несущей

частоты (межсимвольные помехи), так и при различных значениях несущей частоты (перекрестные помехи). В случае частотно-избирательных каналов связи, параметры которых инвариантны по времени, межсимвольные помехи, так же, как и взаимные или перекрестные помехи, могут эффективно подавляться. В случае частотно-избирательных каналов связи, параметры которых инвариантны по времени, можно эффективно подавлять как межсимвольные помехи, так и взаимные или перекрестные помехи при использовании циклического префикса перед каждым блоком параллельных символов данных [2]. В настоящей работе мы рассматриваем каналы передачи данных с изменяющимися во времени параметрами, в которых взаимные или перекрестные помехи встречаются при различных значениях несущей частоты, т. е. при разных поднесущих частотах [2–8].

В настоящее время широкое использование наземных цифровых каналов для передачи телевизионных сигналов постоянно расширяется для получения высокоскоростной обработки информации в различных сферах применения при наличии подвижной платформы пользователя. Например, широкополосный Интернет обеспечивается за счет использования альтернативного узкополосного обратного канала сотовой связи. В то же время, как требования к спектральной эффективности цифровой передачи телевизионных сигналов, так и перегруппировка радиосетей с одной несущей частотой указывает на эффективность использования режима «8к», т. е. использование 8192 поднесущих частот. К сожалению, взаимные или перекрестные помехи оказывают существенное влияние на функционирование систем, имеющих большое количество плотно распределенных поднесущих частот в узком частотном диапазоне, и их воздействие частично сказывается на скорости полета беспилотного летательного аппарата (БЛА), при которой обеспечивается устойчивый прием информационных сигналов с требуемой вероятностью ошибки.

Некоторые решения, способствующие подавлению взаимных или перекрестных помех, также, как и предварительное кодирование, позволяющее осуществлять автоматическое устранение этого вида помех [7], требуют модификации формата передачи данных таким образом, что не наблюдается соответствия существующим стандартам. Другие методы согласуются с существующими схемами передачи данных, но могут быть неприемлемыми при высокой скорости полета БЛА. Например, общепринятое комбинирование множества приемных антенн [8, 9] теряет эффективность при высоких значениях скорости полета БЛА. В самом деле, при использовании основных методов частотного разнесения каналов взаимные или перекрестные помехи могут рассматриваться в виде дополнительного аддитивного белого гауссовского шума. Тем не менее, необходимо, чтобы алгоритм обработки сигналов приемным устройством учитывал тот факт, что взаимные или перекрестные помехи структурируются в соответствии со стандартами передачи данных. В настоящей работе используется такой подход, однако ранее предлагалось использовать аналогичный подход в адаптивном матричном корректирующем устройстве [10], хотя его структурная сложность неприемлема для использования в системах с большим количеством поднесущих частот. В [11] была сделана попытка компенсации взаимных или перекрестных помех при использовании 2-ступенчатой схемы принятия решений с обратной связью. Первоначально использовалось стандартное корректирующее устройство со схемой обратной связи, т. е. использовалась поднесущая частота одноотводного фильтра. Данные, полученные экспериментально, использовались для регенерации перекрестных или взаимных помех, которые затем вычитаются или извлекаются из принятого сигнала. Определяется оценка максимального правдоподобия для параметров канала связи, получаемая для особого случая, когда передается тестовый блок данных. Особое внимание в на-

стоящей работе уделяется оцениванию параметров канала связи, по которому идет обмен информацией между базовой станцией и БЛА. Результаты моделирования, представленные в [9], показывают, что необходимо использовать относительно длительную интерполяцию контрольных сигналов для более точного оценивания параметров канала связи, которые изменяются по истечении определенного временного интервала.

В настоящей работе рассматривается ортогональное частотное разделение каналов при использовании быстрого преобразования Фурье и комбинации схем модуляции, но без тестовой последовательности. Целью настоящей работы является демонстрация возможности устойчивого и надежного приема и обработки сигналов приемным устройством БЛА при скорости полета свыше 100 км/час при определенных ограничениях относительно сложности алгоритмов обработки сигналов. С этой целью, в данной работе рассматривается многошаговая компенсация взаимных или перекрестных помех и методы и алгоритмы оценки параметров канала связи. Первый вывод, который делается, заключается в том, что устройства оценки используют управляющие сигналы, вследствие чего обеспечиваются требуемые показатели приема и обработки сигналов при использовании одной приемной антенны при скорости полета БЛА свыше 100 км/час.

Модель системы

При модуляции с ортогональным частотным разделением каналов поток данных при скорости передачи $R = 1/T$ разделяется на N вложенных потоков данных со скоростью передачи R/N , которые модулируются фильтрами с амплитудно-частотной характеристикой прямоугольной формы на различных поднесущих частотах, равномерно распределенных с частотой $f_s = 1/(TN)$. Пусть S_m – данные пользователя со средней мощностью E_s на поднесущей частоте $m(m = 0, 1, \dots, N-1)$, $j = \sqrt{-1}$. Для одного блока данных модули-

рованный сигнал в q -й момент времени может быть представлен в следующем виде:

$$S_q = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} s_m \exp\{2\pi jmq/N\}, \quad q = 0, 1, \dots, N-1. \quad (1)$$

Следуя общепринятой практике, для систем с ортогональным частотным разделением каналов, используется циклический префикс, т. е., начинается передаваться блок данных \tilde{S} , используя последние L выборок матрицы данных S . Таким образом,

$$\tilde{S}_q = \begin{cases} S_{q+(N-L)}, & q = 0, 1, \dots, L-1 \\ S_{q-L}, & q = L, L+1, \dots, L+N-1. \end{cases} \quad (2)$$

Характеристики фильтров передающего и приемного устройств, а также синхронизация по времени t_0 описываются импульсной характеристикой $g(\tau - t_0)$, где τ обозначает время задержки и является случайной величиной.

Модель канала связи, параметры которого изменяются во времени

Канал передачи данных моделируется как совокупность $i = 1, 2, \dots, N_h$ разрешаемых компонент сигнала при многолучевом распространении, каждая из которых обладает задержкой τ_i и изменяющимся во времени коэффициентом канала $\tilde{h}_i(t)$, обусловленным замираниями в канале связи. Тогда изменяющаяся во времени импульсно-переходная характеристика канала имеет вид:

$$h(t, \tau) = \sum_{i=1}^{N_h} \tilde{h}_i(t) \delta(\tau - \tau_i). \quad (3)$$

Характеристика канала дискретизируется в моменты lT , хотя и изменяется непрерывно как функция времени t . Для учета фильтров передающего и приемного устройств эквивалентные дискретизированные во времени отводы канального фильтра могут быть представлены следующим образом:

$$c_l(t) = \sum_{i=1}^{N_h} \tilde{h}_i(t) g(t_0 - \tau_i + lT), \quad l = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

Сигнал y_m , принимаемый на m -й поднесущей частоте, содержит в себе передаваемый информационный сигнал и аддитивный белый гауссовский шум w_m с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью мощности $\mathcal{N}_0/2$. Тогда:

$$y_m = \sum_{q=0}^{N-1} \exp\{-2\pi jqm/N\} \sum_l c_l(qT) \tilde{S}_{q-l+L} + w_m, \quad (5)$$

где $m = 0, 1, \dots, N-1$.

С целью разработки фильтров, подавляющих взаимные или перекрестные помехи, для дальнейшей разработки модели канала связи представим

коэффициенты канала $\tilde{h}_i(t)$ в виде ряда Тейлора как функцию от параметра t вокруг $t = NT/2$, причем, первый член разложения определяется при $t = 0$ на входе блока быстрого преобразования Фурье приемного устройства. Расширим импульсную переходную характеристику $h(t, \tau)$ только относительно t , а не относительно τ . Пусть $\beta_i^{(p)}$ определяет производную p -го порядка от $\tilde{h}_i(t)$ при $t = NT/2$, т. е.

$$\beta_i^{(p)} = \left[\frac{d^p \tilde{h}_i(t)}{dt^p} \right]. \quad (6)$$

В частности, если коэффициент $\tilde{h}_i(t)$ характеризует малое количество лучей распространения сигнала, т. е., N_h меньше той величины, которая будет рассматриваться в параграфе 2.2, эти производные конечны и быстро уменьшаются по величине по мере возрастания порядка p . Для обозначения коэффициентов в векторной форме определим

$$H_k^{(p)} = \frac{T^p}{p!} \sum_{i=1}^{N_h} \beta_i^{(p)} \sum_l g(t_0 - \tau_i + lT) \exp\{-2\pi jkl/N\}, \quad (7)$$

где $k = 0, 1, \dots, N-1$, $p \geq 0$, и мы можем использовать следующую векторную форму:

$$\mathbf{H}^{(p)} = [H_0^{(p)}, H_1^{(p)}, \dots, H_{N-1}^{(p)}]. \quad (8)$$

Действительно, подобное представление позволяет выразить принимаемый сигнал в следующей форме:

$$y_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k \sum_{q=0}^{N-1} \exp\{-2\pi j(m-k)q/N\} \times \sum_{p=0}^{\infty} H_k^{(p)} (q - 0, 5N)^p + w_m. \quad (9)$$

Используя элементы $\{y_m\}, \{s_m\}, \{w_m\}$, можно сформировать векторы $\mathbf{y}, \mathbf{s}, \mathbf{w}$ размерностью $N \times 1$, соответственно. Тогда (8) можно записать в более компактной векторной форме

$$\mathbf{y} = \left[\sum_{p=0}^{\infty} \Xi^{(p)} \text{diag}(\mathbf{H}^{(p)}) \right] \mathbf{s} + \mathbf{w}, \quad (10)$$

где $\text{diag}(\mathbf{H}^{(p)})$ – диагональная матрица, созданная на основе вектора-столбца $\mathbf{H}^{(p)}$. Матрица $\Xi^{(p)}$ размером $N \times N$ и строками

$$[\Xi^{(p)}]_{m,k} = \frac{1}{N} \sum_{q=0}^{N-1} (q - 0, 5N)^p \exp\{-2\pi j(m-k)q/N\}, \quad (11)$$

$m, k = 0, 1, \dots, N-1$, $p = 0, 1, \dots$, описывает потери, возникающие вследствие взаимодействия передаваемого сигнала на k -й поднесущей частоте и принимаемого сигнала на m -й поднесущей частоте [12]. Интересно, что $\{\Xi^{(p)}\}$ является фиксированной матрицей, что означает, что эта матрица действует как константа системы и никогда не взаимодействует ни с передаваемыми данными, ни с параметрами канала $\mathbf{H}^{(p)}$.

Мощность взаимных или перекрестных помех, определяемая производной порядка p , может быть представлена в следующем виде:

$$\sigma_{(p)}^2 = E[\{\Xi^{(p)} \text{diag}(\mathbf{H}^{(p)})\mathbf{s}\}_m^2], \quad (12)$$

где $(\mathbf{x})_m$ обозначает m -й элемент вектора \mathbf{x} . Игнорируя некоторые граничные эффекты, мощность взаимных или перекрестных помех можно считать равномерно распределенной по всем поднесущим частотам.

Для общепринятой модели канала связи с замираниями, $\tilde{h}_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, N_h$ являются комплексными независимыми случайными процессами с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_i^2 . Кроме того, статистическое описание каждой ветви канала связи, параметры которой изменяются во времени, одинаковы для всех ответвлений канала связи, т. е., $\tilde{h}_i(t) = \sigma_i^2(\tau_i)v_i(t)$, где $v_i(t)$ являются независимыми и идентично распределенными случайными величинами и не зависят от времени задержки τ_i . Используя оператор транспонирования T , как это следует из (7), элемент $(k_1 + pN, k_2 + qN)$ корреляционной матрицы

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}^{(0)T}, \mathbf{H}^{(1)T}, \dots, \mathbf{H}^{(P-1)T}]^T \quad (13)$$

может быть представлен в следующем виде:

$$E[\mathbf{H}^H \mathbf{H}]_{(k_1 + pN, k_2 + qN)} = \frac{T^{q+p}}{q!p!} \sum_{i_1} \sum_{i_2} E \left[\frac{d^p \tilde{h}_{i_1}}{dt^p} \cdot \frac{d^q \tilde{h}_{i_2}^*}{dt^q} \sum_{l_1} \sum_{l_2} g(t_0 - \tau_{i_1} + l_1 T) \times \exp\{-2\pi j(k_1 l_1 - k_2 l_2)/N\} g(t_0 - \tau_{i_2} + l_2 T) \right], \quad (14)$$

где \mathbf{H} и $*$ обозначают оператор Эрмита и комплексное сопряжение, соответственно.

Есть возможность разделить члены для $i_1 = i_2$ и для $i_1 \neq i_2$. Кроме того, может показаться, что корреляционная матрица с элементами $\{\beta_i^{(p)}\}$ может быть разложена на множители как произведение одного члена, связанного только с порядком производной p и q , (16) и (18), (см. ниже) и второго сомножителя, зависящего от порядкового номера ветви канала связи i и степени разнесения по частоте, индексы n и m в (17) и (19) (см. ниже). Более точно корреляционная матрица \mathbf{H} коэффициента усиления канала связи может быть представлена в следующем виде:

$$\mathbf{R}_H = E[\mathbf{H}^H \mathbf{H}] = \mathbf{R}_{c_1} \otimes \mathbf{R}_{f_1} + \mathbf{R}_{c_2} \otimes \mathbf{R}_{f_2}, \quad (15)$$

где \otimes обозначает произведение Кронекера; \mathbf{R}_{f_1} и \mathbf{R}_{f_2} являются матрицами с размерностью $N \times N$, и матрицы \mathbf{R}_{c_1} и \mathbf{R}_{c_2} обладают размерностью $P \times P$ причем,

$$[\mathbf{R}_{c_1}]_{p,q} = \frac{T^{p+q}}{p!q!} E[v_i^{(p)}]E[(v_i^{(q)})^*]; \quad (16)$$

$$[\mathbf{R}_{f_1}]_{n,m} = \sum_{i_1} \sum_{i_2 \neq i_1} \sum_{l_1} \sum_{l_2} E[g(t_0 - \tau_{i_1} + l_1 T) \times g^*(t_0 - \tau_{i_2} + l_2 T) \sigma_{i_1}^2 (\sigma_{i_2}^2)^*] \exp\{-2\pi j(l_1 n - l_2 m)/N\}; \quad (17)$$

$$[\mathbf{R}_{c_2}]_{p,q} = \frac{T^{p+q}}{p!q!} E[v_i^{(p)}(v_i^{(q)})^*]; \quad (18)$$

$$[\mathbf{R}_{f_2}]_{n,m} = \sum_i \sum_{l_1} \sum_{l_2} E[|g(t_0 - \tau_{i_1} + l_1 T)|^2 \sigma_i^2]^2 \times \exp\{-2\pi j(l_1 n - l_2 m)/N\}, \quad (19)$$

где $v_i^{(p)}$ является p -й производной v_i при $t = 0, 5NT$. Для элемента $\{p, q\}$ видно, что математическое ожидание в (16) – (19) определяется по всем возможным случайным параметрам канала связи в соответствии с профилем времени задержки $\{\tau_i, \sigma_i^2\}$.

С целью упрощения модели обобщенного канала связи с изменяющимися во времени параметрами, т. е., уменьшения множества параметров, сконцентрируем свое внимание на сингулярном разложении корреляционных матриц. Кроме того, ограничим бесконечное разложение в ряд производных в (10) до P членов, т. е., $p = 0, 1, \dots, P-1$, с целью аппроксимации принимаемого сигнального вектора \mathbf{y} параметрами канала связи, число которых не превышает NP .

Пусть $\mathbf{U}_1^{(p)}$ и $\mathbf{U}_2^{(p)}$ являются матрицами собственных векторов $[\mathbf{R}_{c_1}]_{p,p}$, \mathbf{R}_{f_1} и $[\mathbf{R}_{c_2}]_{p,p}$, \mathbf{R}_{f_2} , соответственно. Определим $\Delta_1^{(p)}$ и $\Delta_2^{(p)}$ как диагональные матрицы, элементы которых представляют собой собственные значения векторов $[\mathbf{R}_{c_1}]_{p,p}$, \mathbf{R}_{f_1} и $[\mathbf{R}_{c_2}]_{p,p}$, \mathbf{R}_{f_2} , соответственно. Разложение по сингулярным значениям векторов $[\mathbf{R}_{c_1}]_{p,p}$, \mathbf{R}_{f_1} и $[\mathbf{R}_{c_2}]_{p,p}$, \mathbf{R}_{f_2} позволяет записать

$$E[\mathbf{H}_1^{(p)H} \mathbf{H}_1^{(p)}] = \mathbf{U}_1^{(p)H} \Delta_1^{(p)} \mathbf{U}_1^{(p)} + \mathbf{U}_2^{(p)H} \Delta_2^{(p)} \mathbf{U}_2^{(p)}. \quad (20)$$

Переустроявая сингулярно расположенные матрицы, появляется возможность расположить собственные числа матриц $\Delta_1^{(p)}$ и $\Delta_2^{(p)}$ в порядке уменьшения от позиции (1,1) до $(\underline{N}_1 + 1, \underline{N}_1 + 1)$, соответственно. Игнорируем наиболее низкие значения собственных чисел за пределами $(N - \underline{N})$ наиболее больших значений собственных чисел в векторах $[\mathbf{R}_{c_1}]_{p,p}$, \mathbf{R}_{f_1} и $[\mathbf{R}_{c_2}]_{p,p}$, \mathbf{R}_{f_2} , соответственно. Аппроксимируем каждый вектор производных $\mathbf{H}_1^{(p)}$ вектором $\mathbf{H}_1^{(p)}$ с размерностью $\underline{N} = \underline{N}_1 + \underline{N}_2$ в следующем виде:

$$\mathbf{H}^{(p)} \approx \mathbf{F}^{(p)} \mathbf{H}^{(p)}, \quad (21)$$

где $\mathbf{F}^{(p)}$ представляет собой матрицу размером $N \times N$, содержащую собственные векторы, связанные с \underline{N}_1 и \underline{N}_2 наиболее значительными собственными числами.

Модель (21) описывает канал связи с уменьшенным набором параметров, а \underline{N}_1 и \underline{N}_2 могут быть выбраны согласно желаемой аппроксимации. Отметим, что для канала связи с изменяющимися во времени параметрами выражение (21) сводится к описанию канала связи с сингулярным разложением [13].

Моделирование на основе модели Джейка

При проведении моделирования используется предположение Джейка [14]: аппроксимировать амплитуду релейских замираний в канале связи малым числом N_j дискретных компонент. Этот прием

позволяет представить коэффициент усиления канала связи для i -й ветви в следующем виде:

$$\tilde{h}_i(t) = h_i(t) \frac{1}{N_j} \sum_{l=0}^{N_j-1} \exp\{2\pi j f_i N_j (t - 0.5TN)\}. \quad (22)$$

В этом случае, доплеровские сдвиги $\{f_i\}$ представляют собой независимые идентично распределенные случайные величины, определяемые следующим образом:

$$f_i = (v/c) f_c \cos \theta_i, \quad (23)$$

где v есть скорость полета БЛА, c представляет собой скорость света, f_c является частотой несущего колебания. Для задержки времени с экспоненциальным профилем (экспоненциальное распределение), получаем:

$$\begin{cases} \sigma_i^2 = \exp\{-\tau_i/\tau_{rms}\}, \\ v_i = \frac{1}{N_j} \sum_{l=0}^{N_j-1} \exp\{2\pi j f_i N_{j+1} (t - 0.5NT)\}, \end{cases} \quad (24)$$

где τ_{rms} – среднеквадратическое отклонение времени задержки. Моделирование выполняется в соответствии с моделью Джейка (22), принимая во внимание равноудаленные углы приема сигнала θ_i в пределах интервала $[0, 2\pi)$.

Итеративное подавление взаимных или перекрестных помех

В [10] был предложен линейный фильтр с положительной обратной связью для подавления взаимных или перекрестных помех. Однако этот фильтр требует адаптации матричного корректирующего устройства к изменяющимся во времени параметрам канала связи и имеет довольно сложную структуру. Вместо этого, рассмотрим корректирующее устройство для принятия решения с обратной отрицательной связью, которое выполняет итеративное подавление взаимных или перекрестных помех. Итеративное обнаружение и подавление помех раньше использовалось для устранения влияния сигналов, источниками которых являются другие пользовате-

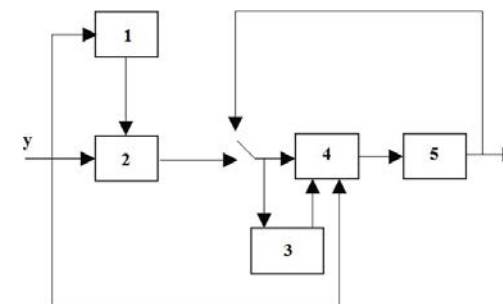


Рисунок 1 – Схема компенсации доплеровской частоты: 1 – устройство оценки параметров канала связи; 2 – двусторонний ограничитель амплитуды (слайсер); 3 – устройство оценки доплеровской частоты; 4 – компенсатор помехи; 5 – двусторонний ограничитель амплитуды (слайсер)

ли, при параллельном подавлении помех для систем связи с множественным доступом и кодовым разделением каналов [15]. Также итеративное подавление помех было предложено в [16] с целью уменьшения уровня взаимных или перекрестных помех при передаче сигналов на единственной несущей частоте.

Итеративное корректирующее устройство с обратной отрицательной связью

При проведении первой итерации $n = 1$ принимаемый сигнал \mathbf{y} на входе блока ортогонального частотного разделения каналов корректируется, используя единственный ответвитель, т. е., комплексное умножение на одну поднесущую частоту. Ориентировочные (экспериментальные) символы $\hat{\mathbf{s}}^{(1)}$ используются для обновления оценки мощности взаимных или перекрестных помех, которые вычитаются из принимаемого сигнала \mathbf{y} при следующей итерации. Как показано на рисунке 1, для итераций при $n = 2, 3, \dots, N_I$, данные $\hat{\mathbf{s}}^{(n-1)}$, обнаруженные предварительно, используются для частичного подавления помехи матричным фильтром $\mathbf{V}^{(n)}$ с отрицательной обратной связью согласно

$$\mathbf{y}^{(n)} = \mathbf{y} - \mathbf{V}^{(n)} \hat{\mathbf{s}}^{(n-1)}, \quad n = 2, 3, \dots, N_I. \quad (25)$$

При $n = 1$ выбираются начальные условия $\mathbf{V}^{(1)} = 0$ и $\hat{\mathbf{s}}^{(0)} = 0$. Для фильтра с отрицательной обратной связью $\mathbf{V}^{(n)}$ могут быть приняты различные критерии конструктивного проектирования и дизайна. Например, при $N_I = 2$ и

$$\mathbf{V}^{(2)} = \sum_{p=1}^{P-1} \Xi^{(p)} \text{diag}(\mathbf{H}^{(p)}) \quad (26)$$

восстанавливается корректирующее устройство для принятия решения с обратной отрицательной связью, которое выполняет итеративное подавление взаимных или перекрестных помех [11]. В дополнение, необходимо оценить матрицу коэффициентов усиления канала связи $\mathbf{H}^{(p)}$ при наличии собственного шума и взаимных или перекрестных помех. При использовании итеративных схем предпочтительно оптимизировать устройство оценки мощности помехи во время каждой итерации для обеспечения достоверного обнаружения предварительных данных. В заключение предлагается следующий итеративный алгоритм: 1) установить $n = 1$; 2) выполнить обнаружение данных, операцию, обратную уплотнению импульсных сигналов, декодирование, новое кодирование, повторить уплотнение импульсных сигналов в соответствии со стандартом цифрового телевизионного вещания, т. к. для передачи данных используются видеосигналы; 3) рассчитать матрицу $\mathbf{V}^{(n)}$ и выполнить подавление взаимных или перекрестных помех; 4) увеличить n на единицу; 5) если $n < N_I$, перейти к выполнению пункта 2.

Фильтр с отрицательной обратной связью

Фильтры с отрицательной обратной связью способны максимизировать отношение сигнал/шум + помеха ($SINR$) на входе декодирующего устройства. Таким образом, сначала анализируется

SINR как функция, зависящая от количества шагов итерации n . Предположим, что ошибки передачи данных являются независимыми как от поднесущей частоты, так и от символов данных. Аппроксимируем ошибки на n -м шаге итерации, т. е., $\mathbf{e}^{(n)} = \hat{\mathbf{s}}^{(n)} - \mathbf{s}$ как случайный вектор независимых идентично распределенных случайных комплексных гауссовских величин с нулевым математическим ожиданием и некоррелированными элементами. Определим матрицу следующим образом:

$$\mathbf{E}^{(n)} = \sum_{p=1}^{P-1} \Xi^{(p)} \text{diag}(\mathbf{H}^{(p)}) - \mathbf{B}^{(n)}. \quad (27)$$

SINR перед декодированием для m -й поднесущей частоты может быть представлено в следующем виде:

$$Z_m^{(n)} = \frac{E_s |H_m^{(0)}|^2}{E[|\mathbf{E}_m^{(n)} \mathbf{s} - \mathbf{B}_m^{(n)} \mathbf{e}^{(n-1)}|^2] + \sigma_0^2}, \quad (28)$$

где $(\mathbf{X})_m$ обозначает m -ю строку матрицы \mathbf{X} . При больших значениях N и достаточно селективных каналах, числитель и знаменатель (28) могут рассматриваться как независимые переменные. Поэтому можно записать:

$$Z^{(n)} = \frac{E_s \|\mathbf{H}_m^{(0)}\|^2}{E[|\mathbf{E}_m^{(n)} \mathbf{s} - \mathbf{B}_m^{(n)} \mathbf{e}^{(n-1)}|^2] + \sigma_0^2}, \quad (29)$$

где

$$\|\mathbf{X}\|^2 = \sum_r \sum_c |X_{r,c}|^2. \quad (30)$$

Определим среднее значение SINR после декодирования n -й итерации в следующем виде:

$$\Gamma_n = \frac{E[\|\mathbf{s}\|^2]}{E[\|\mathbf{e}^{(n)}\|^2]}. \quad (31)$$

Фильтр с отрицательной обратной связью, который минимизирует знаменатель (29), максимизирует $Z^{(n)}$, и, в частности,

$$\mathbf{B}^{(n)} = \frac{1}{1 + \Gamma_{n-1}^{-1}} \sum_{p=1}^{P-1} \Xi^{(p)} \text{diag}(\mathbf{H}^{(p)}). \quad (32)$$

При определении соотношения между Γ_n и вероятностью ошибки на символ $P_{er}^{(n)}$ для n -й итерации, заметим, что большинство возможных ошибок встречается тогда, когда точки сигнального созвездия выбираются ошибочно для одной из ближайших точек. Обозначая d_{\min} как минимальное расстояние между двумя точками сигнального созвездия, аппроксимация для Γ_n может быть представлена в следующем виде:

$$\Gamma_n \approx \frac{E_s}{P_{er}^{(n)} d_{\min}^2}. \quad (33)$$

Точное выражение для $P_{er}^{(n)}$, учитывающее статистические свойства канала связи, в частности $Z_m^{(n)}$, получено в [17] и [18].

Устройство оценки амплитуды

Аналогично большинству существующих систем с ортогональным частотным разделением каналов системы управления и обмена информацией с БЛА используют подмножество всех поднесущих частот для передачи управляющего сигнала с целью оценки параметров канала связи [19, 20]. Тем не менее, среднеквадратическая ошибка оценки управляющего сигнала увеличивается экспоненциально с возрастанием скорости полета БЛА так, что происходит искажение параметров управляющего сигнала, что подтверждается в [9]. Следовательно, необходимо исследовать другие стратегии определения оценок параметров управляющего сигнала, которые учитывают изменения во времени параметров канала связи.

Прогнозируемое устройство оценки

Для уменьшения среднеквадратической ошибки первоначальной оценки амплитуды управляющего сигнала возьмем за основу метод прогноза, использующий упрощенную модель (21). С помощью этого метода прогноза модулированного сигнала на каждой поднесущей частоте предоставляется возможность предсказать комплексную амплитуду, используя оценку нуля и первую производную ($P=2$).

Прогнозирование производной для $k+1$ -го блока ортогонального разделения каналов по частоте получается из производных, оценка которых осуществляется в момент времени k , т. е.

$$\mathbf{H}^{(0)}(k+1) = \bar{\mathbf{H}}^{(0)}(k) + T' \bar{\mathbf{H}}^{(1)}(k). \quad (34)$$

Для уменьшения ошибки оценки прогнозируемая оценка рассматривается как взвешенное среднее оценки управляющего сигнала и предыдущей оценки:

$$\bar{\mathbf{H}}^{(0)}(k) = \alpha_k \hat{\mathbf{H}}^{(0)}(k) + (1 - \alpha_k) \mathbf{H}^{(0)}(k), \quad (35)$$

где первоначально весовой коэффициент определяется как $\alpha_0=1$.

Весовые коэффициенты α_k выбираются так, чтобы минимизировать среднеквадратическую ошибку оценки. Величины γ_0^2 и γ_k^2 представляют собой среднеквадратические ошибки оценок $\hat{\mathbf{H}}^{(0)}(k)$ и $\mathbf{H}^{(0)}(k)$, соответственно. Дисперсия ошибки оценки производной нулевого порядка в момент времени k определяется как

$$\sigma_k^2 = E[\|\bar{\mathbf{H}}^{(0)}(k) - \mathbf{H}^{(0)}(k)\|^2] = (1 - \alpha_k)^2 \gamma_{k-1}^2 + \alpha_k^2 \gamma_0^2, \quad (36)$$

и минимизация σ_k^2 относительно α_k позволяет получить

$$\alpha_k = \frac{\gamma_{k-1}^2}{\gamma_0^2 + \gamma_{k-1}^2}. \quad (37)$$

Для упрощения структуры устройства оценки можно вместо (37) использовать $\alpha - \bar{\alpha}$. Для рассматриваемого сценария моделирования оптимизируется эмпирически весовой коэффициент $\bar{\alpha} = 0,6$.

Итеративное устройство оценки для производной нулевого порядка

Усовершенствование оценки получается при итерации оценки производной нулевого порядка и обнаружении информационного сигнала. Эта процедура представлена на рисунке 2. В частности, первоначально обнаруживаются информационные сигналы, передаваемые на всех поднесущих частотах модулированного сигнала для получения оценки $\hat{\mathbf{s}}^{(0)}$, используя информационный сигнал. Затем, оценка $\hat{\mathbf{s}}^{(0)}$ используется для формирования оценки максимального правдоподобия, которая является, на самом деле, максимальной среднеквадратической ошибкой оценки уменьшенного набора параметров для производной нулевого порядка, т. е.

$$\hat{\mathbf{H}}^{(0)} = \left\{ \frac{E_s}{\sigma_0^2} \mathbf{F}^{(0)H} \text{diag}(\hat{\mathbf{s}}^{(0)})^H \text{diag}(\hat{\mathbf{s}}^{(0)}) \mathbf{F}^{(0)} + \mathbf{R}^{(0-1)} \right\}^{-1} \times \mathbf{F}^{(0)H} \text{diag}(\hat{\mathbf{s}}^{(0)})^H \mathbf{y}, \quad (38)$$

где

$$\mathbf{R}^{(p)} = E[\mathbf{H}^{(p)H} \mathbf{H}^{(p)}]. \quad (39)$$

Отметим, что для частотной характеристики канала связи с равными промежутками времени задержки $\tau_l = lT$ произведение

$$\mathbf{F}^{(0)H} \text{diag}(\hat{\mathbf{s}}^{(0)})^H \text{diag}(\hat{\mathbf{s}}^{(0)}) \mathbf{F}^{(0)} \quad (40)$$

представляет собой Тоэплицеву матрицу, первая строка и первый столбец которой состоят из N выборочных значений цифрового преобразования Фурье квадрата выборочных значений информационного сигнала, т. е.

$$\left(\mathbf{F}^{(0)H} \text{diag}(\hat{\mathbf{s}}^{(0)})^H \text{diag}(\hat{\mathbf{s}}^{(0)}) \mathbf{F}^{(0)} \right)_{0,l} = \sum_k |\hat{s}_k^{(0)}|^2 \exp\{-2\pi jlk/N\}, \quad (41)$$

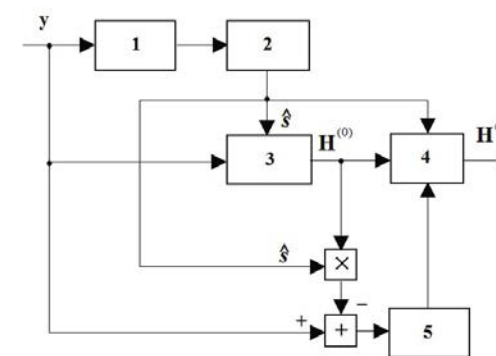


Рисунок 2 – Подавление помехи, используя итеративное оценивание производной нулевого порядка:

1 – устройство оценки параметров управляющего сигнала; 2 – блок принятия решений; 3 – устройство оценки максимального отношения правдоподобия; 4 – устройство оценки максимального отношения правдоподобия; 5 – устройство формирования матрицы Ξ^{-1}

где $l = 0, 1, \dots, N-1$. Кроме того, могут быть использованы устройства оценки, основанные на усреднении оценки максимального отношения правдоподобия [21] и [22] с более упрощенной структурой.

Оценка производных более высокого порядка

Для получения оценки производных $\{\mathbf{H}^{(p)}\}$ оценивающее устройство на основе максимального отношения правдоподобия было предложено в [11]. Поскольку матрицы $\Xi^{(p)}$ не ортогональны, устройство оценки на основе критерия максимального правдоподобия не может быть разделено на P параллельных устройств оценки на основе критерия максимального правдоподобия, т. е., одно устройство для каждой производной, но каждое устройство может функционировать совместно со всеми остальными устройствами оценки. В частности, определяя матрицу как

$$\Xi = [\Xi^{(0)} \text{diag}\{\mathbf{s}\} \mathbf{F}^{(0)}, \dots, \Xi^{(p-1)} \text{diag}\{\mathbf{s}\} \mathbf{F}^{(p-1)}], \quad (42)$$

устройство оценки на основе критерия максимального правдоподобия, которое использует N параметров, а не N , может быть представлено в следующей матричной форме:

$$\hat{\mathbf{H}} = \left(\frac{E_s}{\sigma_0^2} \Xi^H \Xi + \sigma_0^2 \mathbf{R}^{-1} \right)^{-1} \Xi^H \mathbf{y}, \quad (43)$$

где

$$\begin{cases} \mathbf{R} = E[\mathbf{H}^H \mathbf{H}], \\ \mathbf{H} = [\mathbf{H}^{(0)}, \mathbf{H}^{(1)}, \dots, \mathbf{H}^{(N-1)}]. \end{cases} \quad (44)$$

Для расчета $\Xi^H \Xi$ матрица размером $PN \times N$ должна быть умножена на эрмитово-сопряженную матрицу, и перемножение имеет вычислительную сложность $\mathcal{O}(N^2 NP)$. Если возможна тестовая последовательность, то перемножение можно осуществить традиционным способом, и результирующая матрица может быть сохранена в памяти. При отсутствии тестовой последовательности перемножение должно выполняться на основе полученных данных в матрице размером $PN \times N$. Тогда устройство оценки на основе критерия максимального правдоподобия не выполняется для режима Вк, что характерно при передаче цифровых видео сигналов.

Многошаговое устройство оценки параметров канала

Для упрощения процедуры оценивания производных взаимных или перекрестных помех, рассмотрим субоптимальный подход. Многоступенчатая схема оценивает сначала производные с большей мощностью путем моделирования совокупности производных с меньшей мощностью в виде белого шума. Для модели канала, описанной в [11], было показано, что мощность производных помехи затухает быстрее экспоненциального закона. На каждом шаге вклад производных, оценка которых осуществлялась ранее, удаляется из принимаемого сигнала, и оценивается производная помехи следующего по-

рядка. Устройство оценки работает следующим образом. На основании модели сигнала (10) на p -м шаге рассчитывается вектор

$$\mathbf{r}^{(p)} = \mathbf{y} - \sum_{v=0}^{p-1} \Xi^{(v)} \text{diag}(\hat{\mathbf{H}}^{(v)}) \mathbf{s} = \Xi^{(p)} \text{diag}(\hat{\mathbf{H}}^{(p)}) \mathbf{s} + \mathbf{n}^{(p)}, \quad (45)$$

где $\mathbf{n}^{(p)}$ представляет собой остаточные помехи и собственный шум. Определяя инверсное значение минимальной среднеквадратической оценки помехи $\Xi^{(p)}$, получаем приближенную версию $\text{diag}(\mathbf{H}^{(p)}) \mathbf{s}$

$$\mathbf{G}^{(p)} = (\Xi^{(p)*} \Xi^{(p)} + \tilde{\Gamma}^{(p)} \mathbf{I}_p)^{-1} \Xi^{(p)*} \mathbf{r}^{(p)} = (\Xi^{(p)*} \Xi^{(p)} + \tilde{\Gamma}^{(p)} \mathbf{I}_p)^{-1} \Xi^{(p)*} \text{diag}(\mathbf{H}^{(p)}) \mathbf{s} + \mathbf{q}^{(p)}, \quad (46)$$

где

$$\mathbf{q}^{(p)} = (\Xi^{(p)*} \Xi^{(p)} + \tilde{\Gamma}^{(p)} \mathbf{I}_p)^{-1} \Xi^{(p)*} \mathbf{w}^{(p)}, \quad (47)$$

$\tilde{\Gamma}^{(p)}$ представляет собой $SINR$, включающее в себя взаимные или перекрестные помехи, обусловленные производными более высокого порядка, чем p , т. е.

$$\tilde{\Gamma}^{(p)} = \frac{\sigma_{(p)}^2}{\sigma_0^2 + \sum_{k>p} \sigma_{(k)}^2}. \quad (48)$$

Оценка производной $\mathbf{H}^{(p)}$ выполняется при условии, что вектор $\mathbf{q}^{(p)}$ представляет собой случайный вектор, подчиняющийся гауссовскому закону распределения с нулевым математическим ожиданием, используя (38). В специфическом случае, когда рассматривается канал связи с рэлеевскими замираниями, вектор $\mathbf{q}^{(p)}$ является одновременно гауссовским вектором. Эта процедура сводится к совместному оцениванию P производных в отдельное оценивание множества производных нулевого порядка. Заметим также, что матричное перемножение в (38) осуществляется один раз на символ. Если многошаговое устройство оценки параметров канала связи включается в итеративную схему, тогда оценка производных $\{\hat{\mathbf{H}}_q^{(p)}\}$ на q -м шаге может быть использована для компенсации вклада взаимных или перекрестных помех, включая все производные, порядок которых отличается от q .

Результаты моделирования

Характеристика приемного устройства для системы передачи цифровых сигналов в диапазоне телевизионного вещания оценивалась для режимов 2к и 8к, т. е. при количестве поднесущих частот равном $N = 2048$ и $N = 8192$, соответственно, [19]. Были рассмотрены различная длина циклического префикса, размер сигнального созвездия и скорость кодového потока. Синхронизация осуществлялась при использовании алгоритма, основанного на корреляции блока ортогонального разделения частот, используемого в качестве теста. Рассматривался рэлеевский канал с замираниями, мощность которых уменьшалась согласно экспоненциальному профилю: среднеквадратический разброс времени задержки $\tau_{rms} = 1,1$ микросекунд относительно времени отсечки, равного 7 микросекундам. Эти параметры соответствуют мо-

дели, удовлетворяющей стандартам [23, 24], которая продемонстрировала очень точное описание радиоканала для передачи цифровых телевизионных сигналов [8]. Все результаты моделирования проводились на частоте 626 МГц при ширине полосы пропускания 8 МГц. Заметим, что аналоговые телевизионные сигналы заполняют частотный диапазон от 400 МГц до 790 МГц так, что рассматриваемая несущая частота располагается в центральной части частотного спектра вещания, который используется как при передаче аналоговых сигналов, так и при передаче цифровых сигналов. В настоящем разделе демонстрируется характеристика приемного устройства с архитектурой, описанной в таблице 1, где число 2 в аббревиатуре обозначает использование двух антенн при оптимальном сложении разнесенных сигналов.

Таблица 1 – Примеры структуры приемного устройства

Тип приемного устройства	Оценка канала связи	Подавление помех
стандартный	при наличии управляющего сигнала с линейной зависимостью (2×8 время × частота) [8]	отсутствует
стандартный 2-каскадный	при наличии предварительного управляющего сигнала [8]	отсутствует
итеративный многокаскадный	многошаговая	итеративное
максимальное отношение правдоподобия	при наличии оценки максимального отношения правдоподобия	итеративное, $N_i = 1$
идеальный	идеальная	итеративное

Вероятность ошибки на бит

Итеративное подавление взаимных или перекрестных помех. Характеристика вероятности ошибок на бит BER на выходе идеального устройства подавления взаимных или перекрестных помех представлена на рисунке 3 в зависимости от скорости полета БЛА V для различных значений числа итераций. Число производных устройства подавления взаимных или перекрестных помех равно $P = 2$. Видно большое преимущество использования числа итераций более одной, т. е., $N_i = 2$ и $N_i = 3$. Дальнейшее увеличение числа итераций не дает существенного улучшения характеристики вероятности ошибок на бит.

Оценка производных более высокого порядка. Рисунок 4 представляет характеристику вероятности ошибок на бит BER в зависимости от скорости полета БЛА V для критерия максимального отношения правдоподобия и приемного устройства с итеративным многошаговым применением для числа итераций $N_i = 1$ и $N_i = 2$. При передаче сигналов цифрового телевидения с 64-битовой квадратурно-амплитудной модуляцией при скорости кодového потока равной 0,5 используется режим 8к. Из рисунка 4 видно, что использование итеративной многоступенчатой реализации приводит к уменьше-

нию потенциально возможной скорости полета БЛА на 50 км/час по сравнению с использованием оценки на основе критерия максимального правдоподобия.

Максимально достижимая скорость

Соответствующей характеристикой приемного устройства при передаче цифровых телевизионных сигналов является максимальная скорость полета БЛА V , при которой прием телевизионного сигнала является удовлетворительным. Экспериментальные исследования [8] позволили получить корректирующий код при наличии ошибок и соответствующую вероятность ошибок на бит BER для потока данных на входе обнаружителя Витерби, который приводит к удовлетворительному качеству приема цифровых телевизионных сигналов. Исходя из представленных результатов, можно получить максимальную скорость полета БЛА V для различных архитектур приемного устройства. Была выбрана вероятность ошибок на бит BER равная 7×10^{-3} , 4×10^{-3} , 2×10^{-3} при скорости кодového потока, равной 0,5; 0,66; 0,75, соответственно.

На рисунке 5 представлена максимальная скорость полета БЛА V в зависимости от скорости кодového потока m для различных структур приемного устройства, различных значений размерности констелляции и размерности быстрого преобразования Фурье. Стандартное приемное устройство предположительно достигает хорошей характеристики при режиме 2к, также как и при малоразмерных констелляциях в режиме 8к. При 64-битовой квадратурно-амплитудной модуляции (64 QAM) в режиме 8к получаем максимальную скорость передачи информации 150 Мбит/с, что требует более сложных методов компенсации взаимных или перекрестных помех для достижения скорости полета БЛА V более 100 км/ч. Отметим, что итеративное устройство оценки с предварительной оценкой производных нулевого порядка обладает характеристикой, которая совпадает с характеристикой устройства оценки на основе критерия максимального отношения правдоподобия. Также видно, что использование множества антенн улучшает характеристику как в случае использования стандартной структуры приемного устройства, так и при использовании структуры приемного устройства с итеративной шаговой реализацией благодаря дополнительному пространственному коэффициенту усиления при разнесенном приеме, который обусловлен структурой приемного устройства.

Сравнивая характеристики приемных устройств с различной структурой, можно сделать заключение, что комбинация из двух антенн и итеративной многошаговой реализации обеспечивает наилучшую характеристику, поскольку преимущество обусловлено как соответствующей моделью канала передачи сигналов, так и пространственно-разнесенным приемом сигналов. Хороший компромисс между сложностью структуры приемного устройства и характеристикой достигается при использовании схемы приемного устройства с итеративной пошаговой реализацией при наличии одной антенны. В этом случае, скорость полета БЛА V достигается свыше 100 км/ч без использования множества антенн.

Сложность применения

Сложность применения предлагаемого алгоритма обработки сигналов оценивается в том смысле, что требуются микросхемы большего размера, т. е. имеется в виду размер не корпуса сверхбольшой интегральной микросхемы (СБИС), а площадь кремниевого кристалла СБИС, на котором технологически выполняется микропроцессорный комплекс, выпол-

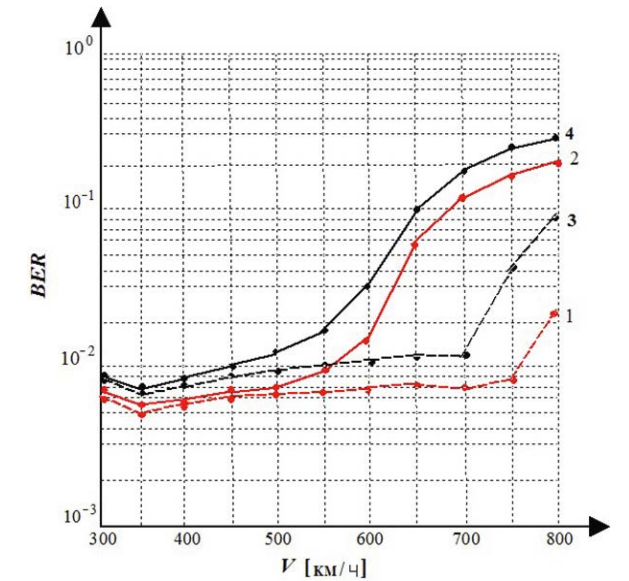


Рисунок 3 — Зависимость вероятности ошибок на бит от скорости полета при следующих итерациях: 1 — $N_i = 1$; 2 — $N_i = 2$; 3 — $N_i = 3$; 4 — $N_i = 4$; Идеальная схема

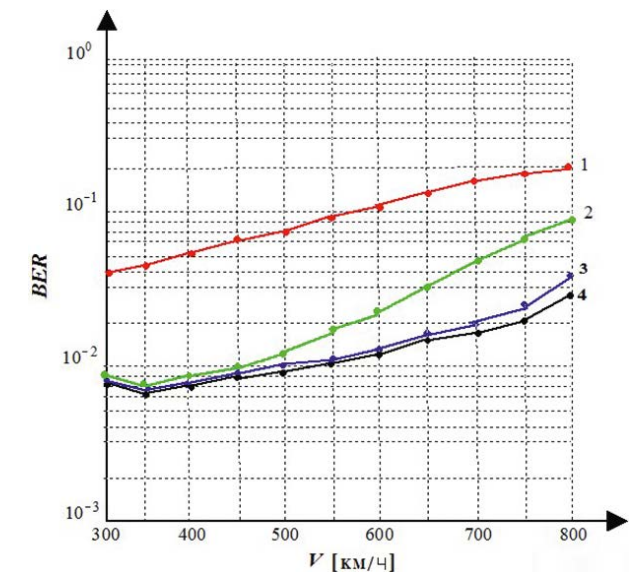


Рисунок 4 — Зависимость вероятности ошибок на бит от скорости полета при использовании двух методов оценки параметров производных более высокого порядка: 1 — метод на основе критерия максимального правдоподобия для $N_i = 1$; 2 — метод на основе критерия максимального правдоподобия для $N_i = 2$; 3 — метод на основе многокаскадных итераций для $N_i = 3$; 4 — метод на основе многокаскадных итераций для $N_i = 4$

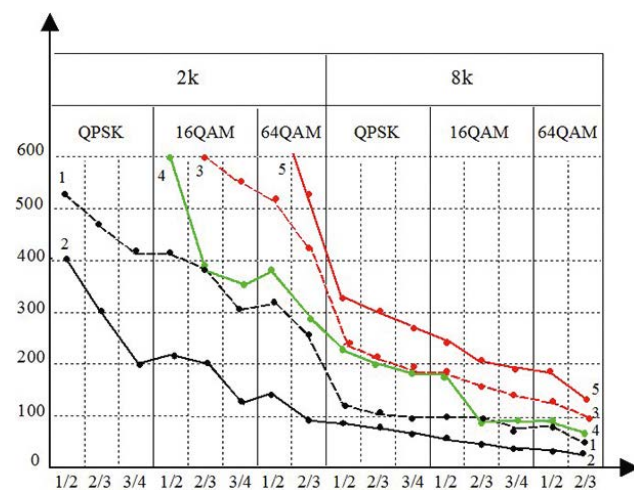


Рисунок 5 – Зависимость максимально достижимой скорости полета при различных режимах трансляции цифровых телевизионных сигналов, размеров констелляции, скорости кодового потока и методов приема сигналов: 1 – стандартный 2 – каскадный; 2 – стандартный; 3 – критерий максимального отношения правдоподобия; 4 – итеративная многошаговая реализация; 5 – 2-каскадная итеративная многошаговая реализация

няющий заданные алгоритмы обработки сигналов, включающий в себя как требуемую память, так и усложненную вычислительную структуру микропроцессорного комплекса. В качестве единицы измерения рассматривается такая площадь кремниевого кристалла СБИС, которая требуется для хранения одного символа с ортогональным частотным разделением каналов (1 SA). Для расчета одного быстрого преобразования Фурье, которое требует $N \log_2 N$ сложных комплексных перемножений, рассматривается площадь кремниевого кристалла СБИС, равная 2,5 SA. Для инверсии матрицы размером $L \times L$ предполагается сложность, которая может быть оценена как L^3 комплексных перемножений. Основываясь на очевидном факте практического использования СБИС для переда-

чи и обработки цифровых телевизионных сигналов, декодирование и повторное кодирование выполняется с помощью одного быстрого преобразования Фурье. Сложность применения различных структур приемного устройства представлена в таблице 2, из которой видно, что при использовании итеративного устройства оценки достигается существенное уменьшение сложности вычисления по сравнению, например, с устройством оценки на основе критерия максимального отношения правдоподобия. Даже в этом случае влияние сложности оценки параметров канала связи еще значительно, и дальнейшая модификация структуры приемного устройства необходима перед использованием этой процедуры. Рисунок 5 и Таблица 2 демонстрируют, что простран-

ственно-временное разделение канала связи не гарантирует соответствующей характеристики при скорости полета БЛА V свыше 60 км/ч. Следовательно, этот подход не является приемлемым для приема и обработки цифровых телевизионных сигналов. При комбинации множества антенн и предварительной оценке параметров канала связи основной вклад в размер площади кристалла СБИС осуществляют операции накопления сигналов в памяти, которые необходимы для длительных во времени интерполяций. Комбинация операции подавления взаимных или перекрестных помех и приемного устройства с разнесенными каналами требует более усложненного алгоритма обработки сигналов для оптимального сложения разнесенных сигналов, что объединяет преимущества двух предлагаемых структур приемного устройства.

Заключение

Предложена новая процедура итеративного подавления взаимных или перекрестных помех при обработке приемным устройством БЛА сигналов с ортогональным разделением по частоте. При использовании предлагаемой процедуры происходит итеративное подавление взаимных или перекрестных помех, в результате чего на каждом этапе эксплуатационная надежность при обработке информации увеличивается. Критическим этапом является процедура оценки параметров канала связи. Используя методику итеративного подавления взаимных или перекрестных помех, процедура оценки сводится к множеству независимых задач с более низкой сложностью в целом. Конечная структура устройства позволяет нам принимать и обрабатывать цифровые сигналы при скорости полета БЛА V свыше 100 км/ч. Использование итеративного подавления взаимных или перекрестных помех совместно с итеративным устройством оценки в структуре приемного устройства при наличии множества антенн позволяет обрабатывать сигналы при высокой скорости полета БЛА V.

Таблица 2 – Оборудование приемных устройств различной архитектуры

Тип приемного устройства	Количество антенн	Количество блоков быстрого преобразования Фурье	Количество блоков ортогонального частотного разделения каналов	Площадь кристалла в единицах SA
стандартный	1	2	5	9
стандартный 2-каскадный	2	4	50	60
итеративная многошаговая реализация	1	15	10	50
максимальное отношение правдоподобия	1	1700	7	4300

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- Bingham, J.A.C. Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come / J. Bingham // IEEE Transactions on Communications. – 1990. – Vol. 28. – No. 5. – P. 5-14.
- Weinstein, S. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform / S. Weinstein, P. Ebert // IEEE Transactions on Communications. – 1971. – Vol. 19. – No. 5. – P. 628-634.
- Kim, Y. H. Performance analysis of a coded OFDM system in time-varying multipath Rayleigh fading channels / Y. H. Kim, I. Song // IEEE Transaction on Vehicular Technology. – 1999. – Vol. 48. – No. 5. – P. 1610-1615.
- Ibars, C. Inter-carrier interference cancellation for OFDM systems with macrodiversity and multiple frequency offsets / C. Ibars, V. Bar-Ness // Wireless Personal Communications. – 2003. – Vol. 26. – P. 285-304.
- Molish, A. F. Iterative methods for cancellation of inter-carrier interference in OFDM systems / A. F. Molish, M. Toeltsch, S. Vermani // IEEE Transaction on Vehicular Technology. – 2007. – Vol. 56. – No. 4. – P. 2158-2167.
- Nguyen, V. D. Channel estimation and interference cancellation for MIMO-OFDM systems / V. D. Nguyen, M. Patzold // IEICE Transactions on Communications. – 2007. – Vol. F50-8, No.2. – P. 277-290.
- Zhao, Y. Inter-carrier interference self-cancellation scheme for OFDM mobile communication systems / Y. Zhao, S. Haggman // IEEE Transactions on Communications. – 2001. – Vol. 49. – No. 7. – P. 1185-1191.
- Sathish Kumar, B. Efficient inter-carrier interference cancellation schemes for OFDM systems / B. Sathish Kumar, K.R. Shankar Kumar, R. Radha-Krishnan // International Journal of Computer Science and Information Security. – 2009. – Vol. 6. – No. 3. – P. 141-148.
- Bataa, O. Interference cancellation algorithm for MIMO system without pilot in LTE / O. Bataa, E. Lamjav // Communications and Networks. – 2013. – No. 5. – P. 311-315.
- Jeon, W. G. An equalization technique for OFDM systems in time-variant multipath channels / W.G. Jeon, K. H. Chan, Y.S. Cho // IEEE Transactions on Communications. – 1999. – Vol. 47, No. 1. – P. 27-32.
- Won, Y.-J. Self-cancellation of interchannel interference for OFDM systems in amplify-and-forward relay communication networks / Y.-J. Won, W.-H. Ahn, J.-W. Choi // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2015. – Vol. 11, No. 9. – P. 679-691.
- Gupta, S. Performance on ICI self-cancellation in FFT-OFDM and DCT-OFDM system [Electronic resource] / S. Gupta, U. Dalal, V. N. Mishra // Journal of Function Spaces // 2015. – Mode of access: doi.org/10.1155/2015/854753.
- Neriyannuru, S. Interference Cancellation Methods in MIMO OFDM Systems / S. Neriyannuru, M.N. Giriprasad. – USA: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 224 p.
- Jakes, W.C. Microwave Mobile Communications / W.C. Jakes. – USA : IEEE Press. Picataway, 1994. – 224 p.
- Varanasi, M., Aazhang, B., Multistage detection in asynchronous code-division multiple-access communications / M. Varanasi, B. Aazhang // IEEE Transactions on Communications. – 1990. – Vol. 38, No. 4. – P. 509-519.
- Benvenuto, N. Block iterative DFE for single carrier modulation / N. Benvenuto, S. Tomasin // Electronic Letters. – 2002. – Vol. 38, No. 19. – P. 1144-1145.
- Karthika, S. A comparative study of digital self-interference cancellation techniques in in-band full-duplex OFDM systems / S. Karthika, T. Manimekalai, T. Laxmikandan // Wireless Personal Communications: An International Journal. 2020,1(73), 145-162.
- Ghazi, H.S., Application of an interference cancellation detector in a two-way relaying system with physical network coding / H. S. Ghazi, K. Wesolowski // Electronics. 2021, Article #1294(10),doi.org/10.3390/electronics10111294.
- Implementation Guidelines for DVB Terrestrial Services: Transmission Aspects//European Telecommunication Standards Institution (ETSI). Sophia-Antipolis, Cedex, France, 1998.
- Cavers, J.K., An analysis of pilot symbol assisted modulation for Rayleigh fading channels/J.K. Cavers//IEEE Transaction on Vehicular Technology. 1991, 4(49), 686-692.
- Edfors, O. OFDM channel estimation by singular value decomposition/O. Edfors, M. Sandell, J.Van de Beek, S.K. Wilson, P.O. Borjesson//IEEE Transactions on Communications. 1998. 7(46), 931-939.
- Yang, B. Analysis of low-complexity widowed DFT-based MMSE channel estimator for OFDM Systems/B. Yang, Z. Cao, K. B. Letaief//IEEE Transactions on Communications. 2001. 1(49), 1977-1987.
- Wang, E., Sun, C., Wang, C, Qu, P., Huang, Y., Pang, T., A satellite selection algorithm based on adaptive simulated annealing particle swarm optimization for the BeiDong navigation satellite system/global positioning system receiver/C. Sun, C. Wang, P. Qu, Y. Huang, T. Pang//International Journal of Distributed Sensor Networks. 2021, 7(17), 277-287.
- Tuzlukov, V., Generalized receiver with parallel interference cancellation for multiuser detection//WSEAS Transactions on Systems and Control. 2021.- Vol.16.-Article #59.-pp.633-654.

Статья поступила в редакцию 14.03.2022

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ КОММЕРЧЕСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Александр Григорьевич Капустин – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
kapustin2649@mail.ru

Alexander Kapustin – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Natural Science and General Professional Disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
kapustin2649@mail.ru

Аннотация: в работе рассматривается эффективность авиационных систем охлаждения генераторов с помощью энергетического критерия. Приведены результаты анализа исследований различных систем охлаждения по энергетическому критерию. Определена эффективность систем охлаждения (воздушных систем охлаждения, комбинированных испарительных систем охлаждения, жидкостных систем охлаждения) на каждом из этапов полета при изменении электрических нагрузок генератора и условий полета воздушного судна. Определены области нормальной функционирования генератора, исходя из допустимой температуры нагрева, мощности потерь и летно-технических характеристик воздушного судна. Показано, что энергетические затраты на охлаждение генераторов можно значительно сократить, если воздухозаборники воздушных систем охлаждения делать регулируемы.

Ключевые слова: генератор, система охлаждения, хладагент, эффективность, скорость полета, высота полета, самолет, допустимая температура, сечение воздухозаборника, параметры атмосферы.

Annotation: the paper discusses the effectiveness of aircraft cooling systems of generators using energy criteria. The results of the analysis of studies of various cooling systems according to the energy criterion are given. The effectiveness of the cooling systems (air cooling systems, combined evaporative cooling systems, liquid cooling systems) at each of the flight stages when the electrical loads of the generator and the flight conditions of the aircraft were determined. The areas of normal operation of the generator were determined on the basis of the allowable heating temperature and the power of the losses and the aircraft performance. It is shown that the energy costs of cooling the generators can be significantly reduced if the air intakes of the air cooling systems are made adjustable.

Keywords: generator, cooling system, coolant, efficiency, flight speed, flight altitude, aircraft, allowable temperature, air intake section, atmosphere parameters.

Введение

Одним из наиболее эффективных путей совершенствования воздушных судов мировой авиации является разработка и ввод в эксплуатацию самолетов с полностью электрифицированным оборудованием (СПЭО) по концепции *All electric aircraft* [1–3]. Предполагается к 2025 году до 75% всех выпускаемых за рубежом самолетов будут строиться (частично или полностью) по идеологии СПЭО. Элементы этой концепции в настоящее время реализованы на

самолетах коммерческой авиации A380, A400, Boeing 787, на военных самолетах F-22 и F-35 5-го поколения, на беспилотных летательных аппаратах (БЛА) «Барракуда», на модифицированных БЛА «Global Hawk» и др. [1–3].

Идеология СПЭО в самолетостроении связана с повышением уровня электрификации воздушных судов и приводит, во-первых, к увеличению мощности и объема потребляемой электрической энергии на борту самолетов (рисунок 1), а во-вторых, к необходимости более рационального использования имеющейся на

борту энергии с учетом требований функционирования электрических компонентов бортовых систем [1–3].

В связи с увеличением мощности приемников электроэнергии система электроснабжения становится основной и единственной энергетической магистралью самолета, в которой основную энергию для питания практически всех приемников вырабатывают электрические генераторы переменного и постоянного тока.

Наиболее распространенный в настоящее время вариант системы электроснабжения пере-

менного тока с интегральным привод-генератором (ИПГ) современного самолета с элементами концепции СПЭО приведен на рисунке 2.

Мощность, которую можно получить от генератора при длительной работе и различных электрических нагрузках, в основном определяется степенью его охлаждения. С ростом мощностей генераторов, а также с увеличением высоты и скорости полета воздушных судов задача охлаждения генераторов приобрела весьма важное значение [4–7].

Постановка проблемы

Основной задачей охлаждения самолетных генераторов является обеспечение таких нагревов отдельных частей электрической машины, которые допустимы для применения в машине конструктивных, магнитных и изоляционных материалов [8–13].

Эффективность охлаждения в значительной мере определяет допустимые удельные электрические нагрузки, а следовательно, и массу генераторов. Охлаждение самолетных генераторов может осуществляться различными способами. На выбор типа системы охлаждения оказывают влияние различные требования. Например, взрыво- и пожаробезопасность, требования по исключению замерзания охлаждающих сред и т. д. Кроме того, во всех случаях при применении тех или иных систем охлаждения должны выполняться следующие основные требования: в системах охлаждения должны применяться такие теплоносители, которые уже имеются на борту самолета; подведение теплоносителей к генератору не должно вызывать появление систем, обслуживающих только данную электрическую машину [6, 13, 14].

Во время работы генератора его обмотки и активная сталь нагреваются. Допустимые температуры нагрева обмоток статора и ротора генератора зависят, в первую очередь, от применяемых изоляционных материалов и температуры охлаждающей среды. Так, например, для изоляции класса В (на асфальтобитумных лаках) допустимая температура нагрева

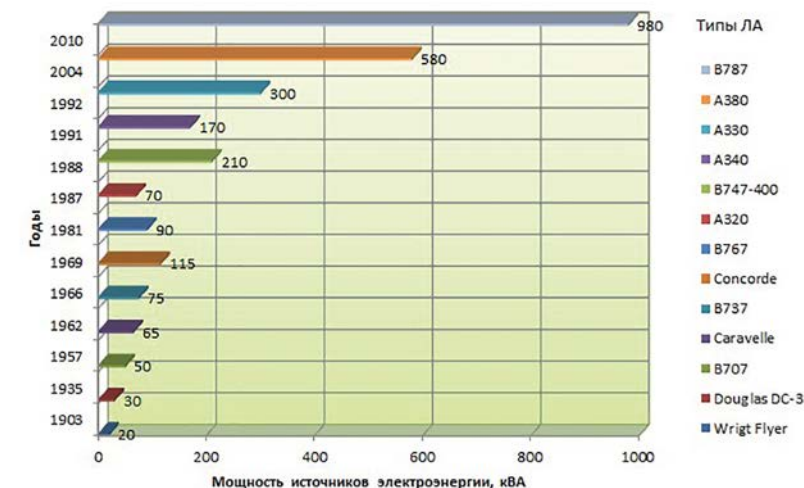


Рисунок 1 – Мощность источников электроэнергии различных воздушных судов

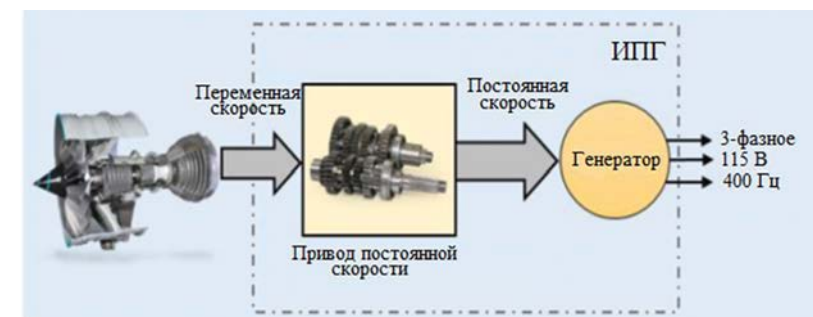


Рисунок 2 – Схема системы электроснабжения переменного трехфазного тока постоянной частоты

обмотки статора генератора должны находиться в пределах 105 °С, а ротора – 130 °С. При более высокой температуре изоляции обмоток статора и ротора, например, классов F и H, пределы допустимой температуры нагрева увеличиваются до 155 °С и 180 °С соответственно, класс изоляции С допускает температуру нагрева обмоток свыше 180 °С [6, 7, 13].

В процессе эксплуатации генераторов изоляция обмоток постепенно стареет. Причиной этого являются загрязнение, увлажнение, окисление кислородом воздуха, воздействие электрического поля и электрических нагрузок и т. д. Однако главной причиной старения изоляции является ее нагрев. Чем выше температура нагрева изоляции, тем быстрее она изнашивается, тем меньше срок ее службы. Срок службы изоляции класса В при температуре нагрева ее до 120 °С состав-

ляет около 15 лет, а при нагреве до 140 °С – сокращается почти до 2 лет. Та же изоляция при температуре нагрева 105 °С стареет значительно медленнее и срок службы ее увеличивается до 30 лет [6, 7, 13]. Поэтому во время эксплуатации при любых режимах работы генератора нельзя допускать нагрева его обмоток и внутренних частей свыше допустимых температур. Для того чтобы температура нагрева не превышала допустимых значений, все генераторы выполняют с искусственным охлаждением. При более интенсивном отводе тепла (зависит от типа хладагента) мощность, которую может отдать генератор без ухудшения свойств изоляции, увеличивается (рисунок 3).

Для авиационных генераторов воздушных судов, летающих на высотах 10–12 км со скоростями не более 1000 км/час применяются следующие системы охлаждения

Увеличение мощности, отн. ед.

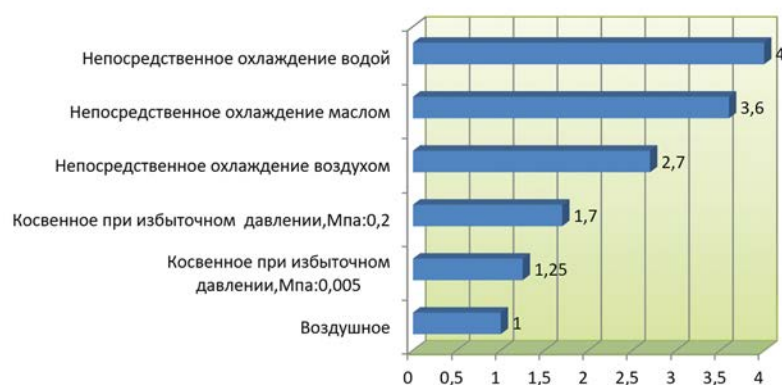


Рисунок 3 – Выходная мощность генератора при различных типах охлаждения

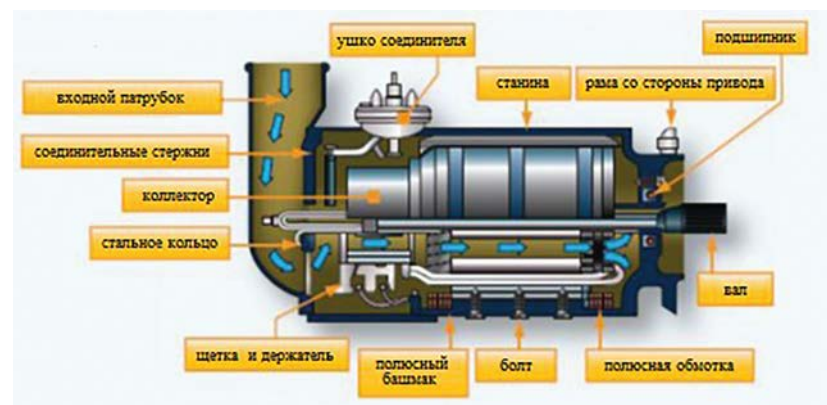


Рисунок 4 – Схема охлаждения генератора заборным воздухом

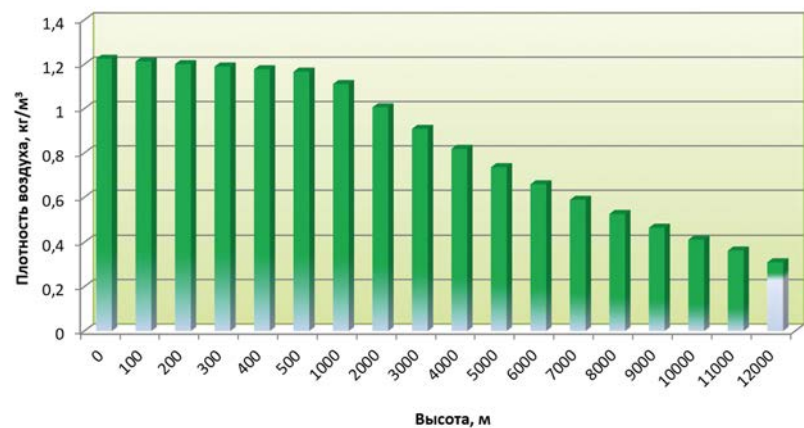


Рисунок 5 – Зависимость плотности воздуха от высоты полета

генераторов: самовентиляция; продув заборного воздуха; жидкостные (дисперсно-испарительные) и комбинированные системы.

Самовентиляция осуществляется воздухом, подаваемым вентилятором, насаженным на вал генератора. Вентилятор прогоняет по внутренним каналам генератора воздух, являющийся теплоносителем. Этот способ охлаждения весьма прост, но малоэффективен и применим для генераторов малой мощности (1–1,5 кВт) при незначительных высотах полета (до высоты 4 км) летательных аппаратов (вертолеты, легкие транспортные самолеты). При охлаждении с помощью вентилятора от генератора в наземных условиях можно получить мощность не более 30 % от номинальной в течение не более 30 минут.

Для более мощных генераторов применяется принудительное охлаждение потоком встречного воздуха (продув). Охлаждающий воздух, попадающий в генератор, обтекает нагретые части ротора, статора и обмоток, отбирает у них выделяемое тепло и уносит его за пределы генератора (рисунок 4).

Таким образом охлаждаются в полете все генераторы самолетов и вертолетов с дозвуковыми скоростями полета. Принудительная система охлаждения продувом встречного потока воздуха эффективна только до высот полета порядка 20 000 метров и скоростей полета, составляющих $M = 1,5...2$ (M – число Маха). Дело в том, что с увеличением высоты (до 12–15 км) и скорости полета (не более 1 000 км/час) воздушных судов интенсивность охлаждения уменьшается из-за изменения параметров атмосферы (рисунки 5, 6, 7). Практически на скоростях полета порядка $2M$ воздух становится непригодным для охлаждения.

В процессе полета, с ростом высоты плотность воздуха уменьшается (рисунок 5), это ухудшает охлаждение электрической машины (генератора) из-за уменьшения коэффициента конвекционной теплоотдачи и весового количества охлаждающего воздуха (уменьшение расхода воздуха), проходящего через машину в случае принудительной вентиляции. Таким образом, снижение

температуры и уменьшение плотности воздуха с высотой полета действуют в противоположных направлениях, и, в конечном счете, влияние высоты на условия охлаждения электрической машины зависит от того, какой из этих факторов преобладает.

Продув с самовентиляцией является совокупностью двух способов охлаждения: самовентиляции и продува и широко применяется на конкретных типах воздушных судов. Установка на валу генератора вентилятора позволяет частично нагружать генератор (20–30 % от номинальной мощности) в наземных условиях, когда отсутствует продув (напор встречного воздуха). Именно такая система охлаждения чаще применяется для охлаждения генераторов на вертолетах и дозвуковых самолетах.

В связи с тем, что увеличение высоты и скорости полета накладывает предел применения охлаждения продувом встречного потока воздуха, разработан ряд более эффективных систем охлаждения авиационных генераторов: жидкостные (путем испарения жидкости на активных частях генератора); масляные; дисперсно-испарительные и другие [6, 9, 10, 12].

Уменьшение интенсивности охлаждения с увеличением скорости полета, объясняется повышением температуры охлаждающего воздуха в результате его торможения в вентиляционной системе генератора. Температура охлаждающего воздуха повышается при числе $M=1$ до 50 °С, а при $M=2$ – до 200 °С и т. д. (в настоящее время кремнийорганическая изоляция обмоток генератора допускает температуру нагрева 200–250 °С).

Чтобы уменьшить массу и габариты систем охлаждения на самолетах применяют комбинированные испарительные системы охлаждения, представляющие собой совокупность воздушной и испарительной систем охлаждения (рисунок 8).

В этой системе на малых высотах и скоростях полета охлаждение машин осуществляется продувом заборного воздуха. При остывании температуры заторможенного потока воздуха, поступающего в машину, величины

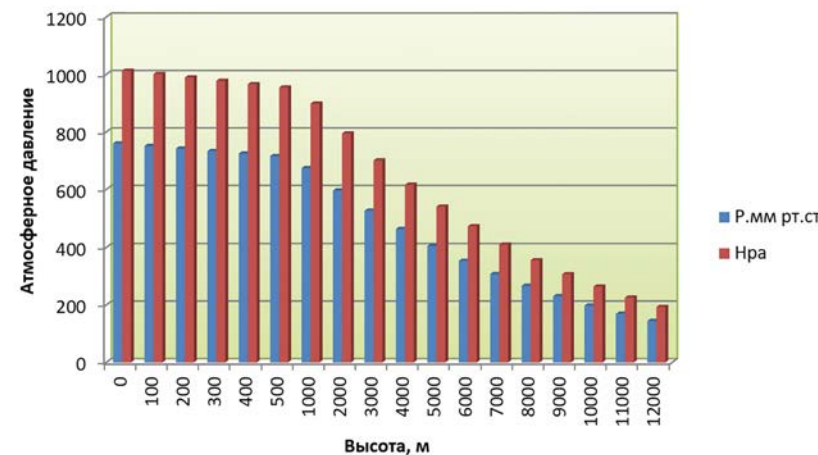


Рисунок 6 – Зависимость давления от высоты полета

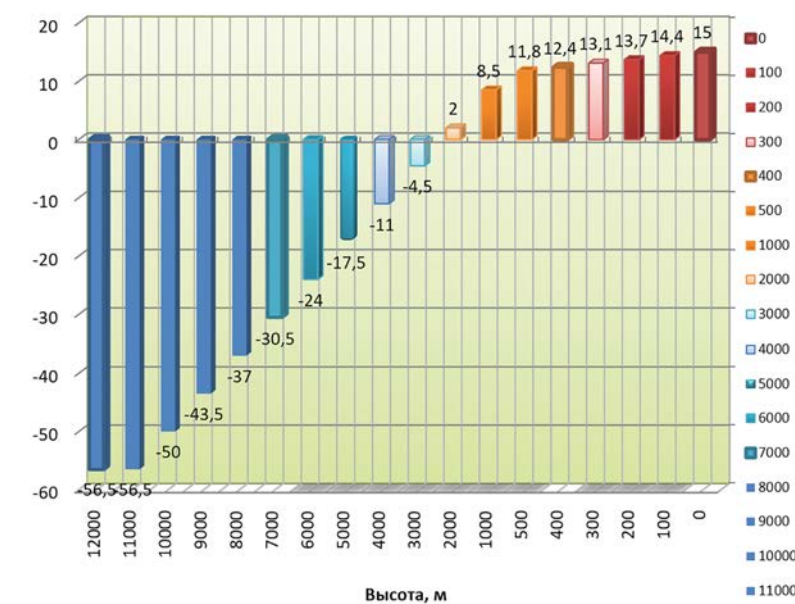


Рисунок 7 – Зависимость температуры воздуха от высоты полета

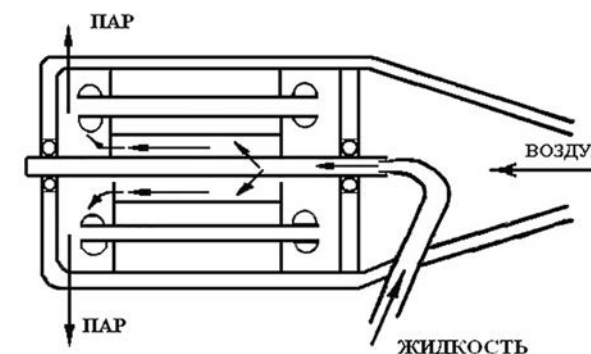


Рисунок 8 – Компонированная схема комбинированно-испарительной системы охлаждения генератора

110–120 °С подача его практически прекращается и автоматически включается подача охлаждающей жидкости. Отвод тепла от поверхностей частей генератора осуществляется за счет испарения охлаждающей жидкости. Охлаждающая жидкость вводится в генератор через пустотелый вал ротора, а затем через радиальные отверстия вала поступает к нагретым частям машины [6].

При различных условиях полета воздушного судна и величины электрической нагрузки генератора переход с одной системы охлаждения на другую обеспечивает наибольшую эффективность использования генератора.

Результаты исследований

Путем повышения интенсивности охлаждения можно, при сохранении заданных габаритов и массы машины, значительно повысить номинальную выходную мощность генератора. Однако решение этой задачи встречает ряд затруднений, связанных с необходимостью дополнительной затраты энергии на вентиляцию и соблюдение некоторых других условий, например, простоты конструкции, закрытого исполнения генератора [6, 7, 12–14].

Следует отметить, что системы охлаждения генераторов продувом забортного воздуха характеризуются значительными затратами мощности, отбираемой

на продув от авиадвигателя, особенно при больших скоростях полета воздушного судна.

Для оценки эффективности и областей целесообразного использования генераторов с воздушным охлаждением на воздушных судах с широким диапазоном изменения высот и скоростей полета необходимо учитывать взаимосвязь условий полета с тепловыми и вентиляционными характеристиками электрических генераторов. Это позволяет осуществить достаточно точную количественную оценку затрат мощности в системах охлаждения и границ их целесообразного использования. Такая методика оценки эффективности систем охлаждения позволяет определить затраты мощности систем охлаждения авиационных генераторов продувом забортного воздуха через заборник, установленный в набегающем потоке [6, 7].

Результаты исследований, выполненных автором, показывают, что величина площади поперечного сечения воздухозаборника S_1 зависит как от параметров полета, так и от параметров генератора. Поэтому для эффективной работы системы охлаждения площадь поперечного сечения воздухозаборника должна либо регулироваться по определенному закону, либо выбираться постоянной, но такой, чтобы обеспечить охлаждение генераторов, не превышая допустимую температуру изоляции $T_{доп}$ [15, 16].

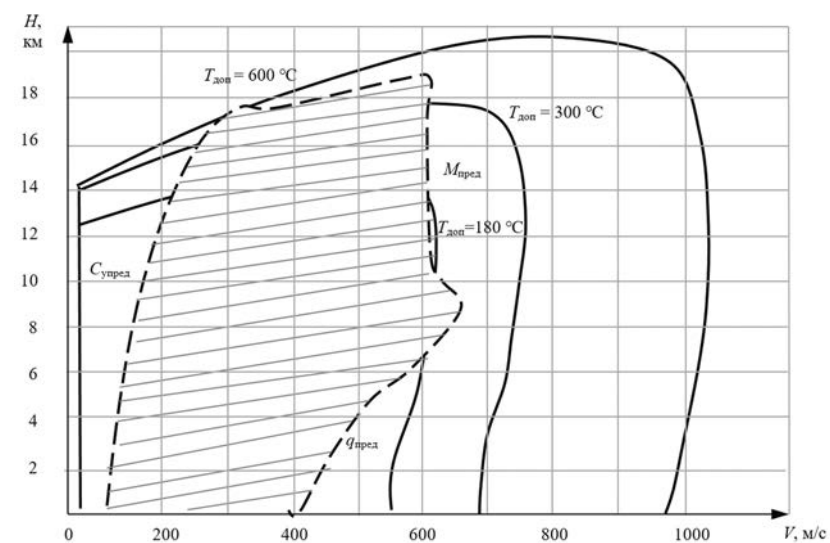


Рисунок 9 – Области предельного использования воздушной системы охлаждения генераторов продувом забортного воздуха

Значит, в обоих случаях должны быть определены допустимые границы работы системы охлаждения в зависимости от высоты H , скорости полета V и электрической нагрузки генератора. Кроме того, необходимо учитывать, что потери на охлаждение пропорциональны сечению S_1 , а так как с увеличением скорости V , сечение S_1 должно уменьшаться, то и потери на охлаждение на больших скоростях полета при регулируемом воздухозаборнике будут меньше, чем при постоянном сечении $S_1 = const$ [15, 16].

Следовательно, задачу оценки эффективности системы охлаждения генератора продувом забортного воздуха можно сформулировать следующим образом: определить области допустимого использования воздушной системы охлаждения, а также эффективность ее с точки зрения затрат мощности на охлаждение и величины обобщенного КПД при изменении площади сечения воздухозаборника S_1 таким образом, чтобы температура наиболее нагретых активных частей генератора не превышала допустимой температуры изоляции $T_{доп}$. Обычно при расчетах потребного количества воздуха его температура принимается постоянной и соответствующей среднему значению перегрева на выходе из генератора. Такое решение задачи не учитывает неравномерности нагрева активных элементов и охлаждающего воздуха в вентиляционных каналах генератора и не содержит информации о температурном поле генератора.

Поэтому при выборе S_1 на этапе проектирования необходимо принимать во внимание температуру перегрева «горячей точки» генератора, расположенной в одном из вентиляционных каналов, а также температуру аэродинамического нагрева торможения охлаждающего воздуха. Для определения величины S_1 указанная задача решена методом последовательных приближений с использованием М-файла среды компьютерного моделирования *MatLab* [5].

Результаты расчета (рисунки 9–12), представлены в виде зависимостей S_1 ; $P_{охла}$; $\eta_{со}$; $\eta^* = f(H, V)$ при различных значениях температуры $T_{доп} = const$, а также в виде областей целесообразного использования воздушной систе-

мы охлаждения (на рисунке 9 эта область заштрихована). Аналогичные области могут быть построены как для других типов генераторов, так и для других классов воздушных судов [15, 16].

Анализ полученных результатов показывает, что при температуре $T_{доп} = 180$ °С система охлаждения не может обеспечить надежную работу генератора при полете воздушного судна на высоте $H > 14,5-15,5$ км (рисунок 9). Кроме того, возможности системы ограничены по скорости полета числом $M = 2,1$ в диапазоне высот $H = 7-12$ км. При температуре $T_{доп} = 300$ °С допустимая высота полета увеличивается до $H = 7-18,5$ км, то есть система охлаждения не обеспечивает длительный полет воздушного судна на высотах полета $H > 18,5$ км. При температуре $T_{доп} = 600$ °С система охлаждения практически обеспечивает полет воздушного судна во всех точках заштрихованной области [15, 16].

На рисунке 10 представлены кривые, характеризующие изменение площади сечения воздухозаборника S_1 в зависимости от высоты H и скорости полета V , которые обеспечивают различные значения $T_{доп} = const$.

Анализ этих зависимостей говорит о том, что с увеличением скорости полета можно существенно уменьшить площадь сечения воздухозаборников S_1 при сохранении $T_{доп} = const$. Так, например, при $T_{доп} = 600$ °С на высоте $H = 2$ км площади сечения воздухозаборника S_1 уменьшается почти в 6 раз. При увеличении высоты H до 18 км и сохранении такой же допустимой температуры величина S_1 должна уменьшиться в 2 раза. При более низкой температуре ($T_{доп} = 180$ °С) площадь сечения воздухозаборника S_1 при увеличении скорости полета сначала нужно уменьшать, а начиная со скорости $V = 330$ м/с ($M = 1$), необходимо вновь увеличивать [1, 4, 6, 7]. Это объясняется тем, что при увеличении скорости полета растет расход воздуха через генератор, что позволяет уменьшить площадь S_1 при сохранении $T_{доп} = const$. При $M > 1$ начинает сказываться аэродинамический нагрев входящего воздуха, что приводит к необходимости увели-

чить сечение воздухозаборника. На высоте $H = 15$ км при $M = 2$ и $T_{доп} = 180$ °С сечение должно быть увеличено приблизительно до 70–90 см², что объясняется значительным уменьшением плотности воздуха на этой высоте и, естественно, аэродинамическим нагревом воздуха [6, 7, 15, 16].

Следует заметить, что у современных генераторов сечение воздухозаборника S_1 не регулируется.

Анализ зависимостей (рисунок 10) показывает, что размер нерегулируемого воздухозаборника явно увеличен с точки зрения потерь на охлаждение генератора на малых высотах (до $H = 5$ км) и $M \geq 0,5$.

На рисунке 11 представлены зависимости мощности $P_{охла}$, затрачиваемой на охлаждение генератора, от скорости V и высоты H полета при $T_{доп} = const$.

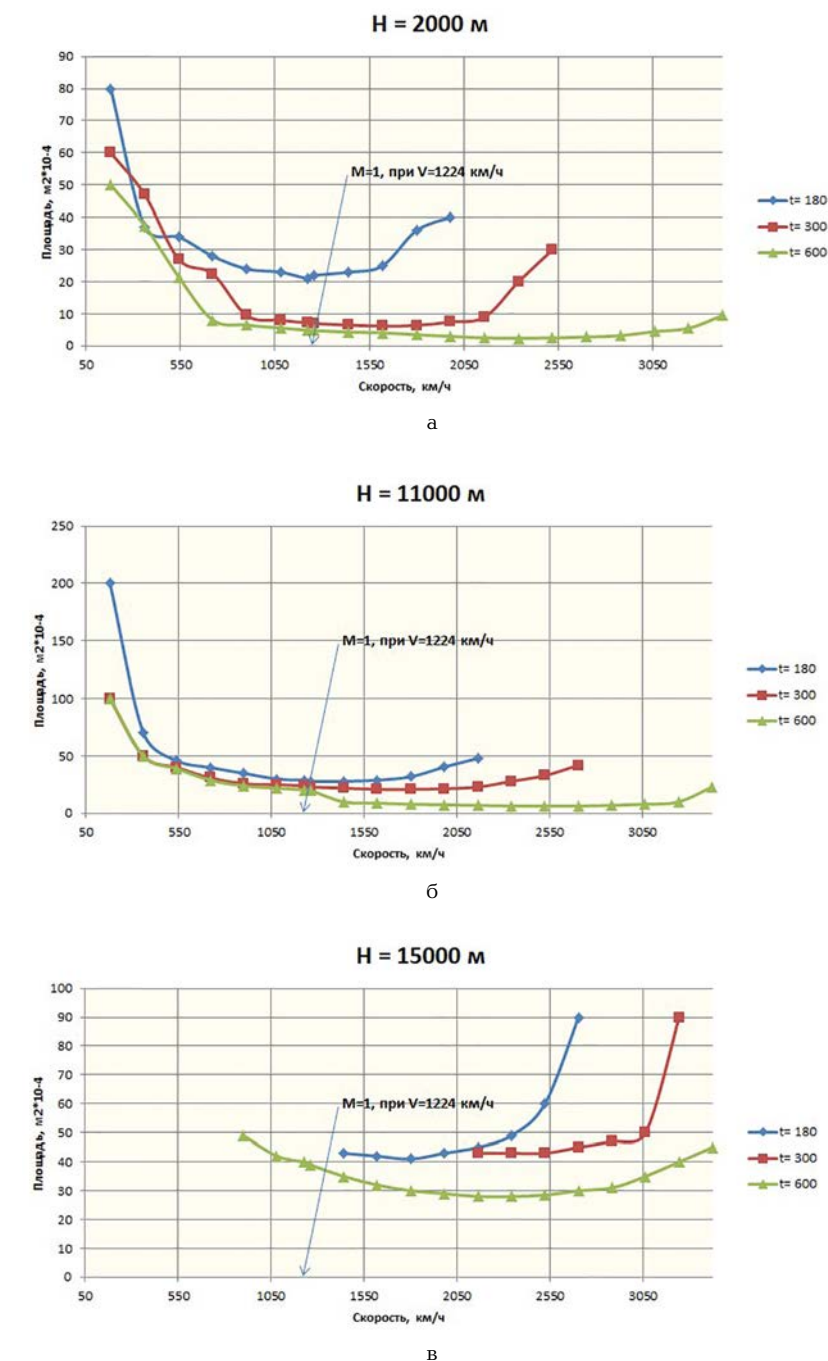


Рисунок 10 – Зависимость площади сечения воздухозаборника S_1 от скорости полета V при $H = const$, $T_{доп} = const$

Величина мощности $P_{\text{охл}}$ может достигать при максимальных скоростях полета современных воздушных судов величины 500 кВт и более. Причем она практически не зависит от высоты с $H > 11$ км для всех классов изоляции. Последнее объясняется существенным уменьшением плотности воздуха (см. рисунок 5), несмотря на большие значения сечения воздухозаборника S_1 при полете на больших высотах.

Компаративная оценка зависимостей рисунков 9, 10, 11, позволила определить эффект применения более теплостойкой изоляции генератора с системой охлаждения продувом воздуха:

- допустимая зона полета воздушного судна (рисунок 9) обеспечивается (за исключением диапазона высот $H > 14,5 \div 15,5$ км) применением изоляции различных классов при $T_{\text{доп}} = \text{const}$ (условие, обеспечиваемое законом регулирования величины сечения воздухозаборника);

- использование более теплостойкой изоляции повышает эффективность системы охлаждения (рисунок 11). Так, применение теплостойкой изоляции не только несколько увеличивает предельную высоту использования системы охлаждения (на 5–6 км при переходе от $T_{\text{доп}} = 180^\circ\text{C}$ к $T_{\text{доп}} = 600^\circ\text{C}$, рисунок 13), но и значительно снижает потери мощности на охлаждение, существенно увеличивая при этом диапазон скоростей полета (см. рисунки 9, 10).

Зависимости $P_{\text{охл}} = f(V, H, T_{\text{доп}})$ показывают (рисунок 11), что максимальные потери на охлаждение $P_{\text{охл max}}$ для воздушного судна, имеющего определенную зону допустимых высот H и скоростей V полета (см. рисунок 9), составляют 140 кВт, 63 кВт и 32 кВт для $T_{\text{доп}} = 180^\circ\text{C}$, 300°C , 600°C соответственно. Это обусловлено уменьшением сечения диффузора воздухозаборника, которое допустимо при больших $T_{\text{доп}}$, так как для

отвода примерно тех же потерь требуется меньшее количества воздуха, нагреваемого в генераторе до большей температуры [15].

Эффективность системы охлаждения характеризуется КПД $\eta_{\text{со}}$. Характер изменения $\eta_{\text{со}}$ (рисунок 12) говорит о том, что на высоте $H = 2$ км и скорости полета $V = 430$ м/с КПД системы охлаждения $\eta_{\text{со}}$ при увеличении $T_{\text{доп}}$ от 180 до 600°C возрастает в 2,5 раза.

При полете на высоте $H = 11$ км и скорости полета $V = 640$ м/с для $T_{\text{доп}} = 300^\circ\text{C}$ и $T_{\text{доп}} = 600^\circ\text{C}$ $\eta_{\text{со}}$ возрастает в 2 раза. Таким образом переход к более теплостойкой изоляции (например, с температурой $T_{\text{доп}} = 300^\circ\text{C}$) позволяет более чем в два раза уменьшить величину функциональной массы генератора.

Используя данные расчетов, выполнен анализ эффективности функционирования различных систем охлаждения авиационных генераторов в среде *Matlab* (рисунок 13). При этом анализировались массо-энергетические показатели эффективности генераторов с различными системами охлаждения типа ВСО, КИС и ЖСО [7, 16].

Результаты исследования (рисунок 13) показывают, что КПД генераторов с системами КИС и ВСО приобретает максимальное значение при полете воздушного судна на высоте полета $H = 9$ км и числе $M = 0,78$ и составляет 87% при температуре горячей точки 130°C и мощности нагрузки генератора $0,9 P_n$. При этих условиях КПД генератора с системой ЖСО составляет 86,5%, но при температуре горячей точки 185°C .

На этом этапе полета КПД генератора с системой ВСО составляет 83,3%, а КПД генератора с системой КИС – равен 83,8%. Это обусловлено снижением температуры «горячей» точки генератора до 90°C по сравнению со 140°C температуры «горячей» точки генератора с системой ВСО. КПД генератора с системой ЖСО составляет 82,9% при температуре «горячей» точки 160°C , причем температура «горячей» точки генератора не зависит от параметров окружающей среды и зависит только от особенностей систем охлаждения и величины нагрузки генератора [7, 15, 16].

Значение КПД системы КИС на данном этапе полета на 53% выше КПД системы охлаждения ВСО по причине снижения потерь на охлаждение до 2 кВт. КПД системы ЖСО превышает в среднем КПД систем охлаждения ВСО и КИС на 30% и 10% соответственно за весь этап полета. Это объясняется тем, что потери в системе ЖСО не зависят от параметров окружающей среды. ЖСО по энергетическим показателям эффективности превосходит системы КИС и ВСО.

Заключение

Данный подход позволил оценить эффективность рассматриваемой системы охлаждения с точки зрения затрат мощности двигательной установки воздушного судна, а также выбрать целесообразное сечение воздухозаборника генератора на этапе проектирования, исходя из допустимой температуры нагрева и мощности потерь генератора. Предложенный подход количественной оценки эффективности воздушных систем охлаждения позволяет учесть взаимосвязь тепловых и вентиляционных характеристик авиационных генераторов с летно-техническими характеристиками воздушного судна, так как затраты мощности на охлаждение оборудования продувом непосредственно влияют на взлетную массу системы охлаждения и воздушного судна в результате дополнительного расхода топлива в его двигательной установке.

Кроме того, данный подход к анализу особенностей функционирования вентиляционных схем воздушных систем охлаждения генераторов (продувом забортного воздуха) позволяет решить задачу вентиляционного расчета различных генераторов на этапе проектирования с учетом изменения высоты и скорости полета по единому алгоритму с использованием ЭВМ. Это дает возможность выявить наиболее узкие места вентиляционной системы и устранить их, если это возможно, еще на этапе проектирования.

И последнее, энергетические затраты на охлаждение генераторов можно значительно сократить, если воздухозаборники воздушных систем охлаждения делать регулируемы.

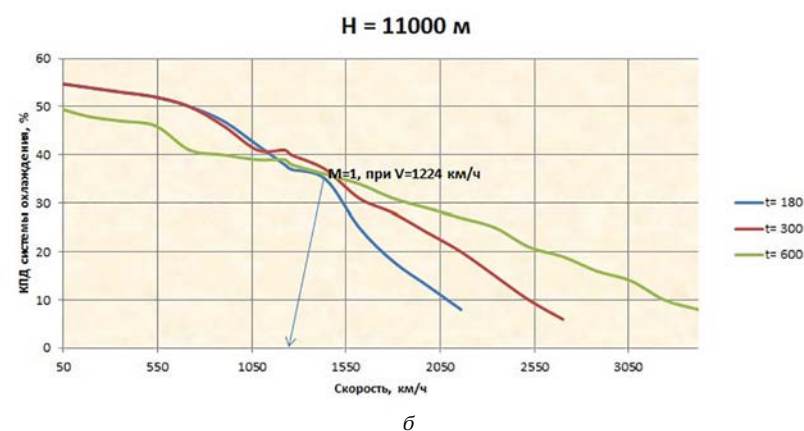
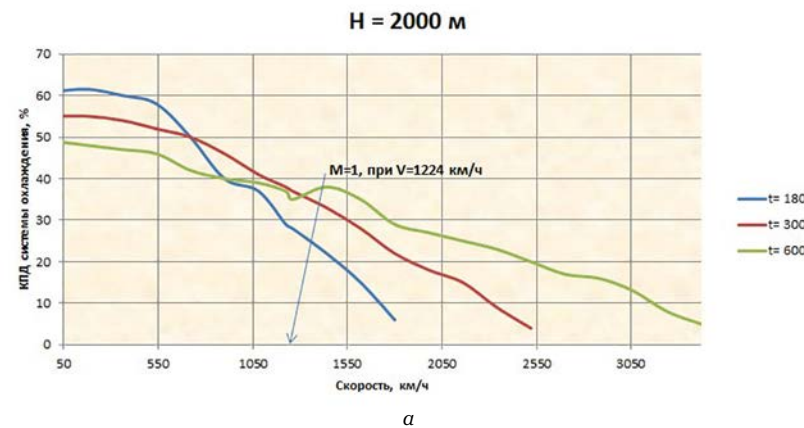


Рисунок 12 – Зависимость обобщенного КПД и КПД системы охлаждения от скорости полета V при $T_{\text{доп}} = \text{const}$, $H = \text{const}$

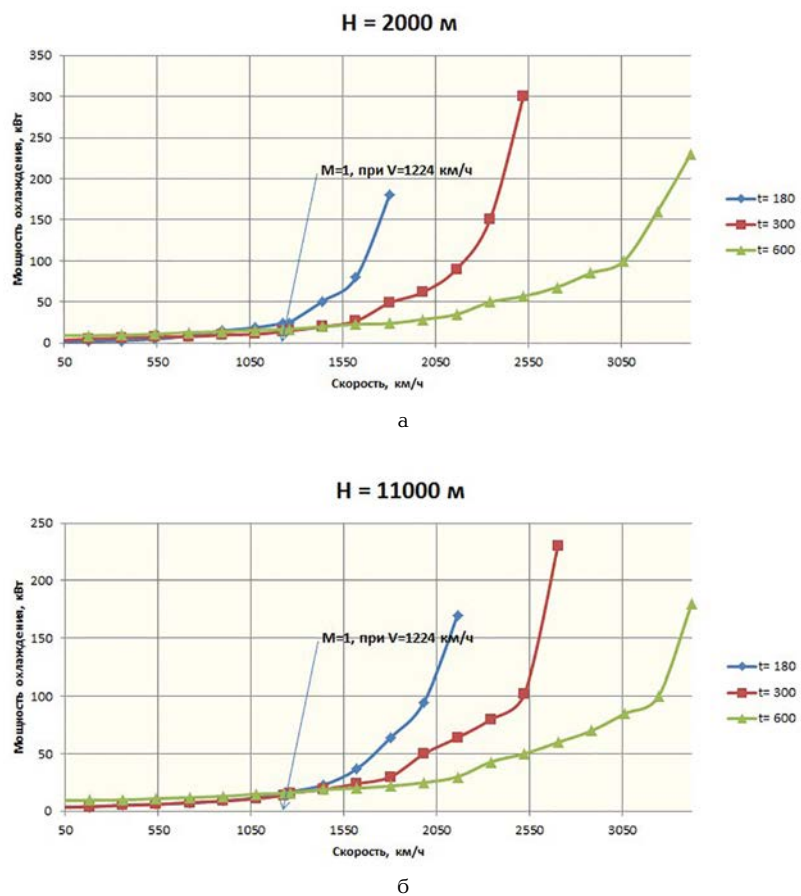


Рисунок 11 – Зависимость мощности, затрачиваемой на охлаждение генератора от высоты полета H при $T_{\text{доп}} = \text{const}$, $V = \text{const}$

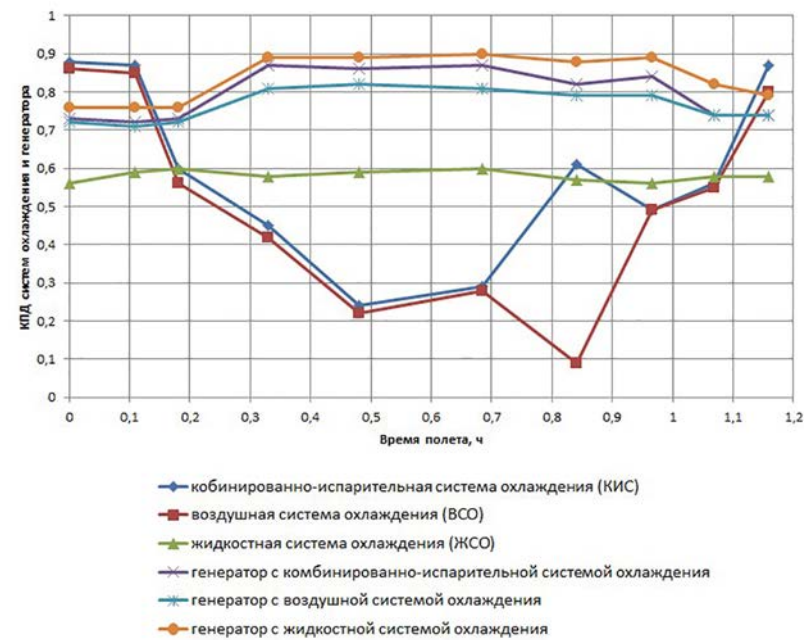


Рисунок 13 – Энергетические показатели эффективности функционирования систем охлаждения генератора ГТЗОНЖЧ12 с различными системами охлаждения

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abdelhafez, A. A. Review of More-Electric Aircraft / A. A. Abdelhafez, A. J. Forsyth // 13th International Conference on aerospace sciences & aviation technology, asat. – 13, May 26 – 28, 2009. – Paper: ASAT-13-EP-01.
2. McLoughlin, A. Engine Powerplant Electrical Systems [Электронный ресурс] / A. McLoughlin // More Electric Aircraft Forum. – 2009. – Режим доступа: <http://www.moetproject.eu>. – Дата доступа: 13.08.2021.
3. Sarlioglu, B. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft / B. Sarlioglu, C. T. Morris // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2015. – Vol. 1. – P. 803–54–64.
4. Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/325002832_Electrical_Power_Generation_in_Aircraft_Review_Challenges_and_Opportunities. – Дата доступа: 10.08.2021.
5. Филиппов, И. Ф. Теплообмен в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
6. Науменко, В. И. Авиационные электрические машины с интенсивным охлаждением / В. И. Науменко, О. Г. Клочков. – Москва: Машиностроение, 1997. – 150 с.
7. Готтер, Г. Нагревание и охлаждение электрических машин: пер. с нем / Г. Готтер. – Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1961. – 264 с.
8. Sili, E. Pressure and temperature effects on the paschen curve / E. Sili, F. Koliatene, J. Cambronre // Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. – Cancun, 2011. – P. 464–467.
9. Cooling arrangement for an integrated drive-generator system: application US06/044,299 / Scott B. Barnhardt. – Published 18.08.1981.
10. Analytical Thermal Model for Fast Stator Winding Temperature Prediction / C. Sciascera [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 64. – P. 6116–6126.
11. Thermal management of a permanent magnet motor for a directly coupled pump / Z. Xu [et al.] // International Conference on Electrical Machines. – Lausanne, 2016. – P. 2738–2744.
12. Mechanical and thermal design of an aeroengine starter/generator / Z. Xu [et al.] // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). – Coeur d'Alene, 2015. – P. 1607–1613.
13. Evaluation of isolated DC/DC converter topologies for future HVDC aerospace microgrids / L. Tarisciotti [et al.] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Cincinnati, 2017. – P. 2238–2245.
14. Analysis, Modeling and Design Considerations for the Excitation Systems of Synchronous Generators / S. Nuzzo [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65, iss. 4. – P. 2996–3007.
15. Балич, Е. В. Анализ эффективности функционирования систем охлаждения авиационных генераторов / Е. В. Балич, А. Г. Капустин // Изобретатель. – 2016. – № 3 (195). – С. 33.
16. Балич, Е. В. Анализ эффективности функционирования систем охлаждения авиационных генераторов продувом забортного воздуха / Е. В. Балич, А. Г. Капустин // Изобретатель. – 2017. – № 9(213). – С. 37.

REFERENCES

1. Abdelhafez, A. A. Review of More-Electric Aircraft / A. A. Abdelhafez, A. J. Forsyth // 13th International Conference on aerospace sciences & aviation technology, asat. – 13, May 26 – 28, 2009. – Paper: ASAT-13-EP-01.
2. McLoughlin, A. Engine Powerplant Electrical Systems [Electronic resource] / A. McLoughlin // More Electric Aircraft Forum. – 2009. – Mode of access: <http://www.moetproject.eu>. – Date of access: 13.08.2021.
3. Sarlioglu, B. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft / B. Sarlioglu, C. T. Morris // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2015. – Vol. 1. – P. 803–54–64.
4. Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities [Electronic resource] / Online resource ResearchGate. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/325002832_Electrical_Power_Generation_in_Aircraft_Review_Challenges_and_Opportunities. – Date of access: 10.08.2021.
5. Filippov, I. F. Heat exchange in electric machines / I. F. Filippov. – Leningrad: Energoatomizdat, 1986. – 256 p.
6. Naumenko, V. I. Aviation electric machines with intensive cooling / V. I. Naumenko, O. G. Klochkov. – Moscow: Mashinostroenie, 1997. – 150 p.
7. Gotter, G. Electric machines heating and cooling: trans. from German / G. Gotter. – Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1961. – 264 p.
8. Sili, E. Pressure and temperature effects on the paschen curve / E. Sili, F. Koliatene, J. Cambronre // Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. – Cancun, 2011. – P. 464–467.
9. Cooling arrangement for an integrated drive-generator system: application US06/044,299 / Scott B. Barnhardt. – Published 18.08.1981.
10. Analytical Thermal Model for Fast Stator Winding Temperature Prediction / C. Sciascera [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 64. – P. 6116–6126.
11. Thermal management of a permanent magnet motor for a directly coupled pump / Z. Xu [et al.] // International Conference on Electrical Machines. – Lausanne, 2016. – P. 2738–2744.
12. Mechanical and thermal design of an aeroengine starter/generator / Z. Xu [et al.] // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). – Coeur d'Alene, 2015. – P. 1607–1613.
13. Evaluation of isolated DC/DC converter topologies for future HVDC aerospace microgrids / L. Tarisciotti [et al.] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Cincinnati, 2017. – P. 2238–2245.
14. Nuzzo, S. Analysis, Modeling and Design Considerations for the Excitation Systems of Synchronous Generators / S. Nuzzo [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65, iss. 4. – P. 2996–3007.
15. Balich, E. V. Analysis of the efficiency of the aviation generators cooling systems / E. V. Balich, A. G. Kapustin // Izobretatel. – 2016. – № 3 (195). – P. 33.
16. Belich, E. V. Analysis of the efficiency of the cooling systems of aviation generators by blowing outboard air / E. V. Balich, A. G. Kapustin // Izobretatel. – 2017. – № 9 (213). – P. 37.

Статья поступила в редакцию
20.04.2022

УДК 656.072

А. А. ЖУКОВА, Е. Д. ПРОЦКАЯ,
Е. Г. КРЫЛОВ, Е. В. КАМИНСКАЯ

АНАЛИЗ РИСКОВ РАЗВИТИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ВОЗДУШНЫМ ТРАНСПОРТОМ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Анна Анатольевна Жукова – кандидат технических наук, проректор по научной работе учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
hannazhukova@mail.ru

Hanna Zhukova – Candidate of Technical Sciences, Vice-Rector for Research of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
hannazhukova@mail.ru

Екатерина Дмитриевна Процкая – диспетчер по центровке, республиканское унитарное предприятие «Национальный аэропорт Минск», Республика Беларусь
kateprockay@gmail.com

Ekaterina Protskaya – Alignment manager of republican unitary enterprise «Minsk national airport», Republic of Belarus
kateprockay@gmail.com

Евгений Геннадьевич Крылов – инспектор (авиационный) государственного учреждения «Авиационная инспекция», Республика Беларусь
krylovevgeniy91@gmail.com

Evgeny Krylov – Aviation inspector of State Institution «Aviation Inspection», Minsk, Republic of Belarus
krylovevgeniy91@gmail.com

Екатерина Васильевна Каминская – диспетчер управления воздушным движением, республиканское унитарное предприятие по аэронавигационному обслуживанию воздушного движения «Белароавиация», Республика Беларусь
egalenia@mail.ru

Ekaterina Kaminskaya – Air Traffic Controller, republican unitary enterprise «Belaroonavigatsia», Republic of Belarus
egalenia@mail.ru

Аннотация: совершенствование работы авиационной отрасли Республики Беларусь подразумевает непрерывный анализ факторов риска, связанных с деятельностью по перевозке пассажиров, который позволит дать оценку состоянию безопасности авиаперевозок, спрогнозировать, предупредить и минимизировать риски, способные отразиться на эффективности функционирования воздушного транспорта Республики Беларусь на мировом рынке.
Ключевые слова: пассажирские авиаперевозки, фактор риска, функционирование авиационной отрасли.

Annotation: improving of the aviation industry performance of the Republic of Belarus implies continuous analysis of risk factors associated with passenger transportation activities, that allows to evaluate the level of air transportation safety, predict, prevent and minimize risks that can affect the efficiency of the air transport of the Republic of Belarus in the world market.
Keywords: passenger air transportation, risk factor, aviation industry functioning.

Введение

Целью функционирования и развития воздушного транспорта (в части, касающейся перевозок пассажиров) является предоставление населению наиболее благоприятных условий полетов, как по времени и стоимости перелетов, так и по комфорту.

Тем не менее, авиационные пассажирские перевозки, также как любая деятельность человека, сопряжены с некоторой неопре-

деленностью развития в будущем. В свою очередь неопределенность порождает риск – возможность наступления некоторого неблагоприятного события. Экстраполируя положения теории риска в авиацию, можно прийти к выводу о том, что она наравне с другими сферами деятельности связана с неопределенностью внешней и внутренней среды.

Настоящая работа посвящена анализу факторов риска, связанных с деятельностью по перевоз-

ке пассажиров, который позволит дать оценку состоянию безопасности авиаперевозок, спрогнозировать, предупредить и минимизировать риски, способные отразиться на эффективности функционирования воздушного транспорта Республики Беларусь на мировом рынке.

Анализ факторов риска

Согласно официальной статистике Национального статисти-

стического комитета Республики Беларусь за I квартал 2022 года пассажирооборот воздушного транспорта составил 590,1 млн. пассажиро-километров, превысив на 1 % показатели аналогичного периода прошлого года.

Несмотря на то, что на белорусском рынке гражданской авиации отмечается тренд к стабильному росту показателей производственной деятельности, объем работы воздушного транспорта подвержен рискам резкой смены обстановки. Например, пассажирооборот 2021 года вырос на 61 % по сравнению с 2020 годом. Однако, в I квартале 2021 года показатель составил 589 млн пассажиро-километров против 1 144 млн пассажиро-километров в I квартале 2020 года, т. е. снизился на 49 %. Такие скачки и характеризуют подверженность авиационной сферы разного рода рискам [1].

В таблице представлены основные факторы риска, связанные с деятельностью авиационной отрасли.

Экономические риски, с которыми сталкиваются авиакомпании, можно подразделить на две категории: ценовые риски и кредитные риски. Авиаперевозчики выделяют три основных типа ценовых рисков, которые вызваны рыночными изменениями цен и процентных ставок:

- изменение цен на авиатопливо, как наиболее расходную часть бюджета авиакомпании;
- изменение курсов валют;
- изменение процентных ставок.

Риски *финансового* характера обусловлены недостатком собственных средств организаций на реализацию крупных инфраструктурных проектов, ограничением возможности привлечения сторонних инвестиций, формированием и исполнением показателей республиканского бюджета, недостаточным уровнем бюджетного финансирования, а также возможным снижением финансирования за счет средств внебюджетного инвестиционного фонда Минтранса вследствие специфики его формирования посредством платежей организаций, входящих в систему Минтранса. Таким образом, на финансирование существенное влияние оказывает финансово-экономическое положение организаций транспорта. Риски *финансового* характера в сфере перевозок пассажиров также связаны с изменением доходов населения. Наиболее значимыми финансовыми рисками являются неполное или неритмичное финансирование мероприятий Государственной программы за счет средств бюджета и собственных средств организаций, рост цен на выполнение мероприятий.

Для минимизации риска *финансового* характера необходимо обеспечить бесперебойное выполнение рейсов в соответствии с расписанием полетов, утвержденным заказчиком, что в свою очередь не представляется возможным без устойчивого финансирования. Необходимость регулярного финансирования обусловлена наличием у авиаперевозчиков расходов, состоящих из текущих затрат на топливо, заработную плату, отчислений на социальные нужды, амортизацию, ремонт, техническое обслуживание, прочие материальные и общехозяйственные расходы (расходы на управление, расходы по организации и обслуживанию производственно-хозяйственной деятельности, общехозяйственные непроизводительные расходы и др.), а также капитальных затрат на обновление парка воздушных судов.

По этой причине основным риском в недостижении вышеуказанной цели функционирования и развития воздушного транспорта является риск недофинансирования, который в свою очередь зависит от уровня доходов от услуг по перевозкам пассажиров.

Количественным показателем риска недофинансирования функционирования и развития воздушного транспорта является индекс риска, который опреде-

ляется путем экспертной оценки вероятности возникновения рисков, величины возможных последствий от их воздействия, а также степени воздействия на индекс риска каждого из вышеуказанных факторов.

Индекс риска функционирования и развития воздушного транспорта определяется по формуле:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n P_i I_i K_i}{n}, \quad (1)$$

где P_i – вероятность возникновения различных факторов риска;

I_i – величина возможных последствий от воздействия различных факторов риска;

K_i – коэффициент, учитывающий степень воздействия факторов на риск функционирования и развития воздушного транспорта;

n – количество факторов [2]. Основным источником финансирования расходов организаций гражданской авиации на перевозки пассажиров является доход, получаемый от продажи проездных документов. Поэтому риск снижения дохода определяется уровнем спроса населения на услуги, осуществляемые воздушным транспортом. Природа этого риска зависит от комплексного влияния экономических, демографических, финансовых, технологических, правовых и политических рисков. Отдельно стоит сказать про эпидемиологические риски, погрузившие в 2020 году авиационную индустрию в тяжелейший кризис за всю историю.

Удовлетворение авиаперевозчиками предпочтений конкретного потребителя услуг зависит от *технологических* рисков, которые в свою очередь связаны с наличием барьеров физического и нефизического характера, препятствующих устойчивому функционированию воздушного транспорта. Под барьерами физического характера обычно подразумеваются так, называемые «узкие» места и «недостающие» звенья в транспортной инфраструктуре. В первую очередь это уровень развития, транспортно-эксплуатационное состояние взлетно-посадочных полос (ВПП) и рулежных дорожек, развитость

аэровокзалов и их инфраструктура.

Анализ транспортной инфраструктуры на наличие физических барьеров показал, что на территории Национального аэропорта «Минск» введена в строй новая ВПП и производятся ремонтные работы второй ВПП. Введение в эксплуатацию обеих ВПП позволит снизить влияние физического барьера на деятельность авиаорганизаций.

Среди возможных барьеров нефизического характера, препятствующих устойчивому выполнению перевозок пассажиров воздушным транспортом, можно назвать тарифы на авиационное топливо, нормативные правовые акты, регламентирующие порядок и условия выполнения пассажирских перевозок, иные меры государственного регулирования.

Рассматривая *правовые* риски, было выявлено, что условия деятельности на рынке услуг в сфере перевозок пассажиров воздушным транспортом регламентируются полностью сформированной законодательной базой, которая включает в себя, прежде всего Воздушный Кодекс Республики Беларусь, Авиационные правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов, Авиационные правила регулирования коммерческих условий воздушных перевозок, а также нормативные правовые акты, регламентирующие оформление документации, режим труда и отдыха пилотов и другие правовые вопросы. Помимо этого, выполнение международных воздушных перевозок пассажиров регламентируется двусторонними межправительственными соглашениями «О международном воздушном сообщении», а также многосторонними международными соглашениями и конвенциями, к которым присоединилась Республика Беларусь. Таким образом, нормативная правовая база, благодаря своей стабильности, в целом не несет в себе существенных рисков для развития перевозок пассажиров воздушным транспортом.

Турбулентная ситуация в *политике*, как правило, повышает вероятность введения санкционных мер, запретов на проведение

полетов, отказ от сотрудничества с определенными авиакомпаниями. Большинство таких ситуаций находятся вне контроля авиаперевозчика, так как носят значительный глобальный масштаб.

Риски эпидемиологического характера, оказывающие влияние на развитие рынка перевозок, связаны с введением ограничительных мер, таких как закрытие границ, ограничения на поездки и введение карантина, что значительно снижает экономическую активность, включая производство, инвестиции, частное потребление и торговлю. По итогам 2020 года пассажирооборот воздушного транспорта по республике снизился на 9,7 % к уровню 2015 года, объем перевезенных пассажиров – на 18,3 % [1], что негативно повлияло как на саму отрасль, так и на экономику республики в целом.

Анализ портфеля рисков белорусской авиаотрасли позволяет считать, что степень чувствительности к определенным рискам у авиаперевозчиков варьируется, именно этим объясняется неустойчивое состояние рынка пассажирских перевозок.

Для минимизации воздействия финансовых рисков необходимо осуществлять:

- определение приоритетов для первоочередного финансирования;
- мониторинг освоения средств в целях их перераспределения с учетом текущей потребности;
- при отсутствии необходимого финансирования из бюджета – проведение работ по привлечению внебюджетного финансирования;
- своевременное изменение технологии перевозочного процесса и технической эксплуатации транспортных средств и инфраструктуры;
- мониторинг изменений в международном законодательстве и законодательстве Республики Беларусь.

Для минимизации риска недофинансирования работы воздушного транспорта необходимо обеспечить безубыточность выполнения международных перевозок пассажиров в регулярном сообщении.

Для снижения убытков авиаперевозчика также требуется продолжить работу по оптимиза-

Описание риска	Факторы риска
Экономические риски	Замедление темпов экономического роста, сокращение покупательской способности населения, рост цен на продукты и услуги
Демографические риски	Снижение численности населения, сельского населения, учащихся и студентов
Финансовые риски	Изменение валютных курсов, изменение условий кредитования, повышение уровня процентных ставок, неисполнение кредитных обязательств, разрыв во времени между оказанием услуг и поступлением денежных средств
Технологические риски	Высокая волатильность цен на авиационное топливо, недостатки инфраструктуры аэропортов, обслуживания авиационной техники
Правовые риски	Изменение налогового законодательства, валютного регулирования, правил таможенного контроля и пошлин, требований по лицензированию деятельности, систем международного и белорусского регулирования авиаперевозок
Политические риски	Санкции, закрытие традиционных рынков, местные вооруженные конфликты, политическая нестабильность
Эпидемиологические риски	Закрытие границ, предотвращение распространения инфекции, сокращение спроса на авиаперевозки, период сохранения эпидемиологической обстановки

ции рациональной организации перевозок пассажиров и снижения затрат на эти цели, корректировке графиков движения транспортно-транспортных средств, координации расписания движения рейсовых автобусов до РУП «Национальный аэропорт Минск» с иными видами транспорта, расширению маршрутной сети общественного транспорта по доставке пассажиров из зоны прилета в столицу.

Требуется продолжить работу по реализации следующих направлений в рамках Государственной программы «Транспортный комплекс» на 2021–2025 гг. [3]:

- совершенствование международной правовой базы в области гражданской авиации;
- создание экономических условий, направленных на стимулирование спроса на перевозки;

- совершенствование тарифной политики авиационных перевозчиков;

- обновление парка топливно-эффективными воздушными судами;

- развитие маршрутной сети, в том числе освоение трансконтинентальных направлений;

- внедрение передовых информационных технологий для продажи авиаперевозок;

- развитие бизнес-авиации;

- внедрение упрощенных схем оформления и таможенного декларирования при транзите грузов через территорию республики в третьи страны с внедрением программы e-Freight (электронный груз).

Заключение

В результате проведенного анализа основных рисков развития пассажирских авиаперевозок можно сделать следующий вывод: наибольшее воздействие на эффективность функционирования воздушного транспорта, выполняющего международные перевозки, оказывают преимущественно экономические, финансовые, технологические риски. В настоящее время к данному списку добавились факторы политического и эпидемиологического риска, оказывающие хоть и временное, но ощутимое влияние на отрасль.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Основные показатели работы транспорта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 26.05.2022.
2. Рабочая группа ARMS ICAO. Методология оценки эксплуатационного риска [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zs-m.favt.ru/>. – Дата доступа: 26.05.2022.
3. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Государственная программа «Транспортный комплекс» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/>. – Дата доступа: 26.05.2022.

REFERENCES

1. National Statistical Committee of the Republic of Belarus. The main indicators of transport operation [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.belstat.gov.by/>. – Access date: 05/26/2022.
2. ARMS ICAO Working Group. Methodology for assessing operational risk [Electronic resource]. – Access mode: <https://zs-m.favt.ru/>. – Access date: 05/26/2022.
3. National legal Internet portal of the Republic of Belarus. State program "Transport complex" for 2021–2025 [Electronic resource]. – Access mode: <https://pravo.by/>. – Access date: 05/26/2022.

Статья поступила в редакцию
05.06.2022

УДК 621.396.98

А.Г. БОРОВОЙ, А.П. КУЛЬПАНОВИЧ, А.С. МАЛИКОВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Александр Григорьевич Боровой – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
baravoi_aliaksandr@mail.ru

Alexander Borovoy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Research Laboratory of the Military Faculty of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
baravoi_aliaksandr@mail.ru

Андрей Павлович Кульпанович – кандидат технических наук, доцент, начальник научно-технического отдела учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
andrKulp@yandex.by

Andrey Kulpanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for scientific work of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
andrKulp@yandex.by

Алексей Сергеевич Маликов – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры воздушных судов и авиационного оборудования военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Aleksey Malikov – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Aircraft and Aviation Equipment of the Military Faculty of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Аннотация: разработана имитационная математическая модель разностно-дальномерной навигационной системы дальней навигации и обоснованы предложения по повышению точности определения географических координат.

Ключевые слова: разностно-дальномерная навигационная система, математическая модель, алгоритм, географические координаты.

Annotation: a simulation mathematical model of a difference-range navigation system for long-range navigation has been developed and proposals for improving the accuracy of determining geographic coordinates have been substantiated.

Keywords: difference-range navigation system, mathematical model, algorithm, geographic coordinates.

Введение

Непрерывное совершенствование навигационной системы, как одной из основных составных частей подвижного объекта напрямую связано с повышением требований к точности его позиционирования. Данное обстоятельство привело к существенной зависимости большинства навигационных систем от спутниковой навигационной системы (СНС). Вместе с тем такая критическая зависимость является достаточно серьезной проблемой в случае отсутствия по различным причинам информации от СНС. Общепринятым подходом в таком случае является поиск альтернативных (резервных) источников навигационной информации. Одним из возможных вариантов является разностно-дальномерная

импульсно-фазовая радионавигационная система дальней навигации (РСДН) «Чайка» наземного базирования которая в настоящее время эксплуатируется и предназначена для навигационного обеспечения подвижных объектов всех групп потребителей с точностью, достаточной для решения транспортных задач. Одним из значимых преимуществ такой системы является ее достаточно большая рабочая зона (около 20 млн. км²) и в целом для Республики Беларусь такую систему «условно» можно считать глобальной [4].

Основными направлениями, которые перекрывает РСДН «Чайка», являются: Европейская, Северная и Восточная цепи (рисунок 1).

В рамках данной статьи будет рассматриваться исключительно Европейское направление как наиболее актуальное.

Постановка задачи

Определение плановых координат потребителей при неограниченной пропускной способности обеспечивается РСДН «Чайка» с точностью $2\sigma = 100...500$ м, что не удовлетворяет требованиям большинства современных потребителей. По этой причине актуальной является выработка предложений по повышению точности определения плановых координат. Для этого необходимо разработать математическую модель существующей РСДН «Чайка», которая будет использоваться в качестве инструмента поиска вариантов повышения точностных характеристик.

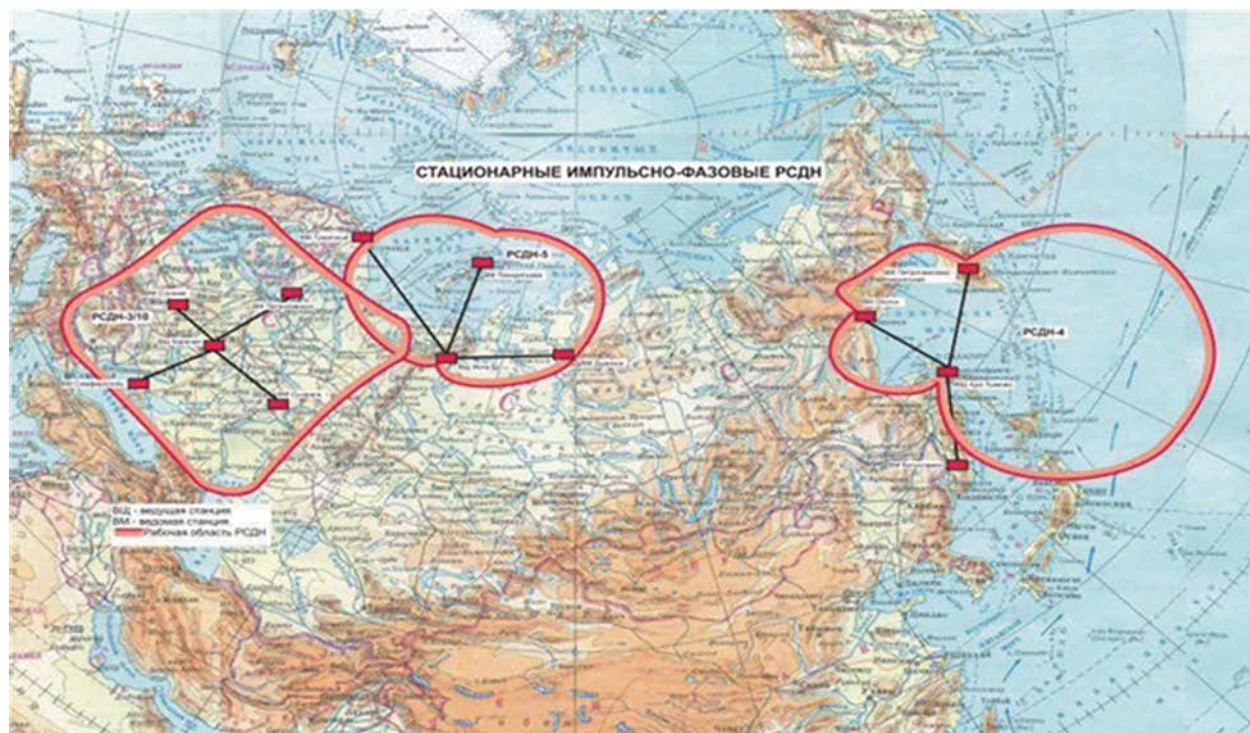


Рисунок 1 – Расположение наземных станций системы РСДН «Чайка»

Решение задачи

Система РСДН «Чайка» состоит из пяти наземных станций (одна ведущая и четыре ведомые) и приемников радиосигналов, которые устанавливаются на объекты. Основные характеристики наземных станций и их расположение представлены в таблице 1.

Математическая модель РСДН в большей степени повторяет ее структурную схему [5]. Основными элементами математической модели являются (рисунок 2): блок ввода исходной информации; модель сигналов наземных станций; блок обработки сигналов наземных станций; блок расчета плановых координат приемника.

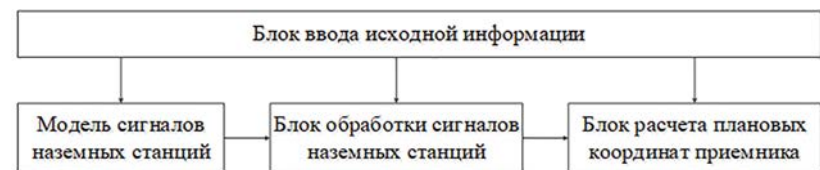


Рисунок 2 – Структурная схема математической модели РСДН

Таблица 1 – Расположение передающих станций

№ п/п	Город	Координаты	Задержка излучения, мкс	Кодовая задержка, мкс	Мощность, кВт
М	Брянская область, Карачевский район, г. Карачев	53°07'50"с.ш. 34°54'44"в.д.			450
1	Республика Карелия, Пряжинский район, пос. Пряжа	61°45'32"с.ш. 33°41'40"в.д.	13 217.21	10 000	700
2	Республика Беларусь, Гродненская область, г. Слоним	53°07'55"с.ш. 25°23'46"в.д.	27 125.00	25 000	450
3	Республика Крым, Симферополь, пос. Плодовое	33°52'32"в.д. 33°52'32"в.д.	53 070.25	50 000	550
4	Самарская область, Сызранский район, пос. Балашейка	53°17'17"с.ш. 48°06'53"в.д.	67 941.60	65 000	700

Назначением блока ввода исходных данных является определение (изменение) значений параметров, используемых в математической модели.

Математическая модель сигналов наземных станций (рисунок 3) представляет собой математическую модель радиосигналов [2] и энергетических расчетов [3, 4]. Излучаемые наземными станциями радиосигналы представляют собой последовательность двух пачек радиоимпульсов – четной (А) и нечетной (В), с периодом повторения $T_{\text{п}}$ равным 80 000 мкс. Начальная фаза радиоимпульсов изменяется в соответствии с кодом, представленным в таблице 2.

Пачка радиоимпульсов состоит из восьми для четырех ведомых и девяти для ведущей станции импульсов, с периодом повторения импульсов в пачке – 1 000 мкс. Математическая модель каждого из импульсов описывается выражением [2]:

$$U(t) = U_m e^{-\alpha t} (1 - \cos(\Omega t)), \quad (1)$$

где U_m – амплитуда излучаемого сигнала;

α, Ω – коэффициенты аппроксимации огибающей фронта радиоимпульса.

В рабочем диапазоне частот РСДН (100 кГц) в точку приема могут приходиться поверхностные и пространственные, отраженные от ионосферы, радиоволны. На основе экспериментальных данных задержка пространственного сигнала относительно поверхностного составляет не менее 40 мкс [5]. Для моделирования данного эффекта временная структура сигнала представляется, как сумма двух радиосигналов при которой второй задержан относительно первого на равновероятностное значение τ_i , где $i = 1...5$, выбираемое из временного интервала 40...120 мкс.

Мощность принимаемого сигнала на фланце приемной антенны от каждой из пяти наземных станций рассчитывается исходя из следующего выражения:

$$P_c = \frac{P_o G_{\text{прм}} G_{\text{прд}} \lambda^2}{(4\pi D)^2}, \quad (2)$$

где P_o – мощность передатчика наземной станции;

$G_{\text{прм}}, G_{\text{прд}}$ – коэффициенты усиления приемной и передающей антенн;

λ – длина волны радиосигнала; D – расстояние между наземной станцией и приемником сигнала.

Радиосигналы наземных станций излучаются в строго определенной последовательности. Для сигналов каждой ведомой станции отводится вполне определенный интервал времени периода повторения сигналов ведущей станции. В течение этого интервала могут излучаться сигналы только этой станции. Постоянные задержки сигналов ведомых станций составляют: 10 000 мкс; 25 000 мкс;

50 000 мкс; 65 000 мкс. Вместе с тем необходимо учитывать задержку по времени $\Delta\tau_j$, где $j = 1...4$, обусловленную разностью расстояний приемник – ведущая станция и приемник – ведомая станция.

Исходя из вышеизложенного структурную схему математической модели сигналов наземных станций можно представить в виде – рисунок 3, а. Временная структура нормированных сигналов наземных станций представлена на рисунке 3, б.

Сформированный сигнал наземных станций поступает в блок обработки сигналов наземных станций, принцип функционирования которого достаточно подробно описан в [1, 5]. Основными этапами обработки радиосигналов в приемнике сигнала РСДН являются:

- Первый этап – разделение сигналов наземных станций на сигналы ведущей и ведомых станций, за счет различий в используемом коде фазовой манипуляции импульсов. Для этого осуществляется попарная обработка первых и вторых четверок импульсов четной

и нечетной пачек (рисунок 4). После чего осуществляется этап обнаружения сигналов [3].

- Второй этап – грубое измерение временных интервалов пропорциональных разностей дальностей. На этом этапе осуществляются измерения с точностью до огибающей радиосигнала. Ошибка измерения на данном этапе достаточно большая. Для ее уменьшения используется фазовый способ измерения временного интервала.

- Третий этап – точное определение временного интервала за счет измерения разности фаз сигналов ведущей станции и всех ведомых станций. Дополнительной решаемой задачей на данном этапе является разрешение многозначности.

Таблица 2 – Коды фазы радиоимпульсов радионавигационной системы «Чайка»

Группа	Ведущая станция	Ведомая станция
A	++--+-+ *+	+++++--+
B	+---++++ *+	+--+++--

*Дополнительный импульс для передачи служебной информации двоичным фазовым кодом

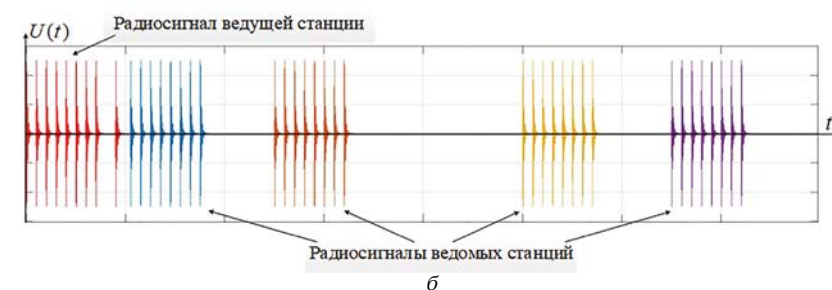
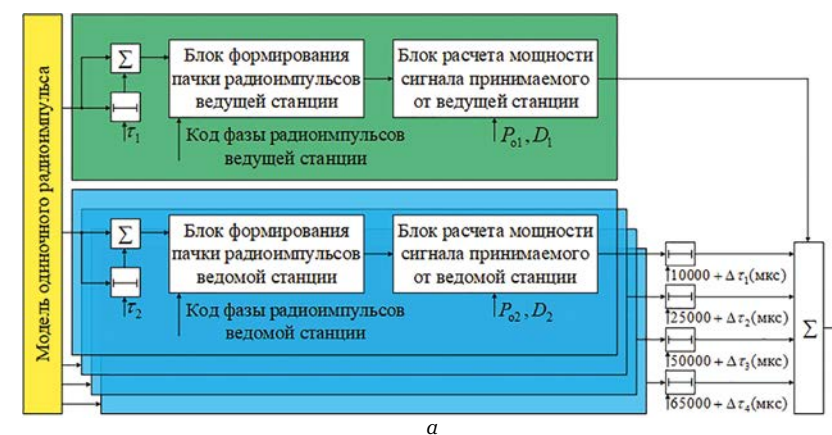


Рисунок 3 – Структурная схема математической модели сигналов наземных станций (а) и их временная структура (б)

Измеренные значения временных интервалов, пропорциональных разностям дальностей (гиперболические координаты), поступают в блок расчета плановых координат приемника. Преобразование гиперболических координат в географические основано на обобщенном способе линий положения (рисунок 5) [5].

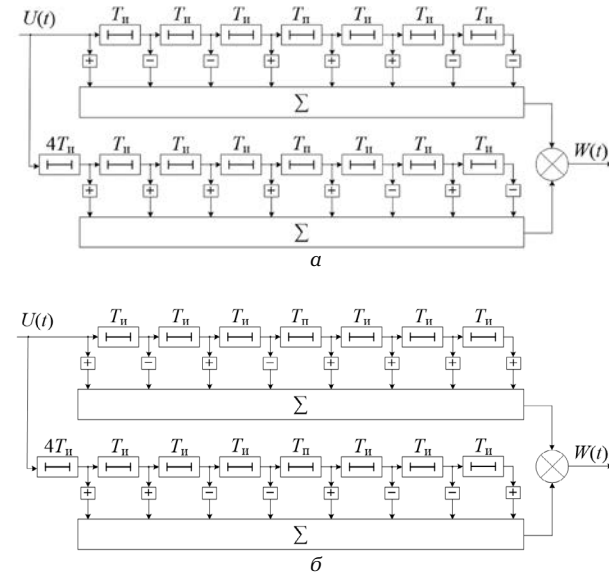


Рисунок 4 – Схема формирования взаимокорреляционной функции сигналов ведущей (а) и ведомых (б) станций

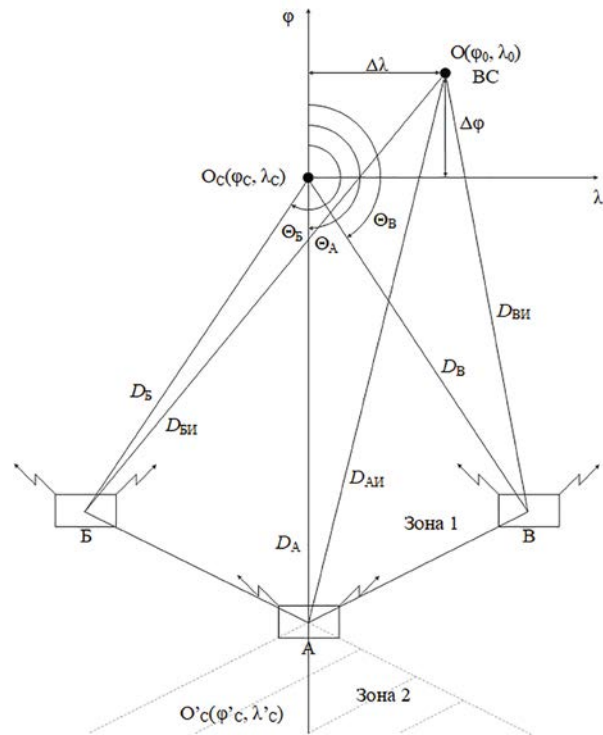


Рисунок 5 – Геометрические соотношения обобщенного способа линий положения

Координаты рассчитываются в географической системе. Для этого используются следующие исходные данные:

φ_i, λ_i – географические координаты наземных станций, $i = A$ (ведущая), B (ведомая), B (ведомая);

φ_c, λ_c – географические координаты опорной точки;

$\tau_{\Sigma j}$ – суммарная задержка по паре станций (с учетом базовых задержек), $j = 1, 2$;

Θ_1, Θ_2 – измеренные значения временных интервалов;

V_ϕ – усредненные для тройки станций скорости распространения радиоволн в рабочей зоне;

$R_3 = 6378245$ – радиус Земли, м;

$V_\phi/R_3 = 46,935324$;

$\rho = 0,83886107$ – масштабный коэффициент.

По этой информации сначала рассчитываются $\sin(\varphi_i), \cos(\varphi_i)$. Затем решение задачи производится по следующим этапам:

1. Преобразование отрицательных значений долготы и разностей долготы (для сохранения масштаба угловых величин):

если $|\lambda_i| \leq \pi/2$ и $|\lambda_c| \leq \pi/2$, то $\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_c$;

если $\lambda_i \geq 0$ и $\lambda_c \geq 0$ или $\lambda_i < 0$ и $\lambda_c < 0$, то $\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_c$;

если $\lambda_i \geq 0$ и $\lambda_c < 0$, то вычисляется $\lambda'_c = \lambda_c + \pi$;

$\Delta\lambda' = \lambda'_i - \lambda'_c$, $\Delta\lambda = \lambda' + \pi$;

если $\lambda_i < 0$ и $\lambda_c \geq 0$, то вычисляется $\lambda'_i = |\lambda_i| + \pi$;

$\Delta\lambda' = \lambda'_i - \lambda'_c$, $\Delta\lambda = \lambda' + \pi$.

2. Вычисления расстояний от «опорной» точки C до станций

$$D_j(\varphi, \lambda) = (D_i + dD_i) \cdot R_3, \quad (3)$$

где R_3 – средний радиус Земли;

D_i – сферическое расстояние между точками;

$dD_i = (\rho_j \mu_j - q_j) b$ – поправка на сферичность.

Величины, входящие в выражение (3), определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} D_i &= \arccos[\sin(\varphi_i) \cdot \sin(\varphi_c) + \cos(\varphi_i) \times \\ &\quad \times \cos(\varphi_c) \cdot \cos(\lambda_i - \lambda_c)]; \\ \rho_j &= (3 \sin(D_i) - D_i) / \cos^2(D_i/2); \\ q_j &= (3 \sin(D_i) - D_i) / \cos^2(D_i/2); \\ b &= \sqrt{1 - a^2}; \\ \mu_j &= (\sin(\varphi_i) + \sin(\varphi_c)) / 2; \\ \nu_j &= (\sin(\varphi_i) - \sin(\varphi_c)) / 2, \end{aligned} \quad (4)$$

где $b = 1/298,3$ – сжатие Земли;

$e^2 = 0,006693421623$ – первый эксцентриситет эллипсоида Красовского.

3. Вычисление азимутов на станции в «опорной» точке:

$$\begin{aligned} \sin(\Theta_{C_i}) &= (\sin(\lambda_i - \lambda_c) \cdot \cos(\varphi_i)) / \sin(D_i); \\ \cos(\Theta_{C_i}) &= (\sin(\varphi_i) - \sin(\varphi_c) \times \\ &\quad \times \cos(D_i)) / \cos(\varphi_c) \cdot \sin(D_i), \end{aligned} \quad (5)$$

где $i = A, B, B, \Gamma, \Delta$.

4. Определение опорных разностей расстояний:

$$\begin{aligned} \Delta D'_1 &= D_B - D_A; \\ \Delta D'_2 &= D_B - D_A. \end{aligned} \quad (6)$$

5. Преобразование отсчетов Θ_1, Θ_2 в $\Gamma_{\text{ПК}}$:

$$\begin{aligned} \Delta D_{1n} &= (\Theta_1 - \tau_{\Sigma 1}) \cdot V_\phi / R_3; \\ \Delta D_{2n} &= (\Theta_2 - \tau_{\Sigma 2}) \cdot V_\phi / R_3. \end{aligned} \quad (7)$$

6. Определение приращений разностей расстояний:

$$\begin{aligned} \delta D_1 &= \Delta D_{1n} - \Delta D'_1; \\ \delta D_2 &= \Delta D_{2n} - \Delta D'_2. \end{aligned} \quad (8)$$

7. Определение коэффициентов уравнений линий положения:

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos(\Theta_{B_1}) - \cos(\Theta_{A_1}); \\ a_2 &= \cos(\Theta_{B_2}) - \cos(\Theta_{A_2}); \\ b_1 &= \sin(\Theta_{B_1}) - \sin(\Theta_{A_1}); \\ b_2 &= \sin(\Theta_{B_2}) - \sin(\Theta_{A_2}). \end{aligned} \quad (9)$$

8. Определение приращений $\Gamma_{\text{ПК}}$:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= (\delta D_1 b_2 - \delta D_2 b_1) / (a_2 b_1 - a_1 b_2); \\ \Delta\omega &= (\delta D_2 a_1 - \delta D_1 a_2) / (a_2 b_1 - a_1 b_2); \\ \Delta\lambda &= \Delta\omega / \cos(\varphi_c). \end{aligned} \quad (10)$$

9. Определение условий конца итерационного процесса.

При $\Delta\varphi = \mu_1$ и $\Delta\omega = \mu_2$ происходит возвращение к началу задачи с заменой $\varphi_c = \varphi_0, \lambda_c = \lambda_0, \mu_1 = \mu_2 = 16/R_3$.

10. Вычисление географических координат местоположения воздушного судна:

$$\varphi_0 = \varphi_c + \Delta\varphi, \lambda' = \lambda_c + \Delta\lambda. \quad (11)$$

Если $|\lambda'| < \pi$, то $\lambda_0 = \lambda_c + \Delta\lambda$;

Если $|\lambda'| \geq \pi$, то при $\lambda' \geq 0$ $\lambda_0 = (\lambda' - \pi) - \pi$, а при $\lambda' < 0$ $\lambda_0 = (\lambda' + \pi) + \pi$.

Количество итерационных циклов n зависит от геометрических соотношений выбранной тройки станций, расположения точки измерения в рабочей зоне.

Заключение

Разработанная математическая модель является инструментом поиска способов повышения точности определения географических координат. Основными выводами, сделанными в процес-

се разработки математической модели, являются:

а) существует возможность повышения точности определения первичных измеряемых параметров (разностей дальностей) за счет совершенствования алгоритмов обработки радиосигналов наземных станций по сравнению с существующими [1, 5];

б) проведенные энергетические расчеты подтвердили возможность приема сигналов от всех пяти наземных станций, что позволяет использовать данную избыточность для повышения точности определения географических координат [6].

Таким образом, разработанная математическая модель является не только «отправной точкой» в проведении исследований, но и инструментом оценки выигрыша в точности определения географических координат при использовании новых алгоритмов их расчета и обработки сигналов наземных станций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бабич, О. А. Обработка информации в навигационных комплексах / О. А. Бабич. – М. : Машиностроение, 1991. – 512 с.
2. ГОСТ Р 53168-2008 Система радионавигационная «Чайка». Сигналы передающих станций. Технические требования / Национальный стандарт Российской Федерации / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М. : 2009 – 20 с.
3. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Часть 1. Основы радиолокации. / А. Е. Охрименко. – М. : 1983. – 454 с.
4. Радиотехнические системы передачи информации / В. А. Борисов, В. В. Калмыков, Я. М. Ковальчук и др.; под ред. В. В. Калмыкова. – М. : Радио и связь, 1990. – 304 с.
5. Сазонов, Н. А. Бортовая аппаратура А-711, А-720 и А-713 М радиотехнических систем дальней навигации / Н. А. Сазонов, [и др.]. – Тамбов : ТВВАИУ им. Ф. Э. Держинского, 1988. – 243 с.
6. Степанов, А. О. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания / Изд. 2-е исправлен. и дополнен. / А. О. Степанов. – СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – 509 с.

REFERENCES

1. Babich, O. A. Information processing in navigation systems / O. A. Babich. – M. : Mashinostroenie, 1991. – 512 p.
2. GOST R 53168-2008 Radio navigation system "Chaika". Transmitting station signals. Technical requirements / National Standard of the Russian Federation / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. – M. : 2009 – 20 p.
3. Okhrimenko, A. E. Fundamentals of radar and electronic warfare. Part 1. Fundamentals of radar. / A. E. Okhrimenko. – M. : 1983. – 454 p.
4. Radio engineering systems for information transmission / V. A. Borisov, V. V. Kalmykov, Ya. M. Kovalchuk and others; under. ed. V. V. Kalmykov. – M. : Radio and communication, 1990. – 304 p.
5. Sazonov, N. A. On-board equipment A-711, A-720 and A-713 M radio systems for long-range navigation / N. A. Sazonov, A. T. Abrarov, A. R. Aleksandrovich, G. A. Kunitskii and V. N. Matveev. – Tambov : TVVAIU im. F. E. Derzhinsky, 1988. – 243 p.
6. Stepanov, A. O. Fundamentals of the theory of estimation with applications to the problems of processing navigational information. Part 1. Introduction to the theory of estimation / Ed. 2nd corrected. and supplemented. / A. O. Stepanov. – St. Petersburg : State Scientific Center of the Russian Federation JSC Concern TsNIIElektroprigor, 2010. – 509 p.

Статья поступила в редакцию 16.06.2022

УДК 621.396.96

В. А. КРАСКОВСКИЙ, В. П. ТУЗЛУКОВ

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Вадим Александрович Красковский – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
vadim_kraskovskii@mail.ru

Vadim Kraskovsky – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of Technical Maintenance of Aviation and Radio Electronic Hardware of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
vadim_kraskovskii@mail.ru

Вячеслав Петрович Тузлуков – кандидат физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
slava.tuzlukov@mail.ru

Vyacheslav Tuzlukov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department of Technical Maintenance of Aviation and Radio Electronic Hardware of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
slava.tuzlukov@mail.ru

Аннотация: в настоящей работе предлагается имитационная модель обработки радиолокационных сигналов, позволяющая определить разрешающую способность радиолокационной системы по дальности и скорости воздушного объекта. Предложенная имитационная модель позволяет получать характеристики обнаружения сигналов и определять оптимальный вид зондирующего сигнала.

Ключевые слова: обработка радиолокационных сигналов, вероятность обнаружения, вероятность ложной тревоги, полоса пропускания.

Annotation: this paper deals with simulation model of radar signal processing. We are able to define resolution by target range and velocity using the suggested simulation model. Additionally, it is possible to obtain the signal detection performance and to construct an optimal shape of searching signal.

Keywords: radar signal processing, probability of detection, probability of false alarm, bandwidth.

Введение

В настоящее время остро стоит проблема обеспечения безопасности полетов. Для повышения безопасности полетов необходимо с высокой точностью определять координаты наземных и воздушных объектов. С этой целью в авиации применяются радиолокационные системы (РАС). Точность определения координат обнаруживаемых объектов зависит от выбора типа зондирующего сигнала, его параметров, эффективной площади рассеяния объекта, а также используемого алгоритма обработки сигналов.

В настоящее время опубликовано множество работ, посвященных алгоритмам первичной обработки сигналов. В [1, 2] проводится сравнительный анализ различных алгоритмов обнаружения сигна-

лов. В качестве обнаруживаемого сигнала рассматривается радиопульс без внутриимпульсной модуляции. В [3, 4] представлен анализ алгоритма первичной обработки некогерентной пачки частотно-модулированных радиопульсов на основе согласованной фильтрации. Результаты исследований, представленные в [6, 7], показывают преимущество применения обобщенной методологии обработки сигналов на фоне помех по сравнению с современными алгоритмами. В опубликованных работах уделяется недостаточное внимание выбору оптимального зондирующего сигнала, за исключением работ [6, 7]. В связи с этим, целесообразно определять тип и оптимальные параметры зондирующего сигнала для точного определения координат наземных и воздушных объектов.

Радиолокационные сигналы

При выборе типа зондирующего сигнала для радиолокационной системы можно столкнуться с рядом противоречий, которые обусловлены тем, что на данный момент не существует какого-то определенного вида сигнала, который удовлетворял бы всем требованиям, предъявляемым к РАС. Дальность действия радиолокационной системы зависит от энергии зондирующего сигнала. Например, полная энергия пачки прямоугольных радиопульсов определяется выражением $E_c = N \cdot P_n \cdot \tau_n$. Это значит, что при заданной скорости обзора пространства, которая определяется количеством импульсов N , полная энергия сигнала зависит от мощности P_n и длительности τ_n импульса. Учитывая ограничения по излучаемой мощности, пред-

являемые к радиопередающему тракту и антенной системе, увеличение дальности действия радиолокационной системы сопряжено с необходимостью увеличения длительности импульсов. Увеличение длительности импульсов ведет к ухудшению потенциальной разрешающей способности по дальности. Если говорить об измерении скорости радиолокационного объекта, то с увеличением длительности импульсов разрешающая способность по скорости объекта увеличивается, а также улучшается точность измерения скорости радиолокационного объекта.

Таким образом, увеличение длительности простого импульсного сигнала позволяет увеличить дальность действия РАС и повысить точность измерения скорости радиолокационного объекта, но при этом ухудшается точность измерения расстояния до радиолокационного объекта.

Для преодоления вышеуказанных противоречий необходимо в качестве зондирующего сигнала применять широкополосные сигналы с большой базой $B = \Delta f_c \cdot \tau_n \gg 1$. Здесь Δf_c – ширина спектра зондирующего сигнала, τ_n – длительность импульса. Существует два способа получить базу сигнала больше единицы: 1) применение составных сигналов в виде пачки когерентных импульсов; 2) применение сигналов с внутриимпульсной модуляцией или манипуляцией (фазовой, частотной).

В радиолокации в качестве зондирующих сигналов применяются прямоугольные импульсы с частотной и фазовой модуляцией.

Радиоимпульс с линейной частотной модуляцией

Радиоимпульс с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) представляет собой сигнал, у которого в течение длительности импульса τ_n частота изменяется по линейному закону [2]:

$$f(t) = f_0 + \frac{\Delta f_c}{\tau_n} t, \quad (1)$$

где f_0 – несущая частота сигнала;

Δf_c – ширина спектра зондирующего сигнала;

τ_n – длительность импульса.

Фаза такого сигнала изменяется по квадратичному закону в зависимости от времени t :

$$\varphi(t) = 2\pi f_0 t + bt^2 + \varphi_0, \quad (2)$$

а комплексная огибающая амплитуды сигнала может быть представлена в виде

$$\dot{U}(t) = \begin{cases} e^{j(bt^2 + \varphi_0)}, & |t| \leq \frac{\tau_n}{2} \\ 0, & |t| > \frac{\tau_n}{2} \end{cases}, \quad (3)$$

где $b = \frac{\pi B}{\tau_n^2} = \frac{\pi \Delta f_c}{\tau_n}$ – параметр фазовой модуляции;

B – база сигнала;

Δf_c – девиация частоты сигнала;

φ_0 – начальная фаза сигнала.

Применение импульсов с линейной частотной модуляцией позволяет реализовать требуемые разрешающие способности по дальности и скорости объекта путем независимого выбора девиации частоты сигнала Δf_c и его длительности τ_n [2, 5].

Радиоимпульс с фазо-кодовой модуляцией

В большинстве случаев сигналы с линейно-частотной модуляцией подвержены паразитной амплитудной модуляции. Также имеются сложности с обеспечением строгой линейности изменения частоты. В связи с этим, в радиолокации нашли широкое применение фазомодулированные сигналы с квадратурным законом изменения фазы, например, сигналы с модуляцией фазы в соответствии с кодом Фрэнка. Такие сигналы имеют постоянную амплитуду и частоту и состоят из N_2 парциальных импульсов длительностью τ_0 и начальной фазой $\varphi_n = 2\pi k_n / N$, где коэффициент k_n имеет квадратичную зависимость от порядкового номера элементарного импульса n . Коэффициенты k_n характеризуют закон изменения начальной фазы парциальных импульсов и могут быть представлены в виде матрицы размером $N \times N$:

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & \dots & (N-2) & (N-1) \\ 0 & 2 & 4 & \dots & 2(N-2) & 2(N-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & N-1 & (N-1)2 & \dots & (N-1)(N-2) & (N-1)(N-1) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Кодовая последовательность, которая задает величину начальной фазы парциальных импульсов, формируется считыванием строки за строкой взятых по модулю N элементов матрицы. База сигнала с фазо-кодовой модуляцией (ФКМ) определяется

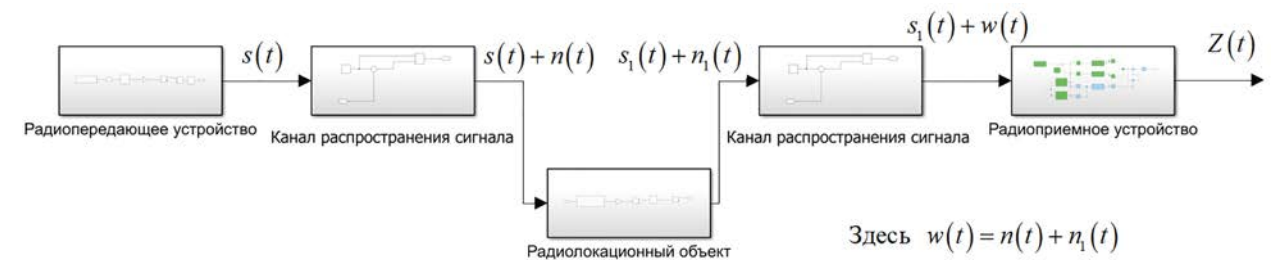


Рисунок 1 – Имитационная модель обработки радиолокационных сигналов

отношением длительности радиопульса τ_n к длительности составляющих его парциальных импульсов τ_0 , то есть $B = \tau_n / \tau_0$. Поскольку длительность радиопульса и длительность образующих его парциальных импульсов формируются независимо друг от друга, то применение сигналов с фазово-кодовой модуляцией позволяет обеспечивать одновременно высокие разрешающие способности РЛС по дальности и скорости объекта.

Имитационное моделирование

В среде моделирования MATLAB SIMULINK была построена имитационная модель обработки радиолокационных сигналов (рисунок 1). Радиопередающее устройство формирует зондирующий сигнал $s(t)$. Проходя через канал распространения зондирующий сигнал подвергается воздействию аддитивной помехи $n(t)$. Взаимодействие радиолокационного объекта с зондирующим сигналом приводит к изменению параметров входного сигнала, вследствие чего от радиолокацион-

ного объекта отражается аддитивная смесь сигнала $s_1(t)$ и помехи $w(t)$. По результатам обработки случайного процесса на выходе радиоприемного устройства формируется решающая статистика $Z(t)$.

Параметры моделирования приведены в таблице.

Модель радиопередающего устройства радиолокационной станции

Предлагаемая модель радиопередающего устройства РЛС представлена на рисунке 2.

Модель радиопередающего устройства позволяет формировать зондирующие сигналы $s(t)$ с линейно-частотной модуляцией и сигналы с модуляцией фазы кодом Фрэнка.

В ходе моделирования использовался импульсный сигнал с линейной частотной модуляцией со следующими параметрами: начальная частота несущего колебания – 2 ГГц; частота следования импульсов – 1 000 Гц; длительность импульса – 50 мкс; девиация частоты несущего колебания – 100 МГц; частота дискретизации – 36 МГц.

Для определения разрешающей способности по дальности и скорости объекта можно воспользоваться функцией неопределенности. Функция неопределенности дает оценку степени различия двух сигналов, которые отличаются по времени запаздывания и по доплеровскому сдвигу частоты [2]. Анализ функции неопределенности позволяет определить разрешающие способности РЛС по дальности до воздушного судна и скорости полета воздушного судна. Встроенные средства среды моделирования MATLAB позволяют построить и определить характеристики зондирующих сигналов с линейно-частотной и фазо-кодовой модуляциями. Сечение трехкоординатной функции неопределенности при нулевом доплеровском сдвиге несущей частоты для заданного сигнала показано на рисунке 3.

Таблица – Параметры моделирования

Параметры	Значение
Общие параметры	
Закон распределения помехи	Гауссовский
Математическое ожидание помехи	0
Вероятность ложной тревоги	10^{-3}
Эффективная поверхность рассеяния объекта, м ²	5
Расстояние до объекта, км	100
Зондирующий сигнал 1	
Вид сигнала	Импульсный
Закон модуляции	Линейно-частотный
Длительность импульса, мкс	50
Частота следования импульсов, Гц	1 000
Несущая частота, ГГц	2
Девиация частоты несущего колебания, МГц	100
Зондирующий сигнал 2	
Вид сигнала	Импульсный
Закон модуляции	Модуляция фазы кодом Фрэнка
Длительность парциального импульса, мкс	0,5
Количество парциальных импульсов, шт.	64
Частота следования импульсов, Гц	1 000
Несущая частота, ГГц	2

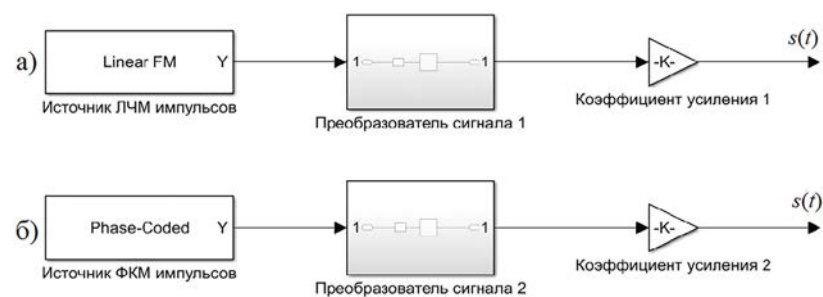


Рисунок 2 – Модель радиопередающего устройства радиолокационной станции: а – излучающей ЛЧМ импульсы; б – излучающей ФКМ импульсы

Разрешающая способность по дальности определяется из выражения:

$$\Delta_D = \frac{c}{2\Delta f_d}, \quad (5)$$

где Δf_d – девиация частоты несущего колебания; c – скорость распространения радиоволны в вакууме.

На рисунке 3 можно наблюдать четыре побочных максимума.

Последовательность импульсов с линейной частотной модуляцией при заданных параметрах обеспечивает разрешающую способность по дальности 1,5 м, но при этом наличие дополнительных максимумов приводит к ухудшению точности определения расстояния до объекта.

Сечение трехкоординатной функции неопределенности при нулевой временной задержке сигнала показано на рисунке 4.

Разрешающая способность по скорости объекта определяется выражением:

$$\Delta_V = \frac{\lambda}{2\tau_n}, \quad (6)$$

где λ – длина волны сигнала.

Из (6) получаем, что разрешающая способность по скорости объекта составит 1 500 м/с.

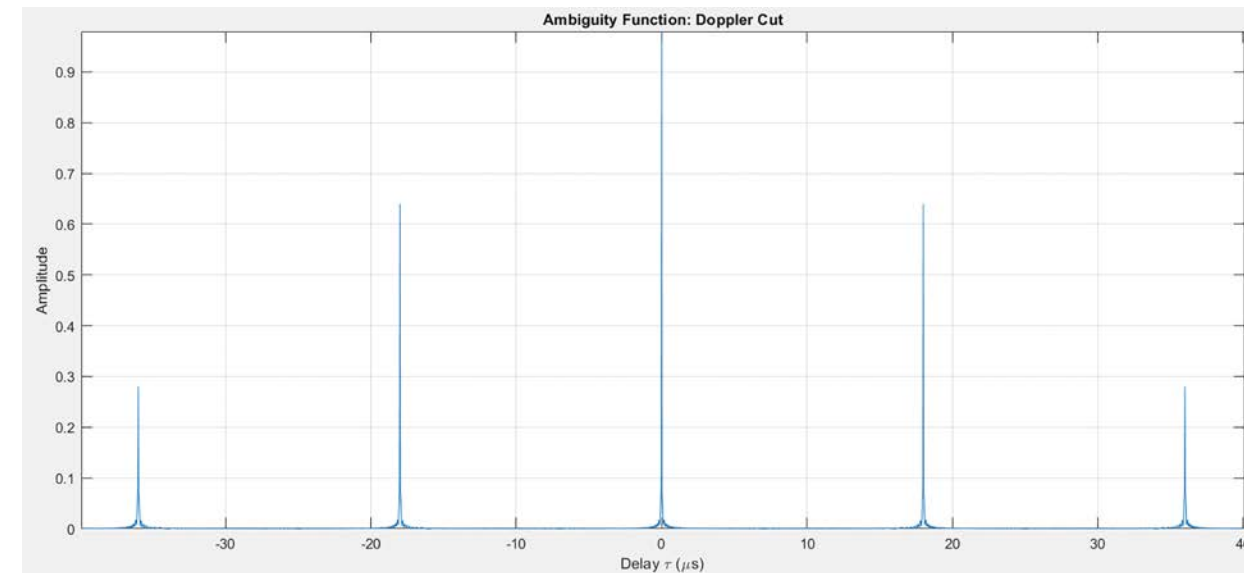


Рисунок 3 – Сечение трехкоординатной функции неопределенности при нулевом доплеровском сдвиге начальной частоты сигнала

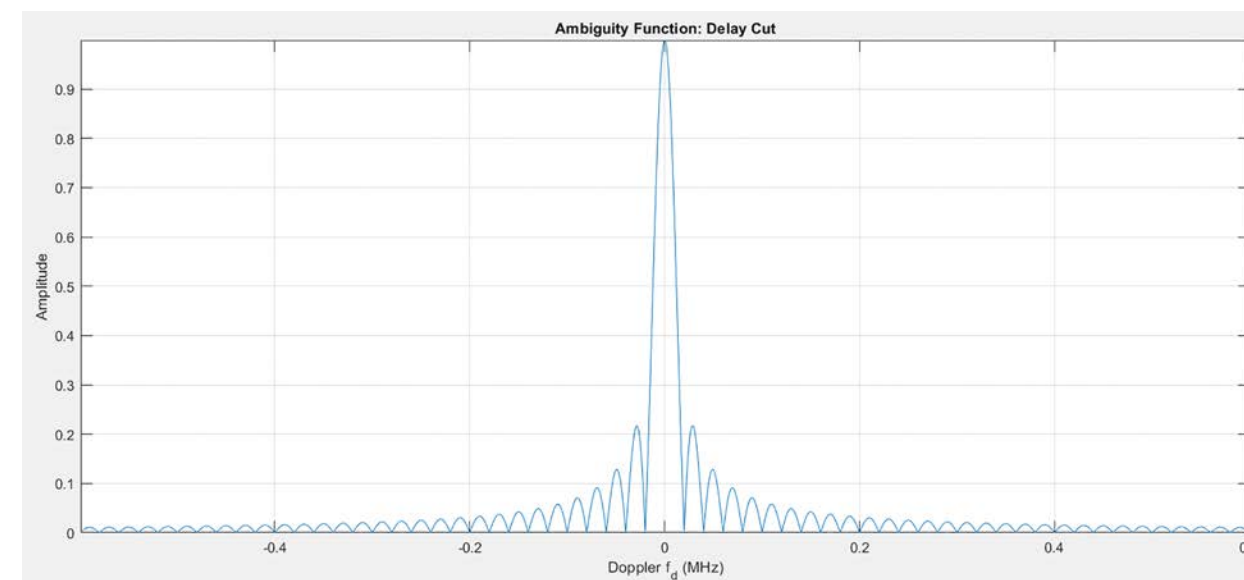


Рисунок 4 – Сечение трехкоординатной функции неопределенности при нулевой временной задержке сигнала

В ходе моделирования использовался импульсный сигнал с модуляцией фазы кодом Фрэнка со следующим параметрами: частота несущего колебания – 2 ГГц; частота следования импульсов – 1 000 Гц; длительность парциального импульса – 0,5 мкс; количество парциальных импульсов – 64; частота дискретизации – 36 МГц. Сечение трехкоординатной функции неопределенности при нулевом доплеровском сдвиге несущей частоты для заданного сигнала показано на рисунке 5.

Разрешающая способность по дальности определяется из выражения:

$$\Delta_D = \frac{c \cdot \tau_0}{2}, \quad (7)$$

где τ_0 – длительность парциального импульса.

С учетом (7) разрешающая способность по дальности равна 75 метров, что на 73,5 метра хуже, чем для сигнала с линейной частотной модуляцией с заданными параметрами (5). Если уменьшать длительность парциального импульса до 10 наносекунд, можно будет получить такую же раз-

решающую способность по дальности, что и при использовании ЛЧМ импульса. Следует отметить, что функция неопределенности сигнала с модуляцией фазы кодом Фрэнка не имеет дополнительных максимумов, то есть применение данного сигнала в радиолокации не приведет к ухудшению точности определения расстояния до обнаруживаемого объекта. Сечение трехкоординатной функции неопределенности при нулевой временной задержке сигнала показано на рисунке 6.

Как видно из рисунка 6, ширина главного лепестка сечения трехкоординатной функции не-

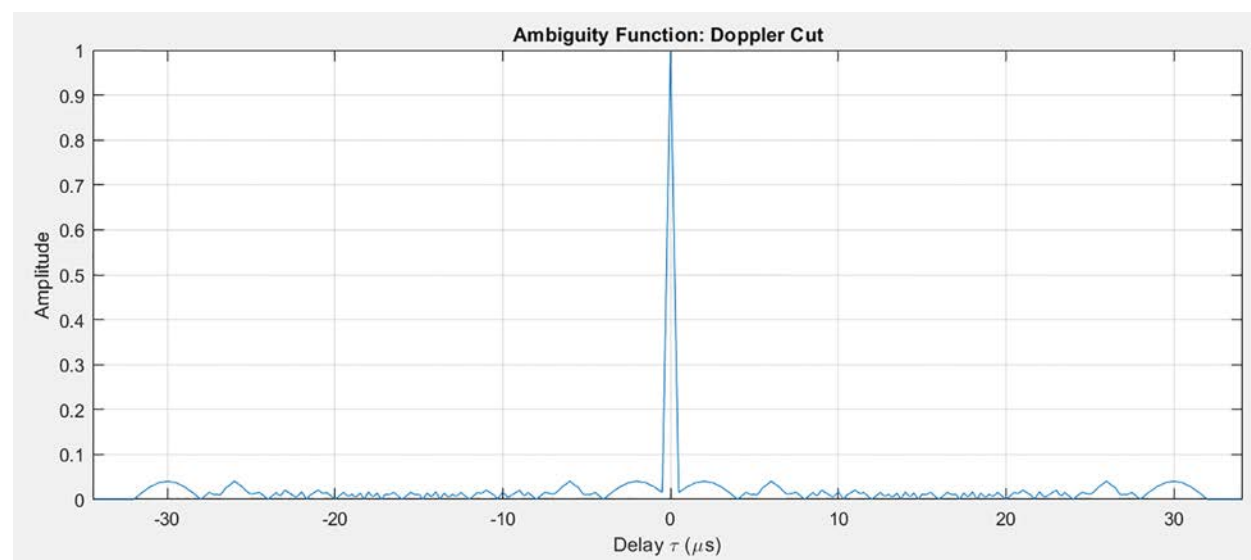


Рисунок 5 – Сечение трехкоординатной функции неопределенности при нулевом доплеровском сдвиге начальной частоты сигнала с модуляцией фазы кодом Фрэнка

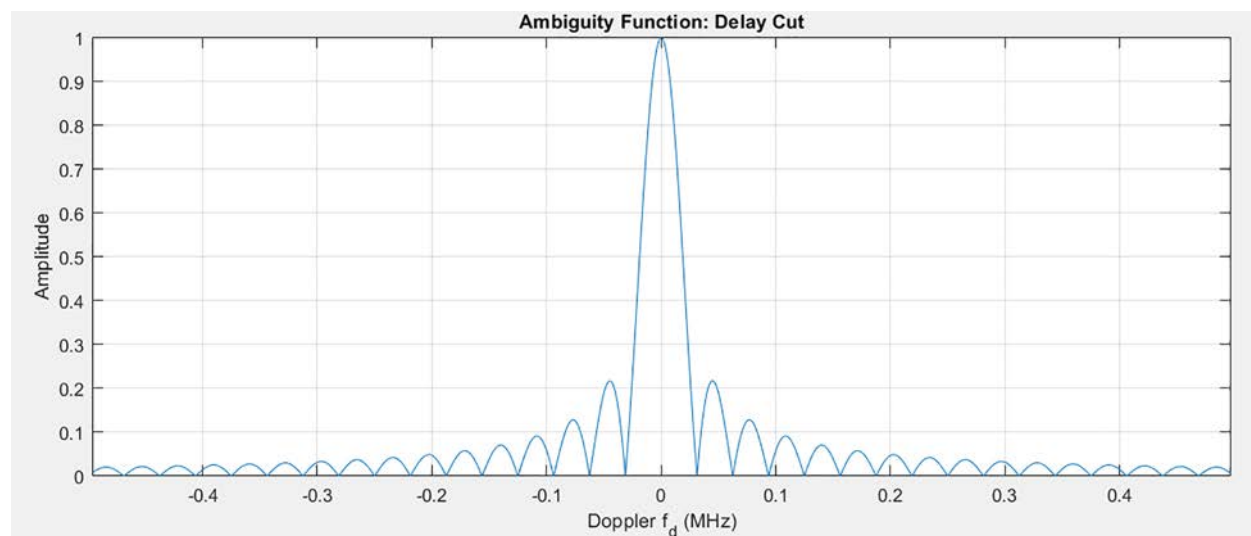


Рисунок 6 – Сечение трехкоординатной функции неопределенности при нулевой временной задержке сигнала с модуляцией фазы кодом Фрэнка

определенности при нулевой временной задержке сигнала с модуляцией фазы кодом Фрэнка такая же, как и для случая сигнала с линейной частотной модуляцией при заданных параметрах сигналов. А значит и разрешающая способность по скорости равна 1 500 м/с.

Модель приемного устройства первичной обработки радиолокационных сигналов

При первичной обработке сигналов решаются задачи обнаружения воздушных объектов и определения их координат, дальности, радиальной скорости, азимута и угла места относительно РЛС. Принятие решения об обнаружении воздушного объекта осуществляется путем формирования решающей статистики на выходе устройства первичной обработки сигналов и сравнения ее с выбранным на основе фиксированной вероятности ложной тревоги и статистических параметров помехи порогом.

В настоящей работе предлагаются две модели приемного

устройства первичной обработки радиолокационных сигналов. Первая модель приемного устройства первичной обработки радиолокационных сигналов представлена на рисунке 7.

Модель приемного устройства, представленная на рисунке 7, состоит из трех каналов. **Корреляционный канал** содержит предварительный фильтр; перемножители 1, 2, 5 и 6; интегрирующие устройства 1 и 2; сумматор 2; генератор модели зондирующего сигнала и фазовращатель на 90°. **Автокорреляционный канал** содержит предварительный и дополнительный фильтры, перемножители 3, 4 и 7; сумматор 1; интегрирующее устройство 3. **Компенсационный канал** содержит сумматоры 3 и 4.

Вторая модель приемного устройства первичной обработки радиолокационных сигналов представлена на рисунке 8.

Модель приемного устройства, представленная на рисунке 8, содержит предварительный фильтр, перемножители 1 – 4; интегрирующие устройства 1 и 2; сумматор 1;

генератор модели зондирующего сигнала и фазовращатель на 90°.

На вход приемного устройства поступает случайный процесс, который представляет собой только помеху или аддитивную смесь отраженного от объекта сигнала и помехи.

Для обобщенного обнаружителя сигналов (рисунок 7) предварительный фильтр согласован с эффективной шириной полосы частот Δf зондирующего сигнала. Для простоты анализа дополнительный фильтр также согласован с эффективной шириной полосы частот Δf зондирующего сигнала по величине, но центральные частоты предварительного и дополнительного фильтров должны быть разнесены друг относительно друга на величину не менее $4 \div 5 \Delta f$. В этом случае процессы на выходе предварительного и дополнительного фильтров практически не коррелированы, что доказано экспериментально в [6]. На практике ширина полосы пропускания дополнительного фильтра может отличаться от эффективной ширины полосы частот зондирующего сигнала. Этот

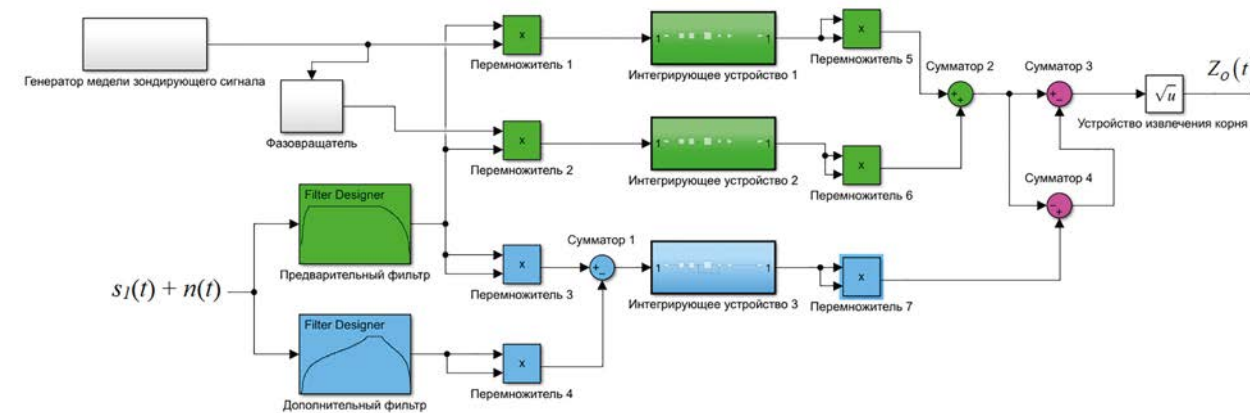


Рисунок 7 – Модель приемного устройства первичной обработки сигналов на основе обобщенного обнаружителя сигналов

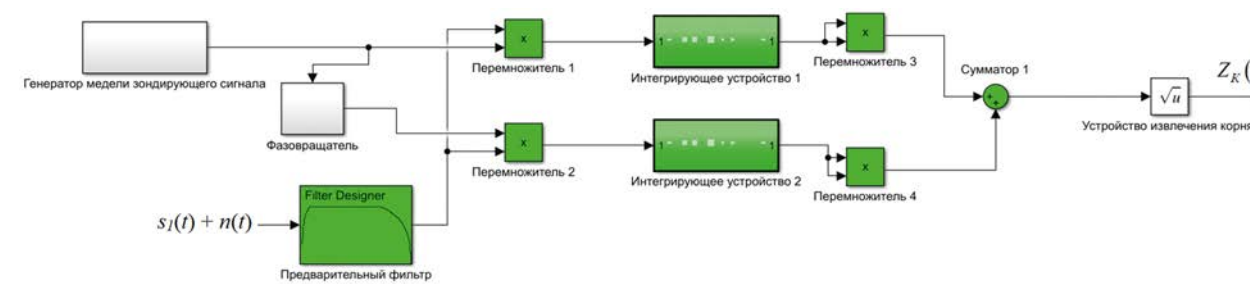


Рисунок 8 – Модель приемного устройства первичной обработки сигналов на основе корреляционного обнаружителя сигналов

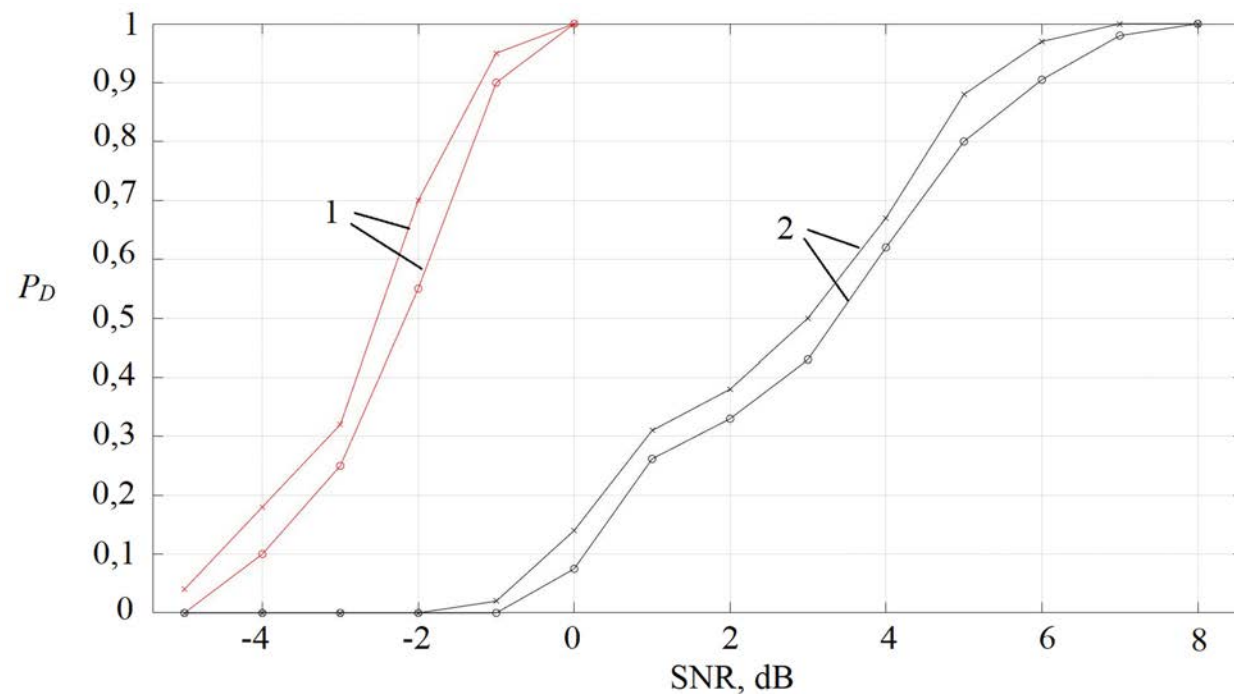


Рисунок 9 – Характеристики обнаружения обобщенного (1) и корреляционного (2) обнаружителей при вероятности ложной тревоги $P_f = 10^{-3}$:
 —○— — ЛЧМ импульс; —×— — ФЧМ импульс

случай был рассмотрен в работах [6, 8, 9]. На выходе приемного устройства наблюдается решающая статистика.

Характеристики обнаружения сигналов при вероятности ложной тревоги $P_f = 10^{-3}$, полученные при моделировании представлены на рисунке 9.

Из рисунка 9 видно, что при вероятности правильного обнаружения $P_D = 0,9$ обобщенный обнаружитель обеспечивает выигрыш 6,5 дБ по сравнению с корреляционным обнаружителем при обнаружении радиоимпульса с модуляцией фазы кодом Фрэнка, а при линейной частот-

ной модуляции выигрыш равен 7 дБ.

Заключение

Применение импульсных сигналов с линейной частотной модуляцией при заданных условиях моделирования позволяет получить разрешающую способность РЛС по дальности до воздушного объекта 1,5 метра, что на 73,5 метра лучше по сравнению с применением импульсных сигналов с модуляцией фазы кодом Фрэнка. Однако, если задать одинаковую базу рассматриваемых сигналов, например $B = 64$, разрешающая

способность РЛС по дальности до воздушного объекта при использовании импульсного сигнала с модуляцией фазы кодом Фрэнка составит 75 метров, а при использовании импульсных сигналов с линейной частотной модуляцией – 117,2 метра, что на 42,2 метра хуже.

Использование обобщенного обнаружителя в радиолокационных системах позволяет обеспечивать более эффективные характеристики РЛС по сравнению с использованием корреляционного обнаружителя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шахтарин, Б. И. Обнаружение сигналов : учебное пособие / Б. И. Шахтарин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2015. – 464 с.
2. Радиолокационные системы : учебник / под общ. ред. В. П. Бердышева. – Красноярск : Сиб.Фед. ун-т, 2012. – 400 с.
3. Елагина, К. А. Алгоритм обнаружения некогерентной пачки импульсов в условиях воздействия несинхронных импульсных помех и сигналов / К. А. Елагина, И. Ф. Лозовский // Материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем», Ульяновск, 22–23 сентября 2011 г. – С. 43–46.
4. Елагина, К. А. Обнаружение некогерентной пачки импульсов в условиях воздействия отражения от «ангелов» и несинхронных сигналов / К. А. Елагина, И. Ф. Лозовский // Материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем», Ульяновск, 22–23 сентября 2011 г. – С. 46–49.
5. Дудник, П. И. Многофункциональные радиолокационные системы / Под ред. Б. Г. Татарского. – М. : Дрофа, 2007. – 283 с.
6. Tuzlukov V. P., Signal Detection Theory. – New York, Springer-Verlag. USA. – 2001. – 744 p.
7. Tuzlukov V. P., Signal Processing in Radar Systems. – Boca Raton, London, New York, Washington, DC. USA. – 2012. – 632 p.
8. Shbat, M. S. Evaluation of Detection Performance under Employment of the Generalized Detector in Radar Sensor Systems / M. S. Shbat, V. P. Tuzlukov // Radioengineering, – 2014. – Vol. 23, № 1. – PP. 50–65.
9. Shbat, M. S. Definition of Adaptive Detection Threshold under Employment of the Generalized Detector in Radar Sensor Systems / M. S. Shbat, V. P. Tuzlukov // IET Signal Processing, – 2014. – Vol. 8, Issue 6. – PP. 622–632.

REFERENCES

1. Shakhtarin, B. I. Signal Detection: A Study Guide by B. I. Shakhtarin. – M. : Hotline – Telecom, 2015. – 464 p.
2. Radar systems: textbook / Editor V. P. Berdyshev. – Krasnoyarsk: Sib.Fed. un-t, 2012. – 400 p.
3. Elagina, K. A. Algorithm for detecting an incoherent burst of pulses under the influence of non-synchronous impulse noise and signals / K. A. Elagina, I. F. Lozovsky // Proceedings of the VII All-Russian. scientific-practical. conf. "Modern problems of creation and operation of radio engineering systems", Ulyanovsk, September 22–23, 2011 – P. 43–46.
4. Elagina, K. A. Detection of an incoherent burst of pulses under the influence of reflection from "angels" and non-synchronous signals / K. A. Elagina, I. F. Lozovsky // Proceedings of the VII All-Russian. scientific-practical. conf. "Modern problems of the creation and operation of radio engineering systems", Ulyanovsk, September 22–23, 2011 – P. 46–49.
5. Dudnik, P. I. Multifunctional radar systems / Ed. B. G. Tatarsky. – M. : Drofa, 2007. – 283 p.
6. Tuzlukov V. P., Signal Detection Theory. – New York, Springer-Verlag. USA. – 2001. – 744 pages.
7. Tuzlukov V. P., Signal Processing in Radar Systems. – Boca Raton, London, New York, Washington, DC. USA. – 2012. – 632 pages.
8. Shbat, M. S. Evaluation of Detection Performance under Employment of the Generalized Detector in Radar Sensor Systems / M. S. Shbat, V. P. Tuzlukov // Radioengineering, – 2014. – Vol. 23, № 1. – PP. 50–65.
9. Shbat, M. S. Definition of Adaptive Detection Threshold under Employment of the Generalized Detector in Radar Sensor Systems / M. S. Shbat, V. P. Tuzlukov // IET Signal Processing, – 2014. – Vol. 8, Issue 6. – PP. 622–632.

Статья поступила в редакцию 15.10.2022

УДК 681.513.66+681.513.7

К. В. ТЕРЕЩЕНКО, А. Г. КАПУСТИН

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНОЙ НА ОСНОВЕ ПРАВИЛ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Ксения Валерьевна Терещенко – магистрант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь [kokovita13@gmail.com](mailto:kakovita13@gmail.com)

Ksenia Tereshchenko – undergraduate educational institution of higher education Belarusian State Academy of Aviation [kokovita13@gmail.com](mailto:kakovita13@gmail.com)

Александр Григорьевич Капустин – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры общеобразовательных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь kapustin2649@mail.ru

Alexander Kapustin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of General Education Disciplines educational institution of higher education Belarusian State Academy of Aviation kapustin2649@mail.ru

Аннотация: в работе описаны особенности имитационного моделирования системы управления с адаптивным нечетким регулятором, содержащей объект управления, блок адаптации и нечеткий регулятор. Выполнена оценка качества регулирования адаптивного нечеткого регулятора при управлении электрической машиной, работающей при различной величине оборотов и сопротивлении якоря.

Ключевые слова: нечеткая адаптивная система, адаптивная система, правила регулирования, имитационное моделирование.

Annotation: the paper describes the features of simulation modeling of a control system with an adaptive fuzzy controller, containing a control object, an adaptation block and a fuzzy controller. The evaluation of the quality of regulation of an adaptive fuzzy controller in the control of an electric machine operating at different speeds and armature resistance is carried out.

Keywords: adaptive fuzzy controller, adaptive system, rules of fuzzy logic, simulation of the modeling.

В работе предложен подход к разработке адаптивной системы с эталонной моделью с учетом решения следующих вопросов: вопрос планирования действий (система управления должна не просто реагировать на текущую ситуацию, но и прогнозировать последовательность действий, которые должны привести к намеченной цели); вопрос обучения на опыте своего взаимодействия с внешней средой (данная проблема включает не только вопросы обучения отдельной форме поведения, но и вопросы обучения взаимодействию между различными формами поведения); вопрос универсальности (системы управления различными объектами должны следовать единым принципам управления и основываться на единой модели).

Свойства разработанной адаптивной системы исследованы во временной и частотной областях при помощи среды *Matlab* [1–3].

Анализ текущего состояния дел в области разработки автономных адаптивных систем управления позволяет выделить следующие основные проблемы, с которыми сталкиваются разработчики подобных систем:

1. Проблема координации различных форм поведения объектов и организации взаимодействия между ними.
2. Проблема планирования действий. Система управления должна не просто реагировать на текущую ситуацию, но и прогнозировать последовательность действий, которые должны привести к намеченной цели.

3. Проблема обучения на опыте своего взаимодействия с внешней средой. Данная проблема включает не только вопросы обучения отдельной форме поведения, но и вопросы обучения взаимодействию между различными формами поведения.

4. Проблема формирования новых типов поведения. Система управления должна уметь самостоятельно формировать новые типы поведения, направленные на достижение новых целей, и включать их в общую структуру контроля.

5. Проблема универсальности. Системы управления различными объектами должны следовать единым принципам управления и основываться на единой модели.

Существующие на данный момент подходы к построению систем управления решают только

некоторые из вышеперечисленных проблем. Какие-либо общие и достаточно универсальные модели, которые бы решали все указанные проблемы, в настоящее время так и не предложены [1].

В работе предложен подход к разработке адаптивной системы с эталонной моделью с учетом требований 2, 3, 5. Свойства разработанной адаптивной системы исследованы во временной и частотной областях при помощи среды *Matlab*.

Перспективными воздушными судами называют «полностью электрические самолеты», разрабатываемые по концепции *All electric aircraft*. Эта концепция предполагает замену всех видов энергии на борту самолета (пневмо-, гидро- и др.) только на электрическую энергию. Реализация данной концепции связана с разработкой новых принципов построения бортовых систем воздушных судов, взаимодействующих в реальном масштабе времени под управлением бортовых компьютеров. Создавать такие системы целесообразно используя искусственный интеллект, например, нечеткую логику (*Fuzzy-регуляторы*) [1, 3, 4].

Нечеткая логика – набор нестрогих правил, созданных для регулирования выходного сигнала в заданных пределах, исходя из постоянно меняющихся входных данных. Законы нечеткой логики могут работать и обеспечивать заданное качество процессов управления при любых режимах работы систем авионики с помощью специфических (специальных) алгоритмов типа нечетких (*fuzzy logic*), способных к обучению и самообучению (на основе искусственных нейронных сетей) [2, 3].

Интеллектуальные системы регулирования (управления) применяются при управлении сложными объектами с плохо изученной динамикой, условия работы которых существенно непостоянны (дрейф параметров, изменение характеристик объекта управления и среды эксплуатации). В таких условиях обыкновенные (неадаптивные) системы управления неработоспособны, либо работают неудовлетворительно, требуя постоянного квалифицированного наблюдателя.

На современном этапе интеллектуальные системы оценивают как «разумные» системы, оптимизирующие процессы управления

сложными объектами в нестационарных состояниях и неизвестной среде эксплуатации. В перспективных системах авионики такими объектами являются системы электропривода, системы регулирования напряжения, электрические машины, асинхронизированный электропривод и др. В настоящее время в большинстве систем авионики используются линейные законы управления, которые эффективны только при определенном режиме работы. Поэтому такие регуляторы исчерпали свои возможности корректного и эффективного регулирования работы современных систем авионики [1].

Виртуальная модель ДПТ НВ (двигатель постоянного тока независимого возбуждения) в программе *Matlab* представлена на рисунке 1 и состоит из блока с заданными передаточными функциями *Transfer Fcn* и усилителей *Gain*. На вход модели подается постоянное напряжение: 27, 270 и 540 В. Число оборотов при запуске равно 800 об/мин, через 0,2 с оно возрастает до 1 200 об/мин. Данные параметры задаются внешним блоком *Step*.

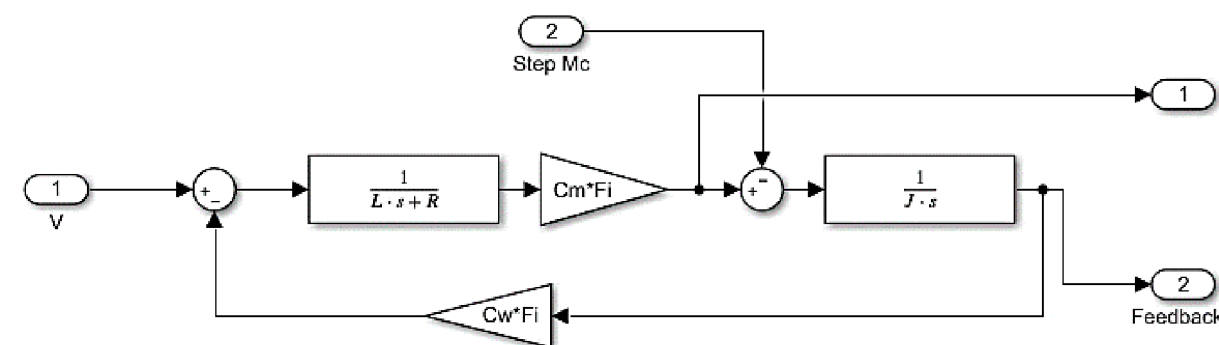


Рисунок 1 – Виртуальная модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в программе *Matlab*

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

- V – напряжение, подаваемое на двигатель (27, 270 и 540 В);
- L – индуктивность (0,001 Гн);
- R – активное сопротивление (0,1 Ом);
- C_w – коэффициент связи между скоростью и ЭДС (10);
- C_m – коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом (10);

- J – суммарный момент инерции якоря и нагрузки (10 кг·м²);
- F_i – произведение потока, создаваемого обмоткой возбуждения и током якоря (1);
- $Step Mc$ – блок, реализующий момент сопротивления движению, через него задается скорость вращения (800 и 1 200 об/мин);
- $Feedback$ – блок, реализующий обратную связь, сигнал подается на регулятор.

Данная модель позволяет выполнять имитационное моделирование режимов работы двигателя при различных управляющих воздействиях и возмущениях. Адаптивная система – это система, которая автоматически изменяет алгоритм своей работы, иногда может изменять свою структуру для достижения оптимального состояния при изменении внешних условий [5].

Адаптивный контур регулирования представлен на рисунке 2, а общая схема ДПТ НВ с адаптивным нечетким управлением на рисунке 3.

Адаптивный контур (рисунки 2, 3) реализуется с помощью следующих блоков:

V – напряжение, подаваемое на двигатель (27, 270 и 540 В);

Feedback – блок, реализующий обратную связь. Сигнал подается с ДПТ НВ;

Fuzzy Logic Controller – блок, содержащий правила нечеткой логики.

Смысл адаптивного контура состоит в обработке и сравнении сигнала обратной связи с выхода ДПТ НВ и входного напряжения, пропускания полученной разницы сигналов через блок нечеткого регулирования (в данном блоке происходит уменьшение ошибки регулирования согласно правилам) и дальнейшем преобразовании через цепь блоков для уменьшения производной ошибки по времени (улучшение быстродействия) [5–9].

Исследование эффективности работы нечеткого адаптивного кон-

тура проводилось при изменении напряжения на обмотке возбуждения (27, 270, 540 В), изменении сопротивления обмотки якоря R , при фиксированных оборотах вала двигателя 800 и 1 200 об/мин. Результаты исследований анализировались во временной и частотной областях (таблицы 1–4, рисунки 4–9). Имитационное моделирование выполнялось в среде *Matlab*.

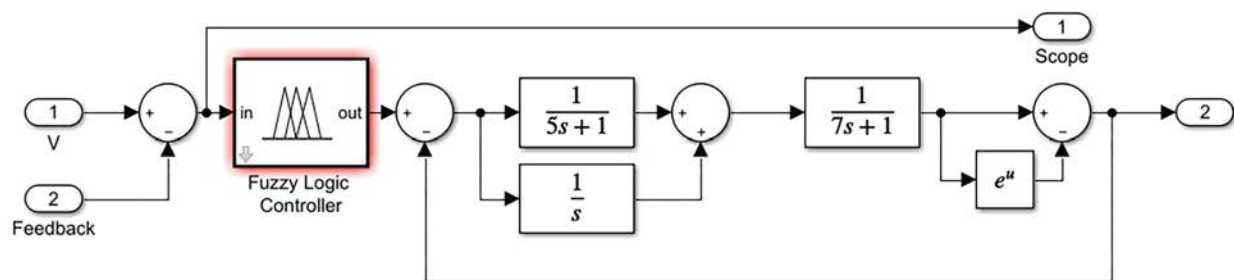


Рисунок 2 – Схема адаптивного контура с нечеткой логикой в среде *Matlab*

Таблица 1 – Графики напряжения, регулирующего воздействия и оборотов двигателя при напряжениях 27 В, 270 В и 540 В

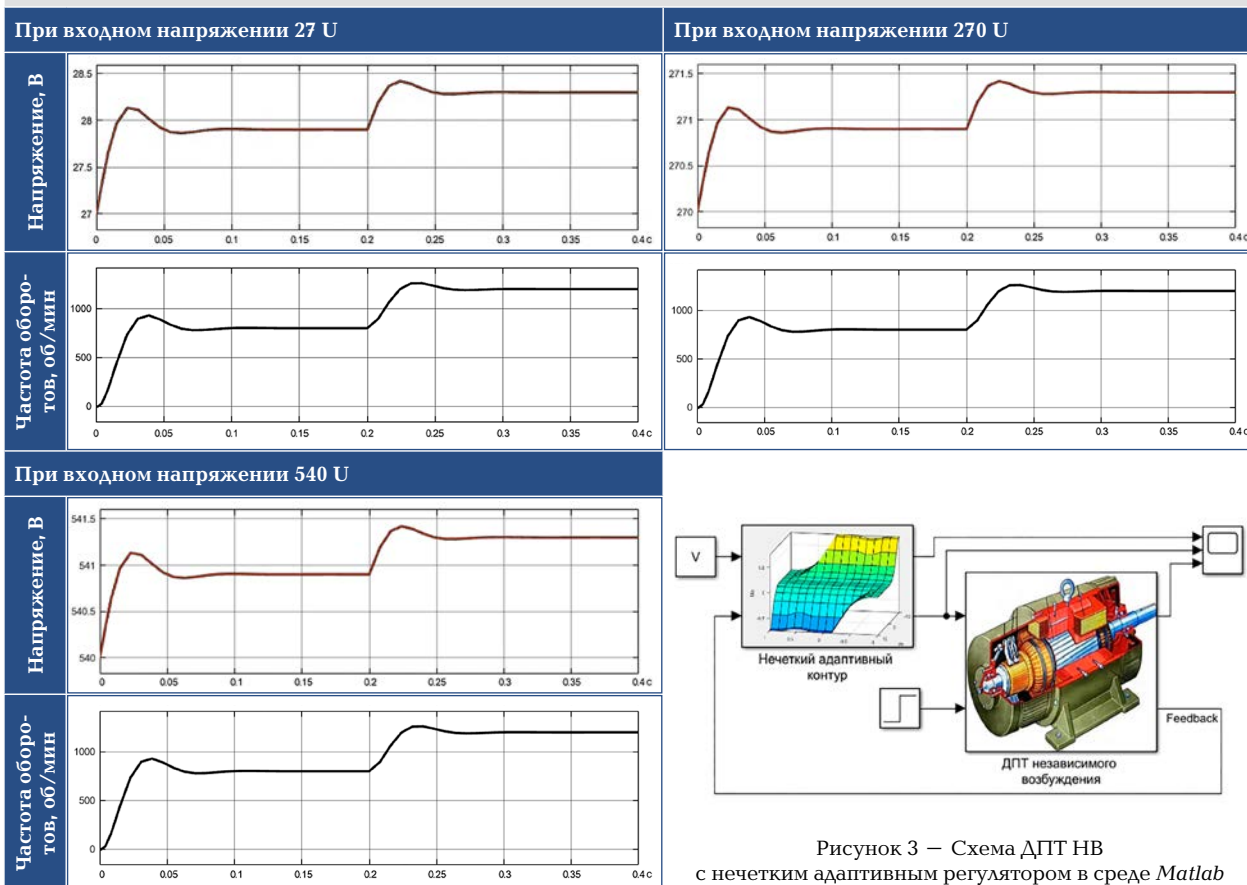


Рисунок 3 – Схема ДПТ НВ с нечетким адаптивным регулятором в среде *Matlab*

Таблица 2 – ДПТ НВ при частоте 800 об/мин

Напряжение	Характеристика напряжения			Характеристика оборотов		
	Величина перерегулирования	Разница амплитудных значений	Время регулирования	Величина перерегулирования	Разница амплитудных значений	Время регулирования
27 U	0,82	28,13	0,075	17	936,0261	0,1
270 U	0,08	271,10	0,075	17	936,0261	0,1
540 U	0,03	541,10	0,075	17	936,0261	0,1

Таблица 3 – ДПТ НВ при частоте 1 200 об/мин

Напряжение	Характеристика напряжения			Характеристика оборотов		
	Величина перерегулирования	Разница амплитудных значений	Время регулирования	Величина перерегулирования	Разница амплитудных значений	Время регулирования
27 U	1,17	28,63	0,8	17	1405,0863	0,1
270 U	0,11	271,60	0,8	17	1405,0863	0,1
540 U	0,05	541,60	0,8	17	1405,0863	0,1

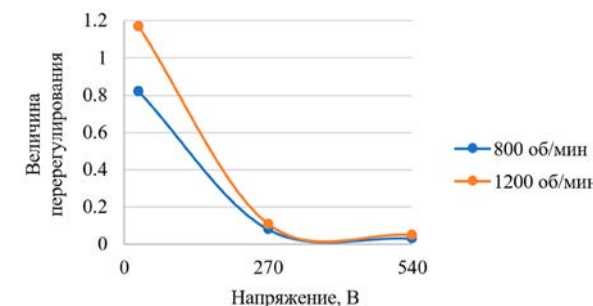


Рисунок 4 – График величины перерегулирования при изменении напряжения 27 – 540 В и частоте 800 – 1 200 об/мин

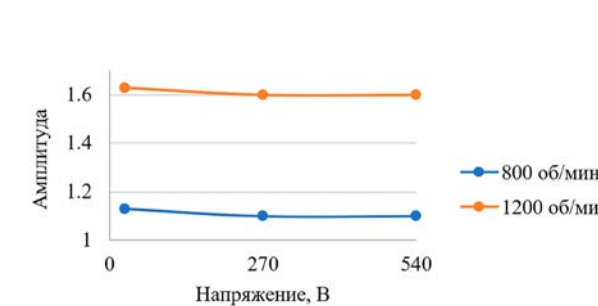


Рисунок 5 – График разницы амплитудных значений при изменении напряжения 27 – 540 В и частоте 800 – 1 200 об/мин

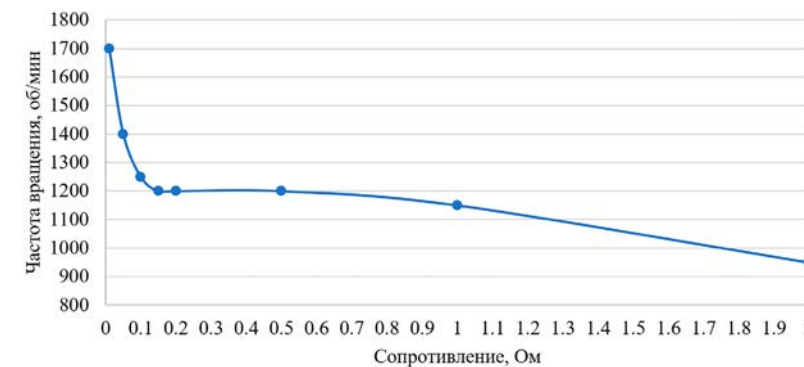


Рисунок 6 – График зависимости изменения частоты вращения при изменении сопротивления R

Согласно таблицам 1–3 можно сделать следующие выводы:

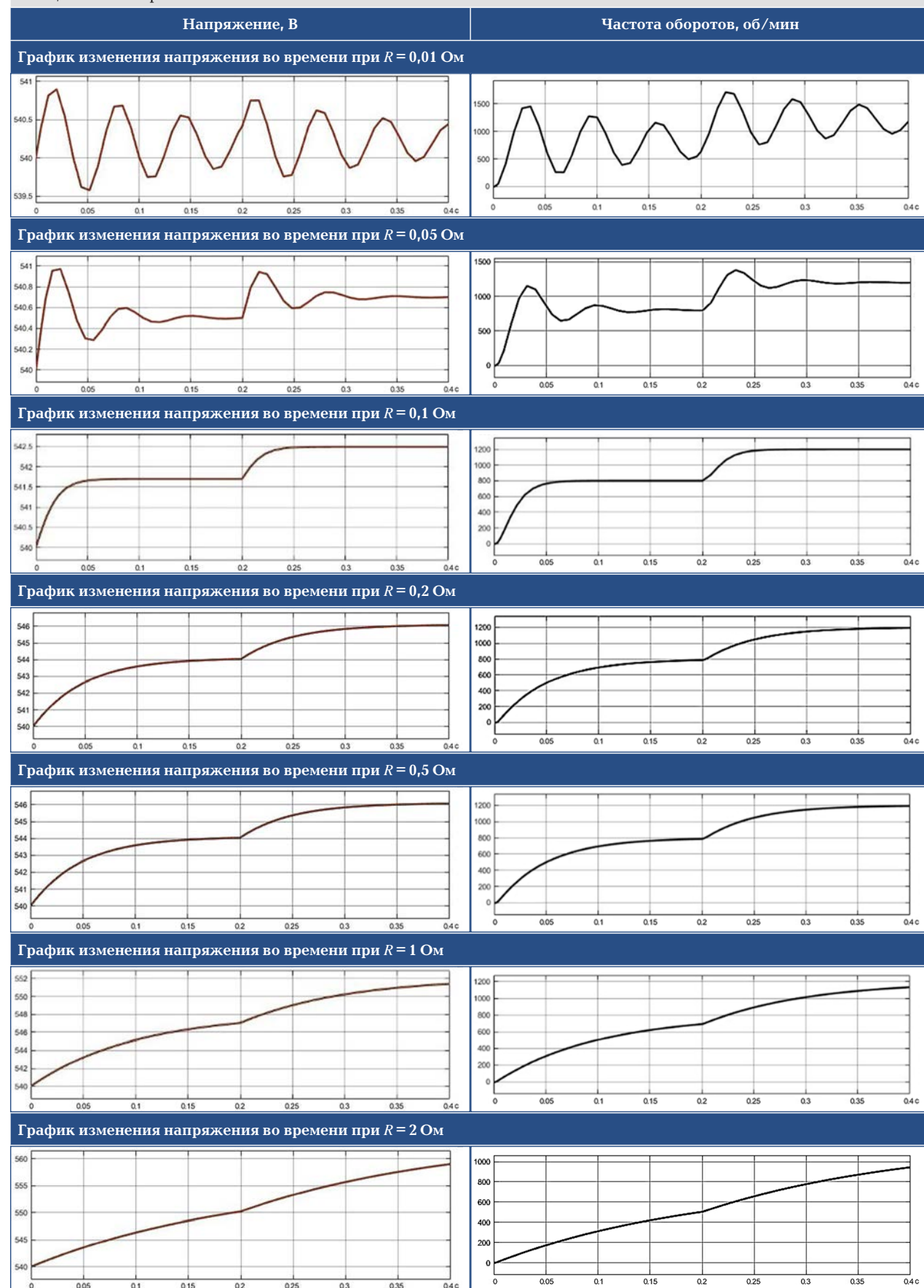
- величина перерегулирования уменьшается с увеличением входного напряжения, частота оборотов не имеет существенного влияния;

- время регулирования постоянно и не изменяется при повышении напряжения и оборотов;

- разница амплитудных значений при повышении напряжения находится в допустимых пределах погрешности $\pm 5\%$;

Для исследования качества работы адаптивного нечеткого контура изменим сопротивление якоря R в пределах от 0,01 до 2 Ом. Графики исследования приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Графики работы адаптивного нечеткого контура при изменении сопротивления, напряжение постоянно 540 В, частота оборотов 800 – 1 200 об/мин



При изменении сопротивления в пределах от 0,01 до 2 Ом естественным образом возрастает напряжение и достигает предельного значения в 560 В.

При значении 0,01 Ом частота оборотов не устанавливается из-за незатухающих колебаний, напряжение меняется в пределах 539,5 – 541 В.

При значении 0,05 Ом частота оборотов устанавливается без колебаний на 0,15 и 0,35 секундах для 800 и 1 200 об/мин соответственно, напряжение меняется в пределах 540 – 541 В с незначительными колебаниями.

При значении 0,1 Ом частота оборотов устанавливается без колебаний на 0,07 и 0,27 секундах для 800 и 1 200 об/мин соответственно, напряжение меняется в пределах 540 – 541,5 В.

При значении 0,15 Ом частота оборотов устанавливается без колебаний на 0,05 и 0,25 секундах для 800 и 1 200 об/мин соответственно, напряжение меняется в пределах 540 – 542 В.

При значении 0,2 Ом частота оборотов устанавливается без колебаний на 0,06 и 0,25 секундах для 800 и 1 200 об/мин соответственно, напряжение меняется в пределах 540 – 542,5 В.

При значении 0,5 Ом частота оборотов устанавливается без колебаний на 0,2 и 0,35 секундах для 800 и 1 200 об/мин соответственно, напряжение меняется в пределах 540 – 546 В.

При значении 1 Ом частота оборотов не устанавливается до значения 800 об/мин в течение 0,2 секунды и до 1 200 об/мин в течение 0,4 секунды, напряжение меняется в пределах 540 – 552 В.

При значении 2 Ом частота оборотов не устанавливается до значения 800 об/мин в течение 0,2 секунды и до 1 200 об/мин в течение 0,4 секунды, напряжение меняется в пределах 540 – 560 В.

Диапазон сопротивления 0,1 – 0,5 Ом является оптимальным для повышения качества работы ДПТ НВ (согласно рисунку 6), так как отсутствует колебательность, пе-

ререгулирование в допустимых пределах, максимальная величина ошибки составляет 1,5 %.

Качество работы адаптивного нечеткого контура было исследовано во временных, частотных и импульсных областях (рисунки 7 – 9), чтобы удостовериться в пределах оптимального диапазона сопротивления 0,1 – 0,5 Ом.

Согласно графикам (рисунки 7 – 9) можно сделать следующие выводы: время регулирования сокращается до 0,04 с, время отклика системы на дельта функцию уменьшается приблизительно в 1,35 – 1,52 раза (быстродействие увеличилось), запас устойчивости системы по амплитуде +20 – 10 дБ.

Заключение

Предварительные результаты исследования управления адаптивным нечетким контуром показывают его эффективность при управлении ДПТ НВ, работающими при различной величине оборотов и сопротивлении якоря.

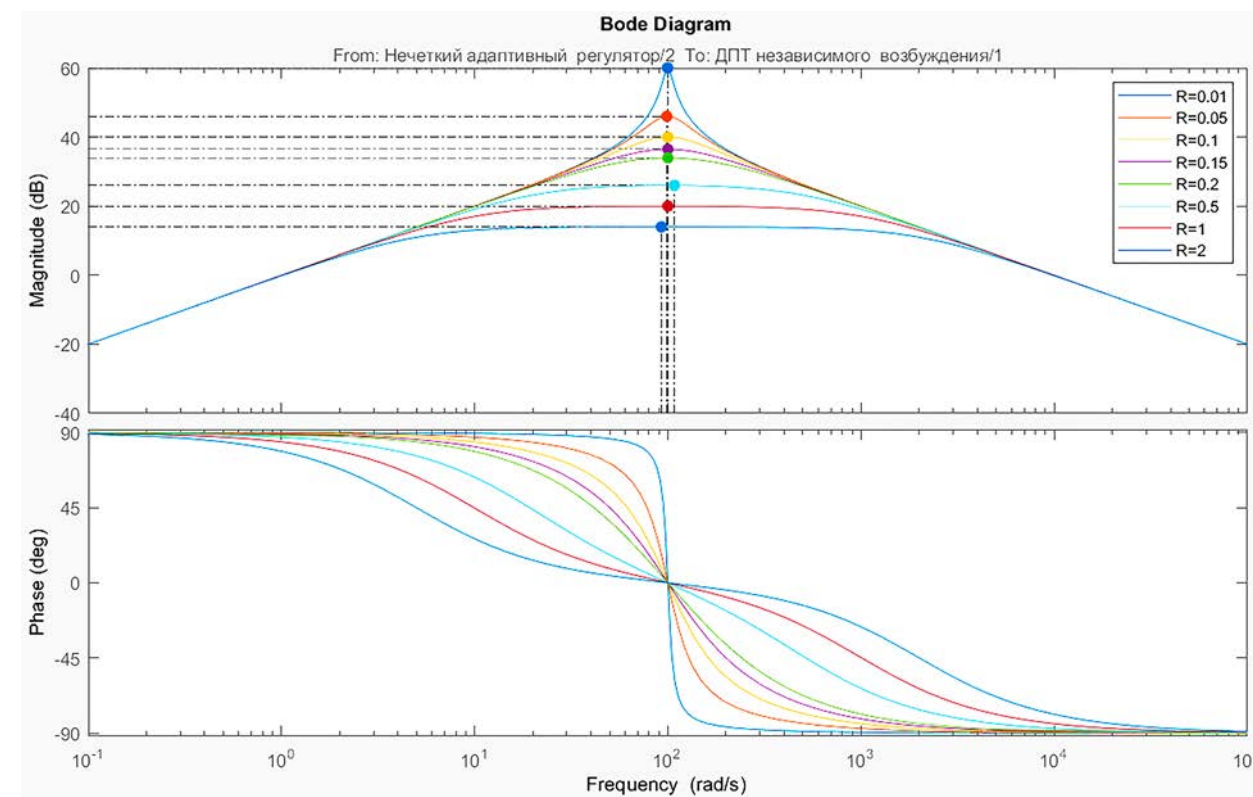


Рисунок 7 – АЧХ и ФЧХ характеристики при изменении сопротивления R (напряжение постоянно 540 В, частота оборотов 800 и 1 200 об/мин)

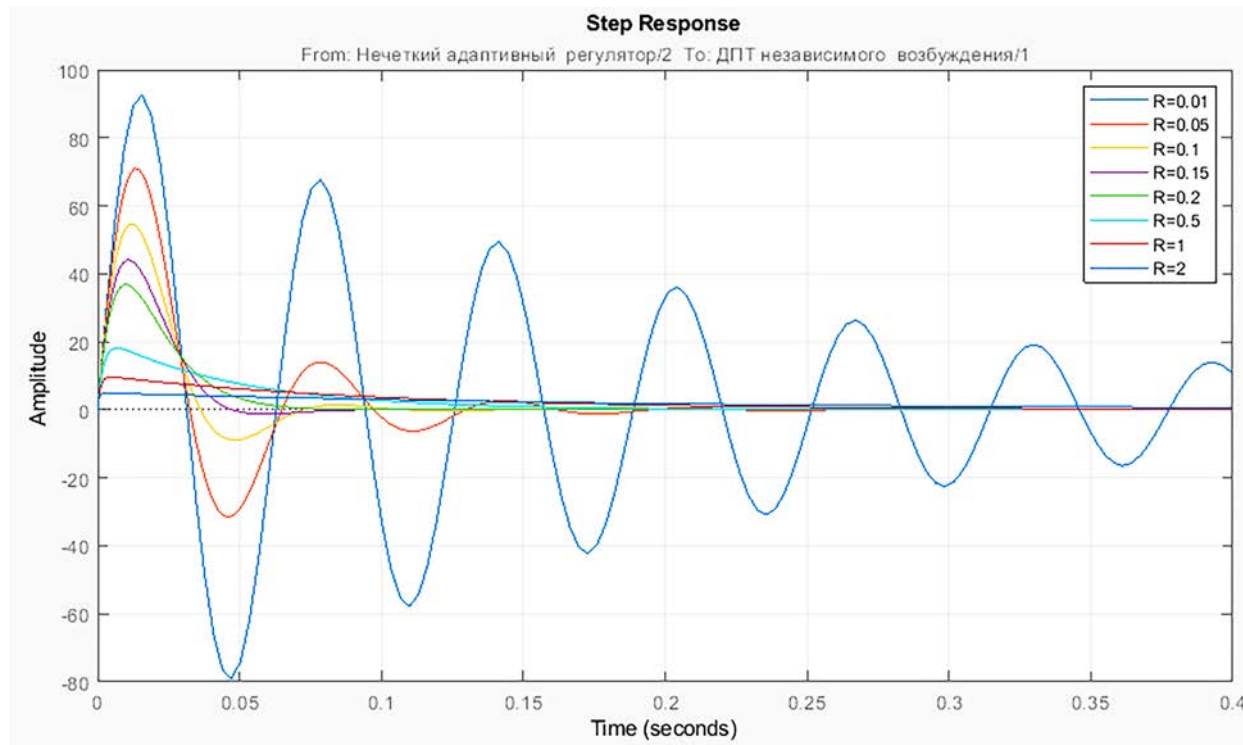


Рисунок 8 – Ступенчатые характеристики при изменении сопротивления R (напряжение постоянно 540 В, частота оборотов 800 и 1 200 об/мин)

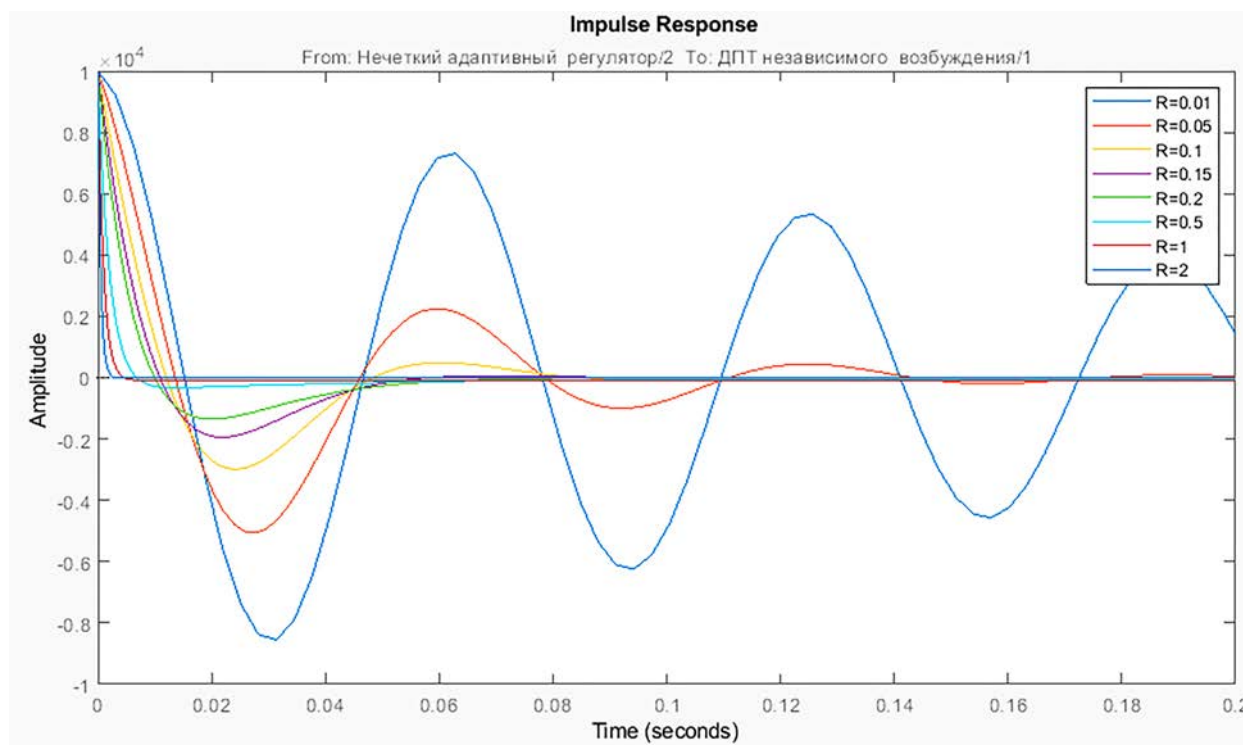


Рисунок 9 – Импульсные характеристики при изменении сопротивления R (напряжение постоянно 540 В, частота оборотов 800 и 1 200 об/мин)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Математическое обеспечение систем диагностирования канала генерирования авиационных систем электроснабжения / О. Г. Карачун, К. В. Терещенко, К. В. Бунас «Гагаринские чтения – 2019»: Сборник тезисов докладов. – Москва : МАИ, 2019. – С. 703.
2. Леоненков, А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А. Ю. Леоненков. – Санкт-Петербург : БХВ, 2003. – 720 с.
3. GotAI.NET [Электронный ресурс] / Введение в нечеткую логику и системы нечеткого управления / П. Баер, С. Новак, Р. Винклер. – Режим доступа: <http://www.gotai.net/documents/doc-l-fl-001.aspx>. – Дата доступа: 05.10.2022.
4. Tsiarshchanka K. Simulation of the aviation synchronous generator with a fuzzy logic controller in the matlab / Proceedings of International scientific conference "Universum N VI". Morrisville, Lulu Press., 2019. P. 9–13.
5. Рутковский, В. Ю. Физически реализуемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью / В. Ю. Рутковский, В. М. Глумов, В. М. Суханов: Автоматика и телемеханика. – Москва, 2011. – №8. – С. 96–108.
6. Земляков, С. Д. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности / С. Д. Земляков, В. Ю. Рутковский: Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 10. – С. 35–44.
7. Маслолюбов, Ю. П. Введение в Neural Network Toolbox / Ю. П. Маслолюбов / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book1/index.php>. – Дата доступа: 05.10.2022.
8. Терещенко, К. В. Адаптивная система с эталонной моделью для управления объектами электропривода / Международный сборник научных трудов молодых ученых, докторантов, магистрантов и студентов / под науч. ред. Ш. А. Курманбаевой. – Семей: КазГЮИУ, 2019 – №6. – С. 178–181.
9. Терещенко, К. В. Адаптивная система с эталонной моделью для управления объектами электропривода / Молодежь в науке: Новые аргументы [Текст]: IV Международный молодежный сборник научных статей (Россия, г. Липецк, 26 апреля 2019 г.). Часть I / Отв. ред. А. В. Горбенко. – Липецк : Научное партнерство «Аргумент», 2019. – С. 35–40.

REFERENCES

1. Mathematical support of systems for diagnosing the generation channel of aviation power supply systems [in Russian] / O. G. Karachun, K. V. Tsiarshchenko, K. V. Bunas "Gagarin's readings" – 2019": Collection of abstracts. – Moscow : MAI, 2019. – P. 703.
2. Leonenkov, A. Yu. Fuzzy modeling in Matlab and fuzzyTech [in Russian] / A. Yu. Leonenkov. – St. Petersburg : BHV, 2003. – 720 p.
3. GotAI.NET [Electronic resource] / Introduction to fuzzy logic and fuzzy control systems [in Russian] / P. Baer, S. Novak, R. Winkler. – Access mode: <http://www.gotai.net/documents/doc-l-fl-001.aspx>. – Date of access: 05.10.2022.
4. Tsiarshchenko K. Simulation of the aviation synchronous generator with a fuzzy logic controller in the matlab / Proceedings of International scientific conference "Universum N VI". Morrisville, Lulu Press., 2019. P. 9–13.
5. Rutkovsky, V. Yu. Physically realizable adaptive control algorithm with a reference model [in Russian] / V. Yu. Rutkovsky, V. M. Glumov, V. M. Sukhanov: Automation and telemechanics. – Moscow, 2011. – No. 8. – 96–108 p.
6. Zemlyakov, S. D. Algorithm for the functioning of an adaptive system with a reference model that guarantees a given dynamic accuracy of control of a non-stationary dynamic object under uncertainty [in Russian] / S. D. Zemlyakov, V. Yu. Rutkovsky: Automation and telemechanics. – 2009. – No. 10. – 35–44 p.
7. Maslolyubov, Yu. P. Introduction to the Neural Network Toolbox / Yu. P. Maslolyubov / [Electronic resource]. – Access mode: <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book1/index.php>. – Date of access: 05.10.2022.
8. Tsiarshchenko, K. V. Adaptive system with a reference model for controlling electric drive objects [in Russian] / International collection of scientific papers of young scientists, doctoral students, undergraduates and students / under scientific. ed. Sh. A. Kurmanbayeva. – Semey: KazHUIU, 2019 – No. 6. – P. 178–181.
9. Tsiarshchenko, K. V. An adaptive system with a reference model for controlling electric drive objects [in Russian] / Youth in Science: New Arguments [Text]: IV International Youth Collection of Scientific Articles (Russia, Lipetsk, April 26, 2019). Part I / Rev. ed. A. V. Gorbenko. – Lipetsk: Scientific partnership "Argument", 2019. – P. 35–40.

Статья поступила в редакцию 01.11.2022

УДК 629.7.05

А. А. ШЕЙНИКОВ, В. А. МАЛКИН,
А. А. САНЬКО, Л. А. ИВАНИЦКИЙ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОШИБОК ВЫСОТОМЕРА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА БАЗЕ СТЕРЕОСИСТЕ- МЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Шейников Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент, военнослужащий учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь
af.varb.ao@gmail.ru

Aleksei Sheinikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Serviceman of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus
af.varb.ao@gmail.ru

Малкин Виталий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры авиационных радиоэлектронных систем авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь
min.777.144@mail.ru

Vitaliy Malkin – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Aviation Radio-Electronic Systems of the Aviation Faculty of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus

Санько Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, военнослужащий учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
min.777.144@mail.ru

Andrey Sanko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Serviceman of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
min.777.144@mail.ru

Иваницкий Леонид Александрович – магистр технических наук, военнослужащий учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь
leonid210785@mail.ru

Leonid Ivanitski – Master of Technical Sciences, Serviceman of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus
leonid210785@mail.ru

Аннотация: в статье представлена математическая модель измерителя истинной высоты полета беспилотного летательного аппарата на базе бортовой системы технического зрения, включающей две цифровые камеры, разнесенные по базе. Приведены результаты имитационного моделирования и результаты расчетов точности предлагаемого измерителя истинной высоты полета. По результатам натурного эксперимента доказана адекватность разработанной математической модели. Показана эффективность применения оптико-электронной системы измерения истинной высоты полета в перспективных автономных навигационных комплексах беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: измеритель истинной высоты полета, стереосистема технического зрения, фотограмметрия, погрешность оценки расстояния до подстилающей поверхности.

Annotation: the article presents a mathematical model of errors of an unmanned aerial vehicle true altitude meter based on an onboard vision system that includes two digital cameras spaced around the base. The results of simulation modeling and the results of calculations of the accuracy of the proposed true flight altitude meter are presented. Based on the results of a full-scale experiment, the adequacy of the developed mathematical model was proved. The effectiveness of the use of an optical-electronic system for measuring the true flight altitude in promising autonomous navigation systems for unmanned aerial vehicles is shown.

Keywords: true flight altitude meter, vision stereo system, photogrammetry, error in estimating the distance to the underlying surface.

Введение

Перспективным автономным датчиком пилотажно-навигационной информации (ПНИ) на борту беспилотного летательного

аппарата (БЛА) является система технического зрения (СТЗ). При наличии специального алгоритмического обеспечения, СТЗ, включающая вычислитель и систему бортовых цифровых камер (БЦК),

разнесенных по базе, может реализовывать те же функции, что и бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС): счисление углов ориентации, скоростных параметров, коор-

динат БЛА (определение значений перечисленных параметров методами сопровождения особых точек (ОТ) [1] на потоке видеоданных) [2], а также истинной высоты полета (ИВП) БЛА (определение дальности до подстилающей сцены фотограмметрическим способом путем обработки цифровых изображений (ЦИ) стереопары) [3]. Причем, для малоразмерных тактических (МТ) БЛА характерно жесткое закрепление БЦК в корпусе носителя, что обуславливает соответствие его динамики и эволюций датчика изображений (светочувствительной матрицы БЦК), которые можно описать методами проективной геометрии [4]. В связи с тем, что СТЗ является стохастической системой [5], реализация ее потенциала по точности оценки пилотажно-навигационных параметров полета (ПНПП) возможна в случае комплексирования с другими бортовыми датчиками ПНИ, работающими на других физических принципах (прежде всего с БИНС), и также представляющими собой стохастические измерительные системы [6]. Соответственно, при анализе рассматриваемого датчика ПНИ для целей последующего синтеза мультисенсорного навигационного комплекса (МСНК) БЛА, целесообразно использовать стохастическую математическую модель СТЗ. Главным фактором, определяющим применимость СТЗ в МСНК МТБЛА, является точность измерения ИВП. В случае низкого значения этого параметра счисление координат и скоростных параметров БЛА по видеоданным становится нецелесообразным. На точность рассматриваемого датчика ИВП основное влияние оказывают следующие факторы: погрешности самого датчика, случайные перепады рельефа местности и случайные смещения оптической оси БЦК (обусловленные случайной динамикой носителя в турбулентной атмосфере) [7]. Что касается собственных погрешностей оптико-электронной стереосистемы измерения ИВП (ОЭСИВ), то следует отметить, наиболее существенные из них: ошибки квантования, зависящие в общем случае от высоты полета БЛА, размера базы (расстояния между БЦК), размера пикселей светочувствительной матрицы (СЧМ) БЦК и фокусного

расстояния БЦК [8], а также ошибки, обусловленные вероятностным характером результатов работы алгоритмов технического зрения (обнаружение ложных соответствий при идентификации пар особых точек на смежных снимках – «выбросов» [2]). Кроме этого, характеристики ОЭСИВ могут накладывать ограничения на максимальную и минимальную высоту автоматического полета БЛА. Следует также отметить, что ОЭСИВ является дискретной системой, так как требует определенного времени на обработку информации, зарегистрированной БЦК в очередной точке маршрута, а частота обновления данных меньше частоты анализируемого процесса изменения ИВП БЛА.

Постановка задачи

Разработать стохастическую математическую модель (ММ) ОЭСИВ. Провести анализ влияния основных факторов на точность измерений истинной высоты и на диапазон измерений. Оценить возможность применения ОЭСИВ в МСНК БЛА. Начальные условия

для решения задачи: в качестве носителя выбран МТБЛА самолетного типа нормальной аэродинамической схемы; БЛА выполнят прямолинейный горизонтальный полет; ОЭСИВ состоит из вычислителя и двух БЦК, разнесенных по базе; БЦК располагаются на законцовках крыла БЛА (размер базы равен размаху крыла); БЦК жестко закреплены в фюзеляже БЛА; БЦК установлены в надири; точки закрепления БЦК в боковой проекции, соответствуют центру масс БЛА; БЦК абсолютно идентичны; БЦК информационно взаимосвязаны через вычислитель СТЗ (имеется возможность совместной обработки стереопары, сделанной двумя БЦК в один и тот же момент времени), распознавание и идентификация ОТ происходит мгновенно.

Предварительный теоретический анализ

На рисунке 1 представлена схема измерения ИВП с помощью ОЭСИВ. Точки A', A, C, O_1 и точки B', B, D, O_2 лежат на оптических осях соответствующих БЦК.

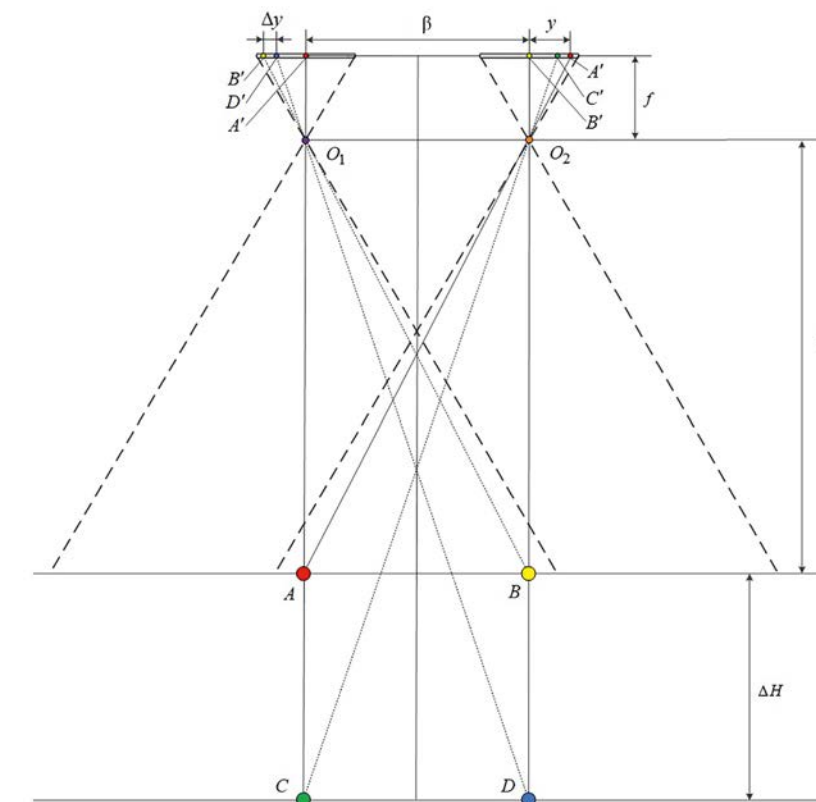


Рисунок 1 – Схема измерения ИВП с помощью ОЭСИВ

Точки A', B', C', D' являются проекциями точек A, B, C, D на СЧМ БЦК и представляют собой ОТ, используемые при определении ИВП БЛА. Априорной информацией при измерении ИВП H предлагаемым способом являются значения расстояния между БЦК (базы) β и фокусного расстояния БЦК f . В идеальных условиях ИВП H можно оценить по значению расстояния y между ОТ A' и B' (A' и D' ; B' и C') на СЧМ БЦК, а изменение ИВП ΔH по значению расстояния Δy между точками B' и D' (A' и C'):

$$H = \frac{\beta f}{y}, \quad y = \frac{\beta f}{H}, \quad (1)$$

$$\Delta H = \frac{\beta f \Delta y}{y(y - \Delta y)}, \quad \Delta y = \frac{\beta f \Delta H}{H(H + \Delta H)}. \quad (2)$$

Из анализа формул (1) и (2) следует, что диапазон измеря-

емых высот $[H_{\min} \dots H_{\max}]$ (H_{\min} , H_{\max} – минимальное и максимальное измеряемое значение ИВП, соответственно) ограничен возможностями ОЭСИВ и зависит от размаха крыла БЛА β , фокусного расстояния БЦК f , разрешающей способности СЧМ $M = \frac{1}{2p}$ (p – размер пикселя) и ширины СЧМ БЦК $l = np$ (n – количество пикселей, укладываемое в ширину СЧМ):

$$H_{\min} = \frac{2\beta f_{\min}}{np}, \quad H_{\max} = \frac{\beta f_{\max}}{2p}. \quad (3)$$

Чувствительность БЦК к изменению ИВП зависит от текущей высоты полета БЛА, и характеристик системы БЦК:

$$\Delta H_H = \frac{2pH^2}{\beta f - 2pH}. \quad (4)$$

Разработчики БЛА стремятся обеспечить высокое значение максимальной высоты полета. С другой стороны, для бортовых МСНК, включающих СТЗ, критически важным является наличие видимости подстилающей поверхности. В качестве основного препятствия при этом выступает облачность. В связи с тем, что нижнее основание облаков обычно не опускается ниже 600 м [9], в качестве «потолка» для БЛА с ОЭСИВ целесообразно принять это значение. Из формулы (4) видно, что высокую точность измерения ИВП можно обеспечить при максимальных значениях β , f и минимальном значении p .

В то же время слишком большое увеличение значений β , f или уменьшение p может привести к значительному росту размеров «слепой зоны» ОЭСИВ на малых высотах (3). В качестве приемлемого размера «слепой зоны» можно выбрать высоту, соответствующую по значению погрешности датчика ИВП на основе лазерного дальномера (считающегося достаточно точным бортовым автономным датчиком ИВП) на малых высотах – 3 м [10].

Для примера, в таблице 1 приведены характеристики популярных цифровых камер и их СЧМ, а в таблице 2 представлены расчетные значения p , H_{\min} , H_{\max} , ΔH_{\max} (f_{\max}), ΔH_{\min} (f_{\min}), ΔH_{100} (f_{\max}) при $\beta = 1$ м (размах крыла типичного мини-БЛА) для случая применения цифровых камер из таблицы 1 в ОЭСИВ БЛА.

Из таблицы 2 видно, что все рассматриваемые БЦК с большим запасом обеспечивают выполнение БЛА задачи воздушной разведки на высоте $H = 100$ м (погрешность не более 3 м); все рассматриваемые БЦК обеспечивают требование по ограничению размера «слепой зоны» на малых высотах (не более 3 м); все рассматриваемые БЦК на малых высотах (близких к H_{\min}) обеспечивают очень высокую точность измерений (погрешность не более 6 мм); на высотах, близких к максимальной ($H_{\max} = 600$ м), погрешность измерений достаточно высокая (4–12 % от измеряемой высоты) и существенно зависит от максимального фокусного расстояния БЦК, в то время как характеристики матрицы БЦК (опреде-

ляющие основную долю стоимости БЦК) оказывают гораздо меньшее влияние на точность оценки ИВП БЛА; изменение размера базы влияет на точность измерений аналогично изменению фокусного расстояния объектива БЦК (во всех формулах (1), (2) и (3) фигурирует только произведение βf), однако изменять размер базы в полете (в отличие от фокусного расстояния БЦК) не представляется возможным. Таким образом, предварительный теоретический анализ показал, что БЦК ОЭСИВ при полетах выше 100 м должна иметь функцию автоматического регулирования фокусного расстояния. Наличие такой функции обеспечивает снижение предельного минимального значения измеряемой высоты, повышение чувствительности к изменению высоты (особенно на больших высотах) и снижение закупочной стоимости рассматриваемого бортового оборудования БЛА. Целесообразным является такое управление фокусом БЦК в зависимости от высоты полета, при котором $\Delta H_H = \text{const}$. С учетом формулы (4), можно получить график регулирования фокусного расстояния БЦК в зависимости от высоты полета БЛА (рисунок 2). График построен для случая применения Canon EOS 60D в качестве БЦК ($\beta = 1$ м; $p = 4,3$ мкм; $H = [3 \dots 600]$ м; $f = [18 \dots 135]$ мм) и отражает функцию:

$$f = H(gH + r), \quad (5)$$

$$\text{где } g = \frac{2p}{\alpha\beta}; \quad r = \frac{2p}{\beta}; \quad \alpha = p \left(\frac{H_{\max}^2}{\beta f_{\max} - 2pH_{\max}} + \frac{H_{\min}^2}{\beta f_{\min} - 2pH_{\min}} \right).$$

В случае $\Delta H_H = \text{const} = \alpha$, зависимости (1) примут следующий вид:

$$H = ay - b, \quad y = cH + d, \quad (6)$$

$$\text{где } a = \frac{1}{g\beta}; \quad b = \frac{r}{g}; \quad c = \beta g; \quad d = \beta r.$$

Следует также отметить, что вероятность автоматической идентификации ОТ с использованием алгоритмов технического зрения не равна единице и может быть повышена за счет увеличения разрешения БЦК (уменьшения размера пикселей матрицы) [11].

Решение задачи

Влияние ошибок квантования на точность измерения ИВП

Значение максимальной ошибки квантования δ можно вычислить по формуле $\delta = l/2$ [12], где l – величина одной ступени по уровню (рисунок 3).

В случае автоматического регулирования f таким образом, что $\Delta H_H = \text{const} = \alpha$; $l = \alpha$, а $\delta = \alpha/2$. Соответственно, максимальное линейное искажение положения ОТ на изображении, вызванное ошибками квантования, может быть оценено следующим образом:

$$\Delta y_q = c\delta = c\alpha/2. \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что при автоматическом регулировании f , обеспечивающим $\Delta H_H = \text{const}$, ошибка квантования не зависит от высоты полета и определяется характеристиками ОЭСИВ (p).

Влияние перепадов рельефа на точность измерения ИВП

Смещение ОТ, вызванное перепадами рельефа местности, объясняется тем, что масштаб изображений точек возвышения (понижения) рельефа крупнее (мельче) масштаба изображения точек средней плоскости снимка. Графическое представление влияния перепада рельефа на положение ОТ показано на рисунке 4. Согласно [13] по характеру рельефа местности делится на группы (равнинно-плоский, равнинно-волнистый, равнинно-холмистый, холмистый и гористый) в зависимости от перепада высот h_m на 100 м.

Максимальное (для данного типа рельефа) линейное искажение положения ОТ на изображении,

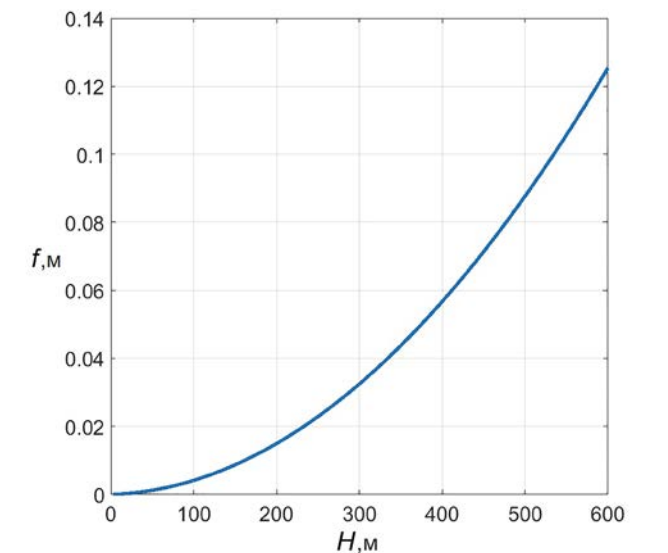


Рисунок 2 – График регулирования фокусного расстояния БЦК от высоты полета БЛА

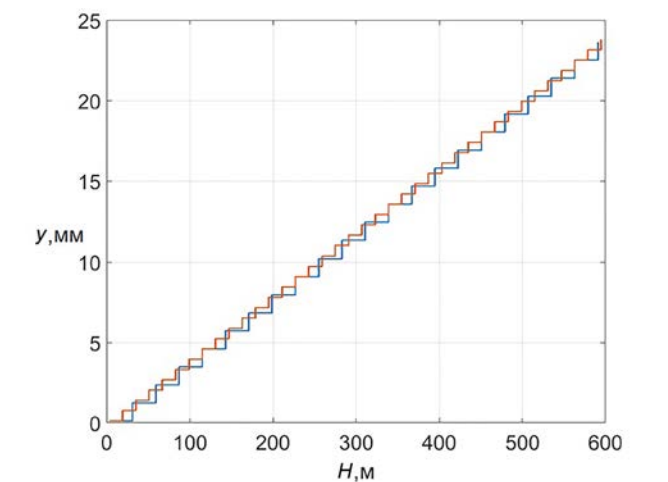


Рисунок 3 – Зависимость y от H при различных уровнях квантования

вызванное перепадами высот h_m при условии, что $\frac{2\Delta H_p}{\beta} = \frac{h_m}{100}$, может быть оценено так:

$$\Delta y_p = \frac{c\beta h_m}{200} \quad (8)$$

Из формулы (7) видно, что при условии $\Delta H_H = \text{const}$, ошибка, обусловленная перепадами рельефа местности, не зависит от высоты полета и определяется характеристиками ОЭСИВ (β, p, α).

Влияние турбулентности атмосферы на точность измерения ИВП

Зависимость максимальной интенсивности турбулентности ат-

мосферы от высоты полета можно описать с помощью уравнения [14]:

$$\Delta H_i = v + mH, \quad (9)$$

где $v = 1,02, m = 0,008$.

Характер влияния турбулентности на положение ОТ идентичен влиянию перепада рельефа (рисунок 4). Соответственно, максимальное линейное искажение положения ОТ на изображении, вызванное вертикальной динамикой носителя в турбулентной атмосфере, может быть оценено следующим образом:

$$\Delta y_i = c\Delta H_i = wy + s, \quad (10)$$

где $w = mca, s = c(v - mb)$.

Из формулы (10) видно, что при условии $\Delta H_H = \text{const}$, ошибка,

обусловленная влиянием турбулентности атмосферы, определяется характеристиками ОЭСИВ (β, p, α), а также зависит от высоты полета.

Влияние ошибок идентификации ОТ на точность измерения ИВП

Ошибки идентификации ОТ обусловлены вероятностным характером результатов работы алгоритмов технического зрения (имеется вероятность обнаружения ложных соответствий при идентификации пар особых точек на смежных снимках – «выбросов» [2]). Количество «выбросов» зависит от количества пикселей n_i , составляющих одну ОТ – разрешения изображения ОТ. Чем крупнее ОТ $\chi = n_i p$ (χ – ширина ОТ), тем меньше вероятность «выбросов». При определенном, относительно большом размере ОТ вероятность «выбросов» стремится к нулю (рисунок 5) [11].

С другой стороны, чем больше n_i , тем выше погрешность измерения ИВП с использованием стереопары, так как расширение группы пикселей, составляющих ОТ, эквивалентно изменению измеряемой ИВП (рисунок 6).

Максимальное линейное искажение положения ОТ на изображении, вызванное необходимостью минимизации ошибок идентификации ОТ, может быть оценено следующим образом (рисунок 5):

$$\Delta y_i = \chi = n_i p. \quad (11)$$

Влияние случайных колебаний тангажа БЛА

При полете в турбулентной атмосфере происходят случайные колебания угла атаки БЛА в воздушной системе координат (СК), и, соответственно, случайные колебания угла тангажа БЛА ϑ в земной СК. Характер влияния этих колебаний на точность измерения ИВП соответствует схеме, изображенной на рисунке 1. Искажение положения ОТ на изображении, вызванное случайным отклонением БЛА по углу тангажа ϑ , может быть оценено так:

$$\Delta y\vartheta = eH, \quad (12)$$

$$\text{где } e = \frac{c(1 - \cos \vartheta)}{\cos \vartheta}.$$

Влияние случайных колебаний угла крена БЛА

При полете в турбулентной атмосфере происходят случайные колебания угла крена БЛА в воздушной и земной СК. Характер влияния этих колебаний на точность измерения ИВП соответствует схеме, изображенной на рисунке 4. Искажение положения ОТ на изображении, вызванное случайным отклонением БЛА по углу крена γ , может быть оценено так:

$$\Delta y_\gamma = \frac{1}{2} c\beta \tan \gamma. \quad (13)$$

Математическая модель ОЭСИВ

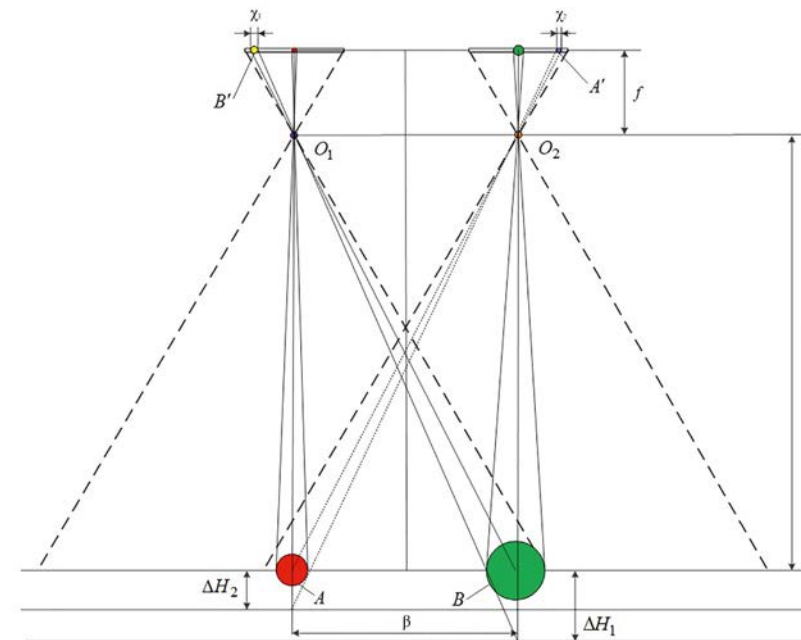


Рисунок 6 – Влияние размеров ОТ на точность измерения ИВП

Таким образом, математическая модель ОЭСИВ в общем случае может быть описана следующим стохастическим уравнением в дискретной форме:

$$z_k = a(y_k + \Delta y_q \zeta_k^q + \Delta y_p \zeta_k^p + \Delta y_i \zeta_k^i + \Delta y_\vartheta \zeta_k^\vartheta + \Delta y_\gamma \zeta_k^\gamma) - b = a((1 + w\zeta_k^i + e\zeta_k^\vartheta)y_k + \Delta y_q \zeta_k^q + \Delta y_p \zeta_k^p + \Delta y_i \zeta_k^i + \Delta y_\vartheta \zeta_k^\vartheta + \Delta y_\gamma \zeta_k^\gamma) - b, \quad (14)$$

где z_k – результат измерения ИВП с помощью ОЭСИВ на k -м шаге (период измерений – T_u);

$\zeta_k^q, \zeta_k^p, \zeta_k^i, \zeta_k^\vartheta, \zeta_k^\gamma, \zeta_k^i$ – шумы измерений, обусловленные ошибками квантования, случайными перепадами рельефа местности, случайными эволюциями носителя в турбулентной атмосфере, случайными изменениями размеров ОТ, соответственно. Все перечисленные шумы являются независимыми дискретными гауссовскими белыми шумами с нулевым средним и единичной дисперсией. Для расчетов были выбраны следующие начальные условия: $h_m = 1,75$ м, $v = 1,02, m = 0,003, \vartheta = 6^\circ, \gamma = 3^\circ$ [15].

В таблице 3 приведены результаты расчетов погрешности измерений ИВП с помощью ОЭСИВ $\mu_k = z_k - H_k$.

Анализ результатов расчетов показывает, что для обеспечения высокой точности измерений ИВП на $H = 600$ м требуется оптическая система БЦК с регулируемым фокусным расстоянием, а также минимальный размер пикселей СЧМ БЦК, что существенно увеличивает цену ОЭСИВ. Кроме этого, целесообразным является увеличение размера базы, что вынуждает увеличивать размах крыла БЛА. На $H = 100$ м автоматическая регулировка фокусного расстояния БЦК не требуется, а приемлемую точность измерений ИВП можно обеспечить за счет применения

Таблица 3 – Начальные условия и результаты расчетов						
Параметр	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5	Опыт 6
Начальные условия						
β , м	1	2	1	1	1	1
p , мкм	3,75	3,75	6,58	3,75	3,75	3,75
n_i	5	5	5	15	5	5
N	7360	7360	7360	7360	10763	7360
f_{\min} , мм	12	12	12	12	12	28
f_{\max} , мм	135	135	135	135	135	42
Результаты расчетов						
H_{\min} , м	0,87	1,74	0,50	0,87	0,59	2,03
Результаты расчетов ($H = 100$ м)						
μ_{\max} , м	2,86	2,50	3,51	4,28	2,86	4,75
Результаты расчетов ($H = 600$ м)						
μ_{\max} , м	37,75	22,02	62,63	89,49	37,75	114,71

Рисунок 4 – Влияние перепада рельефа на положение ОТ

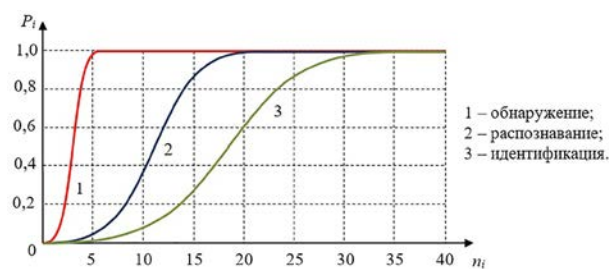


Рисунок 5 – Зависимость вероятности правильного обнаружения, распознавания и идентификации объекта от разрешения изображения этого объекта

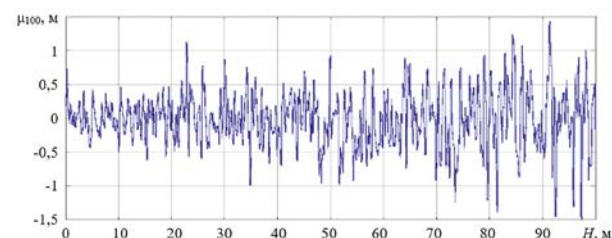


Рисунок 7 – Выходной сигнал ОЭСИВ при изменении ИВП БЛА

достаточно дешевых вариантов СТЗ при небольших размерах БЛА. Необходимо отметить, что часть составляющих погрешности измерений растет с увеличением ИВП (14), что приводит к постепенному росту общей погрешности (рисунок 7).

Проверка адекватности разработанной математической модели осуществлялась путем сравнения результатов моделирования с результатами натурного эксперимента. В качестве начальных условий для эксперимента были выбраны: БЦК Апсеуе (цена 23 USD); $\beta = 1$ м; $p = 3,0$ мкм; $n = 1920$; $n_i = 4$; $H = 15$ м; $f = 3,6$ мм, количество измерений ИВП – 270. Схема эксперимента представлена на рисунке 8. В процессе эксперимента получены следующие данные: математическое ожидание

результатов измерений ИВП с помощью макета ОЭСИВ – $m[z_{15}]_{\text{экс}} = 15,5$ м; СКО – $\sigma[z_{15}]_{\text{экс}} = 1,6$ м; расчетное значение $\sigma[z_{15}]_{\text{расч}} = 1,53$ м.

При анализе результатов эксперимента сделан вывод: расчетная и экспериментальные выборки оцениваемого параметра (ошибка определения ИВП) принадлежат одной и той же генеральной совокупности по критерию χ^2 (критерию Пирсона) [16]. Полученная степень адекватности математической модели – высокая (доверительная вероятность результатов математического моделирования более 0,9 при относительной погрешности не более 5%) [17].

Заключение

Таким образом, в процессе исследований разработана стохастическая ММ ошибок ОЭСИВ. По результатам проведенного натурного эксперимента доказана адекватность полученной ММ. Расчеты подтверждают возможность применения СТЗ в качестве датчика ИВП. Преимуществами такого датчика являются: непосредственное измерение ИВП, автономность работы, достаточно высокая точность, относительно небольшая цена. Причем имеется возможность увеличения точности и диапазона измеряемых высот при определенном увеличении цены датчика.

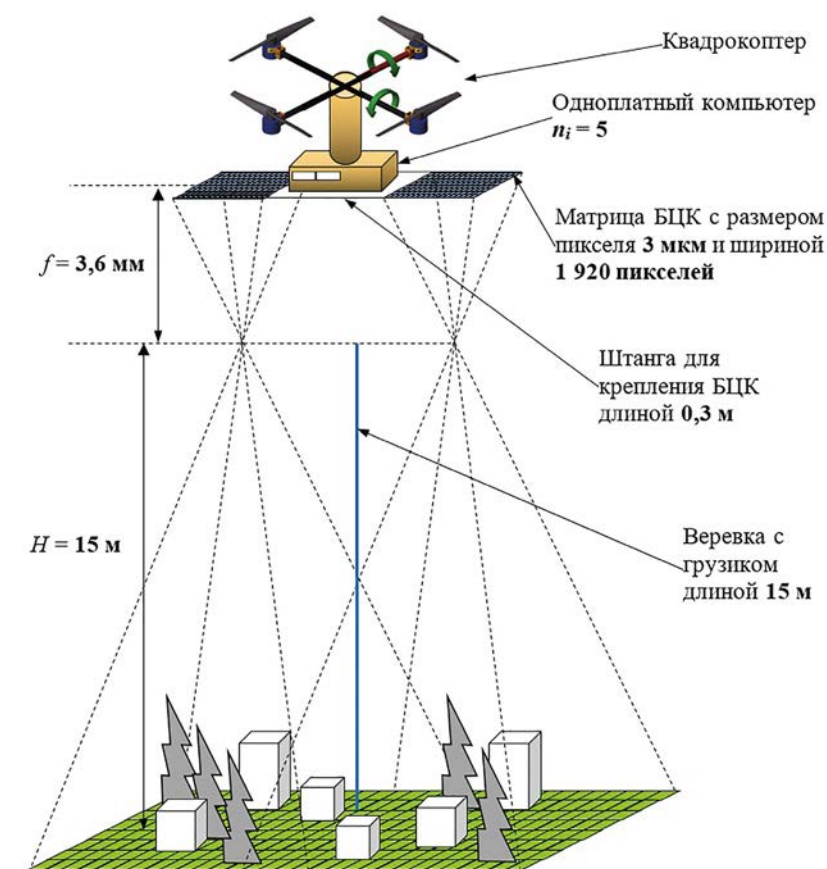


Рисунок 8 – Схема натурного эксперимента

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Золотых, Н. Ю. Обзор методов поиска и сопровождения транспортных средств на потоке видеоданных / Н. Ю. Золотых, В. Д. Кустикова, И. Б. Мееров // Вестник Нижегородского ун-та. – 2012. – № 5 (2). – С. 348–358.
2. Шейников, А. А. Оценка пилотажно-навигационных параметров полета БЛА с учетом результатов обработки последовательности изображений / А. А. Шейников, А. М. Коваленко // Наука и военная безопасность. – 2021. – №2 (68). – С. 98–107.
3. Козин, Е. В. Фотограмметрия / Е. В. Козин, А. Г. Карманов, Н. А. Карманова. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 142 с.
4. Шейников, А. А. Модель инерциально-оптической навигационной системы беспилотного летательного аппарата / А. А. Шейников, А. М. Коваленко // Системный анализ и прикладная информатика. – 2020. – № 2. – С. 17–25.

5. Красильщиков, М. Н. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / М. Н. Красильщиков, Г. Г. Серебряков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с.
6. Матвеев, В. В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2009. – 280 с.
7. Коваленко, А. М. Математическая модель ошибок инерциально-оптической навигационной системы малоразмерного БЛА / А. М. Коваленко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2020. – №1 (66). – С. 64–72.
8. Удалов, Н. В. Методы и алгоритмы обработки цифровых изображений в комплексных системах наблюдения летательных аппаратов / Н. В. Удалов. – М.: Изд-во МАИ, 2014. – 144 с.
9. Богаткин, О. Г. Авиационная метеорология / О. Г. Богаткин. – СПб.: Изд-во РГТМУ, 2005. – 328 с.
10. Фуфаев, А. В. Повышение точности измерения дистанции в дальном канале наблюдения с использованием полупроводникового лазера / А. В. Фуфаев, Р. В. Федорцев // Приборы и методы измерений. – 2013. – №2 (7). – С. 95–102.
11. Студитский, А. С. Исследование и разработка многофункционального оптико-электронного средства наблюдения и разведки: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / А. С. Студитский. – М., 2013. – 112 л.
12. Морозов, В. В. Методы обработки результатов физического эксперимента / В. В. Морозов, Б. Е. Сobotковский, И. Л. Шейнман. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. – 64 с.
13. Инструкция по топографической съемке: [ГКИНП (ГНТА)-02-262-82: введен 01.01.1983]. – М.: Недра, 1985. – 151 с.
14. Биард, Р. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Р. Биард, Т. Маклэйн. – М.: Техносфера, 2015. – 312 с.
15. Санько, А. А. Влияние ветра на систему угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата / А. А. Санько, И. В. Рожков, А. А. Шейников // Crede Experto: transport, society, education, language. – 2019. – № 1 (20). – С. 18–30.
16. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учеб. для студ. вузов / Е. С. Вентцель. – М.: Академия, 2005. – 576 с.
17. Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – М.: Наука, 1971. – 576 с.

REFERENCES

1. Zolotykh, N. Yu. Review of methods for searching and tracking vehicles on the video data stream / N. Yu. Zolotykh, V. D. Kustikova, I. B. Meerov // Bulletin of the Nizhny Novgorod University. – 2012. – No. 5 (2). – P. 348–358.
2. Sheinikov, A. A. Evaluation of flight and navigation parameters of the UAV flight, taking into account the results of image sequence processing / A. A. Sheinikov, A. M. Kovalenko // Science and military security. 2021. – No. 2 (68). – P. 98–107.
3. Kozin, E. V. Photogrammetry / E. V. Kozin, A. G. Karmanov, N. A. Karmanova. – St. Petersburg: ITMO University, 2019. – 142 p.
4. Sheinikov, A. A. Model of the inertial-optical navigation system of an unmanned aerial vehicle / A. A. Sheinikov, A. M. Kovalenko // System Analysis and Applied Informatics. – 2020. – No. 2. – P. 17–25.
5. Krasilshchikov, M. N. Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft / M. N. Krasilshchikov, G. G. Serebryakov. – M.: FIZMATLIT, 2009. – 556 p.
6. Matveev, V. V. Fundamentals of construction of strapdown inertial navigation systems / V. V. Matveev, V. Ya. Raspopov. – St. Petersburg: State Scientific Center of the Russian Federation OJSC “Concern” Central Research Institute “Elektropribor”, 2009. – 280 p.
7. Kovalenko, A. M. Mathematical model of errors in the inertial-optical navigation system of a small UAV / A. M. Kovalenko // Vestn. Military acad. Rep. Belarus. – 2020. – No. 1 (66). – P. 64–72.
8. Udalov, N. V. Methods and algorithms for processing digital images in complex systems for observing aircraft / N. V. Udalov. – M.: Publishing House of MAI, 2014. – 144 p.
9. Bogatkin, O. G. Aviation meteorology / O. G. Bogatkin. – St. Petersburg: Publishing House of the Russian State Humanitarian University, 2005. – 328 p.
10. Fufaev, A. V. Improving the accuracy of distance measurement in the rangefinder channel of an observation device using a semiconductor laser / A. V. Fufaev, R. V. Fedortsev // Instruments and measurement methods. – 2013. – No. 2 (7). – P. 95–102.
11. Studitsky, A. S. Research and development of a multifunctional optical-electronic means of observation and reconnaissance: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.11.13 / A. S. Student. – M., 2013. – 112 p.
12. Morozov, V. V. Methods for processing the results of a physical experiment / V. V. Morozov, B. E. Sobotkovsky, I. L. Sheinman. – St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 2004. – 64 p.
13. Instructions for topographic survey: [GKINP (GNTA)-02-262-82: introduced on 01.01.1983]. – M.: Nedra, 1985. – 151 p.
14. Biard, R. Small unmanned aerial vehicles: theory and practice / R. Biard, T. McLane. – M.: Technosfera, 2015. – 312 p.
15. Sanko, A. A. Influence of wind on the system of angular stabilization of an unmanned aerial vehicle / A. A. Sanko, I. V. Rozhkov, A. A. Sheinikov // Crede Experto: transport, society, education, language. – 2019. – No. 1 (20). – P. 18–30.
16. Wentzel, E. S. Theory of Probability: textbook for stud. universities / E. S. Wentzel. – M.: Academy, 2005. – 576 p.
17. Mitropolsky, A. K. Technique of statistical calculations / A. K. Mitropolsky. – M.: Nauka, 1971. – 576 p.

Статья поступила в редакцию 01.11.2022

**Лаборатория диагностики и прототипирования авиационных конструкций
учреждения образования
«Белорусская государственная академия авиации»
приглашает к сотрудничеству**



1. **Tescan Mira 3 LMH.** Новое поколение сканирующих электронных микроскопов с катодом Шоттки TESCAN MIRA сочетает в себе преимущества современных технологий: модернизированная электроника для ускоренного получения изображений; сверхбыстрая система сканирования с компенсацией статических и динамических aberrаций изображения. Доступное увеличение микроскопа от 2 до 1 000 000. Возможность проведения энергодисперсионного микроанализа.

аналоги. Такие выдающиеся характеристики обусловлены самой большой вакуумной камерой, имеющей полную термостабилизацию, и вертикально расположенную оптическую системы, улучшающей соотношение сигнал/шум и сохраняющей компактность прибора.



2. **Спектромер GNR Solaris CDD Plus.** Лабораторный оптико-эмиссионный спектрометр GNR Solaris CCD Plus в настоящий момент является лучшим в своем классе, значительно превосходя по точности все известные аналоги. Такие выдающиеся характеристики обусловлены самой большой вакуумной камерой, имеющей полную термостабилизацию, и вертикально расположенную оптическую системы, улучшающей соотношение сигнал/шум и сохраняющей компактность прибора.



3. **3d-принтер Fortus 450mc.** Трехмерная производственная система, позволяющая создавать точные воспроизводимые детали аддитивным способом на основе твердотельной трехмерной модели: авиационные, машиностроительные и строительные конструкции в масштабе для изучения опытных конструкций, технологические приспособления и инструменты и конечные детали, а также функциональные прототипы, которые выдерживают жесткое тестирование. Высокоэффективный материал Ultem используется для создания деталей фюзеляжа, крыльев благодаря высокой прочности и малому удельному весу.

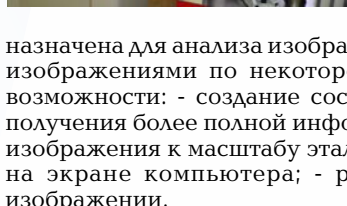


4. **Трёхкоординатный фрезерный станок с ЧПУ Clever CNC Rh300.** Предназначен для обработки легкообрабатываемых материалов с высокой точностью и производительностью. Пригоден для обработки стали и труднообрабатываемых материалов на щадящих режимах.

5. **3d-сканер Nikon Altera 7.5.5 с LC15 Dx.** Координатно-измерительная машина премиум-класса серии ALTERA. с лазерным сканированием сложных криволинейных поверхностей. Точность сканирования достигается до 1,8 мкм за счёт керамической конструкция с почти идеальной удельной жёсткостью и большой устойчивостью к изменениям температуры, гарантирующая исключительные и стабильные результаты в любых производственных условиях.



6. **Ультразвуковой дефектоскоп GE Phasor XS.** Предназначен для измерения толщины изделий, координат дефектов и амплитуд сигналов от них, оценки относительных размеров дефектов в сварных соединениях и основном материале, сосудов давления, котлов, транспортных и мостовых конструкций и других объектов. Переносной и прочный прибор объединяет преимущества фазированной решетки с обычным ультразвуковым дефектоскопом, отвечающим принятым нормам.



7. **Гидравлическая разрывная машина Kason WAW-300.** Испытательная гидравлическая разрывная машина предназначена для определения механических характеристик различных материалов при статическом растяжении, сжатии, изгибе и сдвиге. Машина применяется в металлургии, машиностроении, в производстве неметаллических материалов и изделий из них, в том числе при проведении научных исследований. Принцип действия машин серии WAW основан на преобразовании тензометрическим датчиком давления нагрузки, приложенной к испытываемому образцу, в электрический сигнал, изменяющийся пропорционально этой нагрузке.

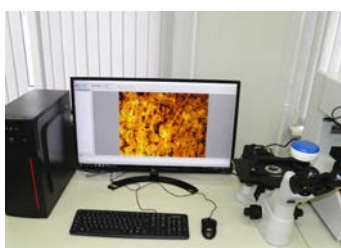


8. **Металлографический комплекс Autoscanner.** Предназначена для анализа изображений посредством визуального сравнения их с эталонными изображениями по некоторой заданной методике. Программное обеспечение имеет возможности: - создание составных изображений из набора изображений образца для получения более полной информации об образце; - приведение масштаба анализируемого изображения к масштабу эталонных изображений для их точного визуального сравнения на экране компьютера; - ручное измерение длин и площадей на анализируемом изображении.



9. **Твердомер аналоговый AFFRI-URBV-V.** Предназначен для измерения твердости металлов и сплавов, мягкой и твердой резины по стандартизованным шкалам твердости Роквелла (HRA, HRB, HRC, HRN, HRT) по ГОСТ 9013-59, Виккерса (HV) по ГОСТ 2999-75, Бринелля (HB) по ГОСТ 9012-59.

10. **Твердомер AFFRI-MVDM8.** Предназначен для измерения микротвердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса, в т. ч. поверхностных слоев металла при механической обработке, отдельных составляющих у структурно неоднородных сплавов, незначительных по толщине гальванических и других покрытий.



Handwritten mathematical formulas and diagrams on a world map background:

- $P = UI$
- $I = IA$
- $P = I^2 R$
- $(IN)_0 = \frac{IN}{i}$
- $I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$
- $I = \epsilon r A$
- $B = R \frac{I}{d}$
- $B = K \frac{I}{d}$
- $BI = 2\sqrt{I} r = IN$
- $W_m = 1/2 LI^2$
- $\sum \frac{B}{\mu} I = \sum IN$
- $R = U/I$
- $\epsilon_1 = I_1 R_1 + I R$
- $W = Pt = UIc\rho t$
- $I = 2\sqrt{I} r$
- $\epsilon - \frac{M \Delta c}{\Delta T}$
- $a + b = c$
- $S = I/d$
- Graphs showing relationships between variables like $I, \mu a$ and U, β .

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 378.02:378.8

Г. М. БУЛДЫК

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ИНЖЕНЕРА

Георгий Митрофанович Булдык – доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры физических и математических основ информатики учреждения образования «Белорусская государственная академия связи»

Georgy Buldyk – Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physical and Mathematical Foundations of Informatics of Belarusian State Academy of Telecommunications

Аннотация: в статье рассматривается методика формирования высокопрофессионального, творческого и конкурентоспособного инженера, представляющая собой комплекс взаимосвязанных и взаимообусловленных компонентов – мотивационно-целевого, содержательного, процессуального и контрольно-оценочного. Доказано, что при формировании профессиональной культуры инженера, представленной ключевыми компетенциями и квалификациями, проявляются цели, мотивы, профессиональные знания, умения, навыки и опыт деятельности, мировоззренческие установки будущего инженера.

Ключевые слова: методика, культура, инженер, содержательный компонент, мотивационно-целевой компонент, процессуальный компонент, контрольно-оценочный компонент.

Annotation: the article discusses the methodology for the formation of a highly professional, creative and competitive engineer, which is a complex of interrelated and interdependent components - motivational-targeted, meaningful, procedural and control-evaluative. It is proved that in the formation of an engineer's professional culture, represented by key competencies and qualifications, goals, motives, professional knowledge, skills, skills and experience, worldview attitudes of the future engineer are manifested.

Keywords: methodology, culture, engineer, content component, motivational-target component, procedural component, control and evaluation component.

Под методикой понимается общая направленность обучения. Цели и содержание обучения реализуются при помощи методов обучения. Подготовка высокопрофессионального, творческого и конкурентоспособного инженера – основная задача технических университетов. Квалификационные требования к конкурентоспособному инженеру предполагают более широкий спектр знаний, умений, навыков и опыта деятельности, которые формируются учебными дисциплинами. В соответствии с образовательным стандартом подготовка будущего инженера должна быть ориентирована не только на развитие профессиональных навыков, но и на становление личностных качеств. В техническом университете будущих инженеров должны учить анализировать, предвидеть и прогнозировать различные производственные ситу-

ации, учить принимать правильные решения, учить предвидеть конечный результат действий.

В рамках нашего исследования, под профессиональной культурой будущего инженера будем понимать интегративное качество развития культуры личности студента – субъекта деятельности. Современный инженер, обладающий профессиональной культурой, знает и рационально использует в своей профессиональной деятельности основные законы и способы деятельности, соответствующие современным и перспективным условиям общественного развития. Эти знания проявляются в совокупности компетентностей и компетенций инвариантного и предметно-преобразовательного характера инженерной деятельности, обеспечивают их творческое развитие и функционирование в условиях конкурентной профессиональной среды [1].

В определении профессиональной культуры представлен желаемый образ инженера, в котором раскрыта совокупность выполняемых специалистом разнородных функций, определяющих не только его функциональную подготовленность, но также и социальную зрелость. Эти функции развиваются в процессе становления инженера под воздействием других инженеров-профессионалов и научно-технического прогресса общества в целом. При проектировании системы формирования профессиональной культуры будущего инженера (ФПКИ) в техническом университете мы прибегаем к полипарадигмальному подходу, который получает все большее распространение, так как образование может быть представлено как в социальном аспекте, так и для удовлетворения потребности личности. Процесс формирова-

ния будущего инженера представляет собой определенную систему, состоящую из обучения, воспитания и социализации. В процессе формирования профессиональной культуры раскрывается система ценностей современного инженера [1].

Для повышения качества инженерного образования, обучение студентов должно быть направлено на разработку эффективных способов интенсификации самостоятельной познавательной деятельности. Современный инженер характеризуется высоким уровнем подготовки, обладает способностью и профессиональными навыками принятия самостоятельных решений. Следовательно, обучение решению технических задач должно основываться на значительном объеме обрабатываемой информации. Большой объем информации можно переработать при развитии навыков самостоятельной работы студентов. Активизация самостоятельной работы студентов включает инновационные методы, формы и приемы обучения, которые обеспечивают системную организацию образовательного процесса, включая преподавателя и студента. Парадигма процесса подготовки студентов инженерных специальностей – это совокупность технологий, оптимизирующих образовательный процесс на основе полипарадигмального подхода [2], который повышает уровень профессиональной компетентности студентов, активизирует их самообразовательную познавательную деятельность, интегрирует личностно ориентировано-развивающий, компетентностный и деятельностный подходы.

В современной культуре личности выделяются три составляющие: духовные ценности, общение и творческая деятельность. Духовную культуру личности определяет нравственная культура, включающая культуру человеческого сознания и культуру повседневного поведения. Личность характеризуется эстетической и нравственной культурой, интеллектуальным развитием и психологической зрелостью, мировоззренческими позициями. Нравственная культура личности

формируется знаниями и умениями в сфере моральной деятельности. Профессиональная культура является составной частью общей культуры личности. Следовательно, ценности профессиональной культуры будущего инженера, по нашему мнению, развиваются в результате инженерного образования и оцениваются по результатам будущей профессиональной деятельности инженера. Чтобы быть конкурентоспособным инженер должен не только обладать широким кругозором общих и специальных знаний, но и одновременно быть готовым приобрести новые. Сформированность этих качеств у современного инженера является фундаментом профессиональной культуры. В структуре определения «профессиональная культура инженера» выделяются профессиональные знания, которыми должен владеть специалист (ключевые компетенции), и ключевые квалификации, составляющие качественную гуманитарную характеристику профессиональной культуры как часть общей духовной культуры личности [2].

Разработка методики формирования профессиональной культуры базируется на фундаментальных идеях системного подхода в современном научном познании.

Основаниями этой методики являются факторы онтологического, гносеологического и аксиологического характера [2].

В качестве онтологического основания профессиональной культуры инженера выступает система инженерного образования: предметное содержание учебных дисциплин и система организации образования – как важнейшего института современного общества.

Ценностные ориентиры и мотивационные установки образования будущего инженера для развития его профессиональных качеств определяются аксиологическими основаниями культуры личности.

Процесс становления профессиональной культуры будущих инженеров описывается гносеологическими факторами, являющимися ориентирующими установками в процессе познания.

Обладая когнитивно-компетентными, рефлексивно-оценочными и креативными умениями и навыками в профессиональной деятельности, инженер обретает возможность усвоения норм научной рациональности, представленной в содержании профессиональных дисциплин, возможность развития интуиции, творческого воображения и рефлексивных способностей. Гносеологические и аксиологические основания фундируют личностные характеристики инженера и определяют составные компоненты профессиональной культуры инженера [2]:

- ценностные ориентиры и мотивационные установки инженерной деятельности формируют стремление к интеллектуальной деятельности креативности мышления;

- профессиональная действительность формирует эстетическое восприятие, принятие информационно-компьютерных технологий как инструментального средства профессиональной деятельности;

- когнитивно-компетентностный компонент гносеологических оснований формирует профессиональную грамотность и профессиональную компетентность;

- рефлексивно-оценочный компонент – умение осуществлять анализ и оценку результатов инженерной деятельности;

- креативный компонент формирует технологическую интуицию и креативное воображение.

Системный подход – это методологическое направление в науке, основная задача которого заключается в разработке методов исследования и проектирования сложноорганизованных объектов. Система – совокупность элементов, находящихся в определенных отношениях друг с другом, организованных в соответствии с педагогическими принципами [3]. Фундаментальные понятия системного подхода были разработаны в исследованиях А. Н. Аверьянова, В. Г. Афанасьева, Л. Бергаланфи, И. В. Блауберга, М. К. Мамардашвили, Б. Н. Кедрова, В. Н. Садовского, Э. Г. Юдина и др. [3].

Если система понимается как единство взаимосвязанных элементов, то структура описывает

способ взаимодействия элементов системы. Отличие рассматриваемой методической системы от других систем заключается в способах взаимодействия элементов системы, основанных на педагогических технологиях, что имеет принципиальное значение. Системный подход к педагогическим технологиям рассматривался в работах С. И. Архангельского, В. П. Беспалько, Т. А. Ильиной, Ф. Ф. Королева, Н. В. Кузьминой, И. П. Подласого, Н. Ф. Талызиной и др.

Педагогическая система, согласно Н. В. Кузьминой, это «множество взаимосвязанных структурных и функциональных компонентов, подчиненных целям воспитания, образования и обучения подрастающих поколений и взрослых людей» [5]. Аналогично определяют педагогическую и дидактическую системы И. П. Подласый, В. П. Беспалько, В. М. Монахов и др. [5].

Используя системный подход, выявляем новые интегративные качества, не свойственные отдельно взятым образующим систему компонентам.

Мы в своем исследовании рассматриваем методику как проекцию дидактической системы обучения на определенную предметную область. Следовательно, методика ФПКИ может быть рассмотрена как подсистема, как компонент общей дидактической системы инженерного образования.

Методика ФПКИ представляет систему взаимосвязанных и взаимообусловленных компонентов: мотивационно-целевого, содержательного, процессуального и контрольно-оценочного. Эти компоненты объединены общей стержневой идеей формирования профессиональной культуры будущих инженеров.

В результате ФПКИ накапливается опыт поисковой, эвристической деятельности, развивается способность определять и разрешать проблемы, вести дискуссию, воспитываются профессионально важные личностные качества.

Структурно-содержательная модель [1], которая включает методологический, содержательный, технологический и оценочно-результативный компоненты и педагогические условия, является аналогом процесса ФПКИ у

студентов в техническом университете. Эта модель содержит характеристики педагогического процесса, описывает его внутреннюю структуру, определяет факторы, влияющие на педагогический процесс, что способствует управлению его качеством.

На ФПКИ в вузе оказывают влияние следующие условия [4]:

- объективные (общие) условия, которые определяются социальным заказом общества, его требованиями к качеству инженерной подготовки;

- частные условия, определяемые процессом преподавания и усвоения знаний студентами с учетом взаимодействия технических и преподавательских ресурсов по овладению инженерной культурой;

- субъективные условия, связанные с мотивацией будущей профессиональной деятельности, которые объясняются инженерным мышлением, рефлексией.

В основу ФПКИ студентов в технических университетах заложены методологические подходы: системно-деятельностный, компетентностный, личностно-ориентированный. Соответственно, принципами реализации, с использованием современных информационно-коммуникационных технологий, формирования профессиональной культуры будущих инженеров являются: принцип системности, принцип приоритета индивидуальности и самооценности обучаемого, принцип субъект-субъектных отношений педагога и студента. Эти принципы реализуются в образовательном процессе и направлены на решение образовательных задач. В процессе педагогического сопровождения образовательного процесса преподаватель реализует мотивационную, информационную и технологическую функции [4].

Ориентируя студентов на личностное самоопределение и саморазвитие при изучении учебных дисциплин, мы реализуем мотивационную функцию.

Задача преподавателя помочь студенту осознать потребность в глубоких, прочных и разнообразных общенаучных и профессиональных знаниях, развитии своего творческого потенциала, сориентировать

его на саморазвитие, пробудить интерес к учебно-познавательной деятельности, развить стремление достичь определенного уровня развития в обучении.

Формирование знаний, выработка профессиональных умений и накопление личного опыта профессиональной деятельности, развитие специальных свойств, позволяющих осуществлять процесс деятельности и получать нужный результат, реализуется информационной функцией.

Технологическая функция реализуется через проектную, преобразовательную и рефлексивно-корректировочную деятельность. Эта функция направлена на разработку методических материалов, определяющих педагогическую деятельность, ее содержание и характер для развития профессиональных знаний, умений и опыта деятельности, на внедрение в образовательную практику новейших достижений науки и техники. Предполагает оценку влияния результатов научных достижений на практику обучения с последующей коррекцией научной теории и практической деятельности [5, 6].

В методике выделяем следующие особенности процесса формирования профессиональной культуры будущих инженеров:

- актуализация потенциальных возможностей образовательного процесса посредством внедрения интерактивных методов обучения, обусловленных требованиями профессиональной деятельности;

- активизация практико-ориентированного проектного обучения, в частности проектно-инженерной деятельности, связанной с функционированием объектов профессиональной деятельности (метод проектов и кейс-метод).

Выделенные особенности процесса обучения будущих инженеров позволили нам разработать структуру методики формирования профессиональной культуры студентов на основе педагогического сопровождения, которая содержит мотивационно-целевой, содержательный, процессуальный и контрольно-оценочный компоненты (рисунок).

В качестве критериев оценки эффективности методики ФПКИ студентов в системе высшего тех-

нического образования выступают мотивационно-ценностный, когнитивный, деятельностный, коммуникативный, рефлексивный, социокультурный критерии, а также критерий сформированности профессионально важных качеств личности [4].

Для объективной оценки влияния разработанной методики на формирование профессиональной культуры инженера (ПКИ) строится логит-модель:

$$P(Y = 1 | x_i) = \frac{1}{1 + e^{-f(x_i)}}$$

Индикаторная (дихотомическая, бинарная) переменная Y , характеризующая влияние методики на формирование профессиональной культуры инженера принимает два значения 0 и 1:

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{методика помогает формированию ПКИ;} \\ 0 & \text{методика не помогает формированию ПКИ.} \end{cases}$$

Функция $f(x_i)$ — это линейная регрессия количественных факторных признаков X_i :

$$f(x_i) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m$$

Значения неизвестных коэффициентов $b_i, i = \overline{1, m}$ определяются на основе обработки результатов экзаменов, используя ППП Excel. Если $P(Y = 1 | x_i) \geq 0,5$, то методика оказывает значимое влияние на формирование профессиональной культуры инженера. В противном случае влияние методики на формирование профессиональной культуры инженера незначимо.

Для инженера важна не энциклопедическая грамотность, а способность применять знания, умения и опыт деятельности для разрешения конкретных задач, возникающих в профессиональной деятельности.

Заключение

Таким образом, ведущей целью технического вуза является формирование и развитие у студентов ключевых квалифи-

каций, которые включают коммуникативность, ответственность, рефлексивность, способность к саморазвитию, повышенную профессиональную активность. Успешная профессиональная деятельность будущего инженера предполагает не только высокий уровень профессиональных знаний, но и духовно-нравственную, социально-психологическую и информационную культуру человека. Выпускник технического вуза должен обладать высоким уровнем профессиональной культуры как основы его конкурентоспособности в условиях динамики социально-экономических условий в единстве трех ее структурных компонентов: аксиологического, технологического и личностно-творческого.

Опираясь на вышесказанное, нам представляется целесообразным организовывать учебно-воспитательный процесс в техническом вузе, направленный на формирование профессиональной культуры будущих инженеров в соответствии с разработанной методикой.



Рисунок — Структура методики формирования профессиональной культуры будущих инженеров

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Булдык, Г. М. Сущность, структура и функции профессиональной культуры инженера / Г. М. Булдык // Профессиональное образование. – 2021. – № 3. – С. 34–38.
2. Булдык, Г. М. Формирование профессиональной культуры инженера / Г. М. Булдык // Педагогическая наука и образование. – 2021. – № 4. – С. 76–83.
3. Бетуганова, М. Б. Формирование профессиональной компетентности будущих инженеров в среде информационных технологий: автореф. дис.... канд. пед. наук / М. Б. Бетуганова. – М., 2006. – 26 с.
4. Борисова, К. В. Формирование профессиональной инженерной культуры у студентов в системе высшего технического образования: автореф. дис.... канд. пед. наук / К. В. Борисова. – М., 2013. – 26 с.
5. Фокин, Ю. Г. Пути совершенствования методов обучения в высшей школе: Методические рекомендации / Ю. Г. Фокин. – М.: НИИВО, 1991. – С. 4–10.
6. Шагеева, Ф. Т. Современные образовательные технологии (опыт инженерного вуза) / Ф. Т. Шагеева, В. Г. Иванов // Высшее образование в России. – 2006. – № 4. – С. 129–132.

REFERENCES

1. Buldyk, H.M. Essence, structure and functions of an engineer's professional culture. / G.M. Buldyk // Vocational education. – 2021. – № 3. – P. 34–38.
2. Buldyk, H.M. Formation of an engineer's professional culture / G. M. Buldyk // Pedagogical science and education. – 2021. – №4. – P. 76–83.
3. Betuganova, M. B. Formation of professional competence of future engineers in the information technology environment: author. dis ... cand. ped. Sciences / M. B. Betuganova. – M., 2006. – 26 p.
4. Borisova, K. V. Formation of professional engineering culture among students in the system of higher technical education: author. dis ... cand. ped. Sciences / K. V. Borisova author. dis ... cand. ped. Sciences. – M., 2013. – 26 p.
5. Fokin, Yu. G. Ways to improve teaching methods in higher education: Methodological recommendations / Yu. G. Fokin. – M.: NIIVO, 1991. – P. 4–10.
6. Shageeva, F. T. Modern educational technologies (experience of an engineering university) / F. T. Shageeva, V. G. Ivanov // Higher education in Russia. – 2006. – No. 4, p. 129–132.

Статья поступила в редакцию
28.03.2022

УДК 629.7(476)

В. Н. СИВИЦКИЙ, В. Г. ТАРАСЮК

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АВИАЦИИ БЕЛАРУСИ

Владимир Николаевич Сивицкий – кандидат филологических наук, доцент, заведующий кафедрой социально-гуманитарных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
sivicki69@mail.ru

Vladimir Sivitsky – Candidate of Philology, Associate Professor, Head of the department of Social and Humanitarian Disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
sivicki69@mail.ru

Всеволод Григорьевич Тарасюк – магистр технических наук, инженер ОАО «Авиакомпания «Белавиа», Республика Беларусь
stavsg.2021@gmail.com

Vsevolod Tarasyuk – Master of technical sciences, engineer of Belavia – Belarusian Airlines, Republic of Belarus
stavsg.2021@gmail.com

Аннотация: в статье рассматривается актуальность социально-гуманитарных исследований в авиации, анализируется степень изученности исторических, социально-экономических, философско-культурологических и других гуманитарных аспектов развития авиационной отрасли Беларуси. Авторы отмечают продуктивность использования в авиационной гуманитаристике комплексного подхода и обозначают некоторые ключевые направления социально-гуманитарного изучения авиационного комплекса страны.
Ключевые слова: социально-гуманитарные проблемы в авиации, авиационная гуманитаристика, авиационная отрасль, гражданская и военная авиация, комплексный подход, направления исследования авиации.

Annotation: the article examines the relevance of social and humanitarian research in aviation, analyzes the degree of knowledge of the historical, socio-economic, philosophical, cultural and other humanitarian aspects of the development of the aviation industry in Belarus. The authors note the productivity of using an integrated approach in aviation humanities and outline some key areas of social and humanitarian study of the country's aviation complex.
Keywords: social and humanitarian problems in aviation, aviation humanities, aviation industry, civil and military aviation, an integrated approach, areas of aviation research.

Долгое время социально-гуманитарные исследования авиации Беларуси не представляли собой отдельного направления в научной литературе. Социально-гуманитарные аспекты функционирования авиационной отрасли нашей страны частично затрагивались в историко-панорамных хроникальных обзорах развития авиационного комплекса СССР, в частности, в работах И. Г. Дроговоза, Г. Ф. Безбородова, А. Ф. Аксенова, В. С. Дегтева и других исследователей [6, 10, 13, 17, 22]. В СССР, составной частью которого являлась БССР, изучению развития авиации, в том числе историко-панорамному хроникально-обзорному, придавалось первостепенное значение: советская авиация занимала передовые

позиции в мире, а многие типы воздушных судов и сегодня считаются лучшими. В последние десятилетия, когда Беларусь стала суверенным, независимым государством, историко-панорамные хроникально-обзорные исследования развития авиационной отрасли, функционирования отдельных авиационных организаций и предприятий страны были продолжены такими исследователями, как В. А. Теляков, Г. М. Русак, Н. Б. Щавлинский, Н. А. Сидорович, А. И. Науменко, К. А. Шумский, А. А. Гурецкий, А. А. Шегидевич, А. В. Жибуль и другими [9, 11, 14, 20, 24–27, 34, 35, 40–46]. В контексте современных интегративных междисципли-

нарных исследований следует отметить, что обзорное познание истории смены технологических укладов в авиационной отрасли Беларуси, установление хроники событий и определение периодизации развития всей отрасли или отдельных авиационных организаций и предприятий становится явно недостаточным. За годы своего существования авиация широко вошла в различные области жизнедеятельности человека, стала многогранным феноменом общественной жизни, определяющим развитие не только собственно гражданской транспортной системы или армии, но и практически всех кластеров экономики. Значительно сегодня влияние авиации в сферах политической жизни и социальных

коммуникациях, в туризме, деятельности подразделений по ликвидации чрезвычайных ситуаций, лесной промышленности. Это первый аргумент, определяющий актуальность заявленной проблематики исследования.

Анализ истории технико-технологической парадигмы развития авиации был бы неполным без определения тех социокультурных, т. е. исторических, социально-политических, экономических, экологических, культурологических и иных гуманитарных контекстов, в русле которых развитие авиационной техники и всех ее составляющих происходило, которыми в значительной степени и обуславливалось. Следует признать фактическую нереализованность в полной мере в анализе специальных проблем развития авиационной отрасли Беларуси комплексного подхода, позволяющего не только восполнить или уточнить имеющиеся пробелы в изучении функциональной динамики транспортно-технической базы авиационных организаций и предприятий, но и выявить системную парадигму развития последних. Социально-гуманитарное познание отрасли в этом плане необходимо для адекватного решения проблем совершенствования инфраструктуры и средств воздушных перевозок, выработки системного подхода к пониманию развития авиации Беларуси.

Аргументом, определяющим актуальность социально-гуманитарного научного дискурса в области исследования авиации, выступает также фактор образовательный, обучающе-воспитательный. Без знания социокультурных аспектов развития авиационной техники невозможно профессиональное и личностное становление современного авиационного специалиста. Лица, задействованные в гражданской и военной авиации, должны знать свои профессиональные традиции, иметь представление о всех значимых событиях, явлениях и процессах истории гражданской и военной авиации, этапах ее становления и развития, конструкторах и летчиках, внесших весомый вклад в развитие отрасли. Авиаспециалисту необходимо уметь теоретически осмысливать

и анализировать имевшее место и современное состояние отрасли.

В рамках образовательного контекста важно также принять во внимание то, что в век неклассического технического знания, когда социально-гуманитарные компоненты обязательно должны быть применены в создании и эксплуатации любых технических систем, необходимо эти социально-гуманитарные факторы функционирования авиационной техники принципиально знать, чтобы иметь возможность научить авиационных специалистов учитывать их в работе.

В контексте вышесказанного крайне важны фундаментальные системно-аналитические социально-гуманитарные исследования авиационной отрасли, обеспечивающие теоретико-методологическое познание отечественной авиации как феномена.

В российской авиационной гуманитаристике последних лет в этом плане показателна научная рефлексия социокультурных факторов в рамках всестороннего анализа феномена авиации, заявленная в диссертационном исследовании В. В. Кочурина. В качестве предмета познания он определил социально-философские аспекты создания и совершенствования авиации, как одного из важнейших условий развития российской гражданской авиации в условиях перестроечных процессов, развала СССР и обретения республикой независимости. Ученый подробно описывает те трудности, с которыми столкнулась белорусская гражданская авиация на пути обретения самостоятельного пути развития. Основное содержание монографии отводится анализу основных направлений развития гражданской авиации республики на современном этапе: деятельности авиакомпаний «Белавиа» и «Трансавиаэкспорт», главным воздушным воротам республики — Национальному аэропорту «Минск», авиаремонтной отрасли, Белорусской государственной академии авиации и отличающейся наиболее динамичным развитием «Белаэронавигации».

Среди появившихся в последние десятилетия системно-аналитических работ белорусских авторов в контексте заявленной проблематики обращают на себя внимание в первую очередь исследования Н. Б. Щавлинского. Неоспоримым достоинством их является рассмотрение истории авиационной техники, авиационных организаций, предприятий и объектов во включенности авиации в жизнь общества, анализ феномена авиации как элемента белорусской национальной культуры. Значимость работ Н. Б. Щавлинского усиливает использование архивных источников, введение новых архивных данных.

В 2005 г. была опубликована книга «Белорусская гражданская авиация в годы становления и в период Великой Отечественной войны (1923 — 1945 гг.)», в которой автор проанализировал вопросы

становления отрасли гражданской авиации в Беларуси, включая военный период [42]. В 2011 г. появилась книга «История создания и развития гражданской авиации Беларуси (1933 — середина 1980-х гг.)», в которой Н. Б. Щавлинский систематизировал весь исторический путь белорусской гражданской авиации [43]. Развитию гражданской авиации Беларуси с середины 1980-х годов до 2015-го года — периоду, наименее изученному в современной белорусской исторической науке, — посвящена монография Н. Б. Щавлинского «На переломе эпох: развитие гражданской авиации Беларуси в конце XX — начале XXI вв.», изданная в 2017 г. [44]. В книге исследователь обратился к материалам Национального архива Республики Беларусь, Государственного архива Минской области, Национальной компании «Белавиа», Национальной книжной палаты Республики Беларусь, использовал публикации в периодической печати, материалы различных авиационных организаций и органов власти, — все это позволило в итоге достаточно глубоко проанализировать общественно-политические и социально-экономические контексты развития белорусской гражданской авиации в условиях перестроечных процессов, развала СССР и обретения республикой независимости. Ученый подробно описывает те трудности, с которыми столкнулась белорусская гражданская авиация на пути обретения самостоятельного пути развития. Основное содержание монографии отводится анализу основных направлений развития гражданской авиации республики на современном этапе: деятельности авиакомпаний «Белавиа» и «Трансавиаэкспорт», главным воздушным воротам республики — Национальному аэропорту «Минск», авиаремонтной отрасли, Белорусской государственной академии авиации и отличающейся наиболее динамичным развитием «Белаэронавигации».

В работах, посвященных истории создания и развития авиакомпании «Трансавиаэкспорт» [41], Национального аэропорта «Минск» [46], используя документальные источники На-

ционального архива Республики Беларусь, Н. Б. Щавлинский остановился на самых значительных, ключевых событиях в истории крупнейших авиапредприятий Беларуси. Вышедшая в 2006 г. книга «Национальная компания «Белавиа» — результат проделанной автором работы по анализу зарождения и развития авиапредприятия, исследованию основных сфер его жизнедеятельности [45].

В 2019 г. под общей редакцией А. А. Шегидевича и О. М. Борздовой была опубликована коллективная монография «Белорусская государственная академия авиации: история и перспективы развития (к 45-летию со дня основания)», написанная на основе архивных данных. Книга стала основательным научно-аналитическим трудом, посвященным истории создания, становления, развития и совершенствования национальной школы подготовки авиационных кадров от Минского авиационного технического училища гражданской авиации до учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации». Монография содержит материалы, в которых в диахронном ключе целостно представлена история учреждения высшего образования и ее структурных подразделений, формирования и развития учебной авиационно-технической базы учреждения в контексте складывавшихся социокультурных реалий [8].

Всестороннему анализу экономических аспектов развития авиационной отрасли Беларуси, отраслевой системы управления в гражданской авиации в условиях рыночных отношений посвящены работы А. И. Науменко и Ф. Ф. Иванова [21, 27, 28]. Ф. Ф. Ивановым, в частности, в монографии, изданной в 2006 г., системно исследовано состояние развития воздушного транспорта Республики Беларусь и дано обоснование основных направлений его развития. Исследуя функционирование авиации Беларуси в условиях старения имеющегося парка самолетов, ограничений со стороны стран Евросоюза на полеты в Западную Европу, а также высокой конкуренции на рынках авиаперевозок, произведя анализ производственно-финансовых результатов работы

авиапредприятий и отрасли в целом, Ф. Ф. Иванов обосновывает перечень показателей, которые характеризуют эффективность развития гражданской авиации, и выводит основные направления развития гражданской авиации в условиях рыночных отношений. Проведенный анализ подводит исследователя к выводу о необходимости создания внебюджетного отраслевого фонда развития гражданской авиации с разработкой механизма его оптимального распределения между предприятиями гражданской авиации. В монографии, кроме содержательного описания функционирования гражданской авиации, приводится также формальная схема функционирования гражданской авиации и формальная модель управления ею. Анализируя используемые в гражданской авиации информационные технологии, Ф. Ф. Иванов дает обоснование основных направлений по созданию отраслевой информационной системы [21].

Взаимосвязь развития авиации с современной белорусской экономикой и государственным управлением была отражена в «Государственной программе развития гражданской авиации Республики Беларусь на 2006 — 2010 годы» (далее — Программа) [30], в которой в качестве приоритетного направления было определено развитие таких предприятий отрасли, как РУП «Белавиа», ОАО «Авиакомпания «Белавиа», РУП «Национальный аэропорт «Минск», РУП «Минский авиаремонтный завод», а также областных аэропортов. Выделение вышеперечисленных предприятий авиационной отрасли в качестве приоритетных должно было стабилизировать и даже повысить экономичность авиатранспортного процесса и создать условия, при которых качество авиаперевозок авиакомпаний страны удовлетворяло бы международным требованиям. На эффективность развития гражданской авиации республики, согласно Программе, оказывают влияние и внешние (высокие темпы роста цен на авиационное топливо, высокие цены продаж новой авиационной техники, технические и экологические ограничения и т. д.), и внутренние факторы (ограни-

ченный уровень платежеспособного спроса населения, конкуренция со стороны наземных видов транспорта, финансовое состояние авиационных организаций). Но, занимая выгодное географическое положение, находясь на перекрестке восточноевропейских путей, замечено в Программе, наша республика имеет экономические предпосылки для наращивания объемов авиаперевозок.

Системный анализ различных социально-гуманитарных аспектов развития авиационной отрасли Беларуси находит отражение в докладах участников постоянных международных научно-практических конференций и семинаров, проводимых с 2016 г. в учреждении образования «Белорусская государственная академия авиации» [1 — 5, 7, 31, 36 — 39].

Общую картину историко-культурной обусловленности становления и развития инфраструктуры и средств воздушных перевозок подразделений военной авиации Беларуси дают возможность создать исследования Г. В. Доротько «Состав и базирование авиации Вооруженных Сил СССР на территории Белорусского военного округа (1945 — 1992 гг.)» [15], «Состав и базирование государственной авиации Республики Беларусь (1992 — 2020 гг.)» [16]; книга А. И. Давыдова «Меч Минского неба» [12]; статья Д. А. Дьякова «Развитие организационной структуры 26-й воздушной армии в период 1960 — 1992 гг.» [19]; книга Д. А. Дьякова, Д. Киенко, В. Марчука «Дважды награжденный, родной Краснознаменный» [18] и некоторые другие работы.

В контексте социокультурного осмысления проблем развития авиаотрасли Беларуси обращают на себя внимание литературно-художественные публикации. Речь идет о двух текстах: книге Е. П. Нестерович «Небо: история любви», изданной в 2008 г. [29], и воспоминаниях одной из первых белорусских бортпроводниц Александры Владимировны Сеньковой «Мгновения из жизни стюардесс» (2015) [33]. Адресованные широкому кругу читателей, эти работы с необычных ракурсов и точек зрения раскрывают историю зарождения и становления, каждо-

дневного функционирования белорусской авиации.

Так, книга А. В. Сеньковой знакомит с одной из самых романтичных авиационных профессий — профессией бортпроводницы. Белорусские бортпроводники, подчеркивает А. В. Сенькова, отмечают день рождения своей профессии дважды в год: 12 июля со всем миром празднуют всемирный день бортпроводника гражданской авиации, а 2 августа отмечают рождение своей профессии на белорусской земле (2 августа 1954 г. две белорусские стюардессы были зачислены в эскадрилью пилотов в качестве бортпроводников). «Женская» профессия, появившаяся благодаря развитию гражданской авиации, только со стороны романтична, через будни и реальность автор представляет ее совершенно иной. А. В. Сенькова показывает, как менялись основные требования к умениям и навыкам бортпроводниц. Приятная внешность, отличное здоровье, прекрасное владение английским языком, стрессоустойчивость — только необходимый минимум для трудоустройства бортпроводником. Одна из главнейших задач бортпроводника — обеспечение безопасности пассажиров в полете. В современных условиях, по мнению А. В. Сеньковой, одним из основных требований к соискателям профессии бортпроводника является владение иностранным языком, понимание, что стюардесса — это работник службы сервиса, но сервиса особого — со знанием как технических характеристик самолета (от веса, размера самолета, размаха крыльев), так и психологических особенностей поведения в критических ситуациях, со знанием того, как сервировать стол и того, как выживать в нестандартных ситуациях [33].

Е. П. Нестерович в своей книге [29] рассказывает не только о людях, посвятивших себя авиации, но и обращается к анализу исторических событий. Поэтому в тексте широко используются фотографии как из частных коллекций, так и из архивов музеев Минского и Оршанского авиаремонтных заводов, Белорусской государственной академии авиации, Врачебной летной экспертной комиссии гражданской авиации. Автор описывает,

как в 1923 г. создавалось в Беларуси Общество друзей воздушного флота, а затем в 1925 г. — Общество друзей авиационной и химической промышленности (Авиахим БССР) — предтеча ДОСААФ. Останавливается Е. П. Нестерович и на истории Минского аэроклуба — одного из старейших белорусских аэроклубов (основан в 1934 г.). На страницах книги можно найти историю двух аэропортов Минска («Минск-1» и «Национального аэропорта «Минск»). Автор также описывает историю Республиканского авиационного унитарного предприятия «Аэропорт «Гомель-виа» с момента его создания 27 января 1944 г. Не обошла вниманием Е. П. Нестерович и «историю в людях» Минского объединенного авиационного отряда, Белорусской государственной академии авиации, авиакомпаний «Белавиа» и «Трансaviaэкспорт». В книге уделено место и истории авиационной медицины Беларуси.

Значительный интерес в ходе фундаментальных социально-гуманитарных исследований отечественной авиации при объективном подходе могут представлять материалы по истории авиации, размещенные на интернет-ресурсах, особенно материалы сайта «Белорусский авиадневник» [32].

Целостному анализу социально-гуманитарных контекстов развития авиационной отрасли Беларуси была посвящена выполнявшаяся на протяжении 2017–2022 гг. инициативная научно-исследовательская работа (НИР) кафедры социально-гуманитарных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации» на тему «Социокультурные аспекты развития авиационной техники и общества», номер госрегистрации 20180918 от 14.06.2018. Задание на выполнение НИР было разработано в соответствии с приоритетными направлениями научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденными Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 22.04.2015 № 166 «Информационно-коммуникационные и авиакосмические технологии», а также подпрограммой 13.1 «История и культура», выполнявшейся в рамках Государственной программы научных ис-

следований на 2016–2020 гг. «Экономика и гуманитарное развитие белорусского общества», утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 483 от 10.06.2015.

Объектом исследования в вышеназванной инициативной НИР выступали гражданская и военная авиация Беларуси в исторической динамике развития. Предметом исследования — социокультурное содержание, социокультурные контексты развития авиационной отрасли Беларуси в исторической динамике времени. В качестве цели НИР была обозначена систематизация социокультурных аспектов развития авиационной техники и общества, раскрытие их сущностного содержания и форм.

На первом этапе авторы-разработчики НИР сосредоточили свое внимание на уточнении основных теоретико-методологических подходов, исследовании основных этапов становления и развития национальной школы подготовки авиаспециалистов. На втором этапе обратились к выявлению и обобщению исторических контекстов развития авиационной техники в Беларуси. На третьем этапе были изучены политико-экономические аспекты развития авиационной техники и общества. На четвертом — проанализированы позитивные социокультурные традиции, определяющие развитие авиационной отрасли Беларуси на современном этапе в целях совершенствования подготовки авиаспециалистов.

Материалы исследования использованы в ходе преподавания в Белорусской государственной академии авиации таких учебных курсов, как «История воздухоплавания, авиации и космонавтики», «История Беларуси (в контексте европейской цивилизации)», «Экономическая теория», «Экономика отрасли», «Социология» и других; при изучении тем, связанных с историей авиационных организаций Республики Беларусь в системе подготовки авиаспециалистов в аэроклубах ДОСААФ Республики Беларусь. Авторы надеются, что проведенное исследование позволит решать новые теоретико-методологические и прикладные задачи в изучении транспортно-технической базы авиационных организаций,

предприятий и объектов, а также в других предметных областях, а достигнутые результаты в области изучения социокультурных аспектов развития авиационной отрасли Беларуси будут способствовать формированию и развитию современной авиационной гуманитаристики, прикладных социально-гуманитарных исследований.

Таким образом, анализ актуальных производственных технико-технологических проблем в сферах гражданской и военной авиации Беларуси, принятие адекватных и точных решений, связанных с функционированием авиационной отрасли в целом и отдельных организаций, предприятий, объектов, невозможно без анализа социокультурной парадигмы динамики отрасли. Развитие авиационной техники и технологий происходило в контекстах различных социокультурных, т. е. исторических, социально-политических, экономических, экологических, культурологических и иных складывавшихся гуманитарных сред, под воздействием которых в значительной степени формировалось и которыми обуславливалось.

В этом плане накопленные научно-исторические данные и материалы, массивы информации, затрагивающие вопросы функционирования авиации Беларуси, позволяют делать объективные выводы и выявлять определенные закономерности в контексте требующего внимания комплексного подхода в исследовании авиационной отрасли страны.

По мнению авторов, приоритетными и перспективными в дальнейшем являются следующие направления системно-аналитических социально-гуманитарных исследований авиационной отрасли Беларуси:

1. Исследование социально-экономических проблем авиационной отрасли. Цель: 1) изучение актуальных проблем функционирования социальной сферы и экономики авиационной отрасли в контекстах инновационного развития мира и белорусского общества; 2) анализ проблем управления в сфере гражданской авиации; 3) изучение алгоритмов формирования ресурсной базы и развития человеческого потенциала гражданской авиации; 4) анализ бизнес-комму-

никаций в сфере гражданской авиации, проблем логистики авиационных перевозок.

2. Анализ тенденций исторической динамики авиационной отрасли, отдельных авиационных организаций и предприятий. Цель: 1) учет историко-культурных контекстов совершенствования работы отрасли; 2) изучение опыта функционирования авиационных организаций и предприятий, авиационных объектов в исторической динамике времени и выявление характерных условий их позитивного развития; 3) познание инновационных результатов деятельности выдающихся авиаторов (авиаинженеры, инженеры, организаторы производств).

3. Разработка алгоритмов музейфикации истории авиации, проблем мемориализации авиационных артефактов. Цель: 1) анализ путей и инструментов сохранения и преумножение историко-культурной памяти в авиационной отрасли; 2) определение способов аккумуляции материальных артефактов и духовных традиций, сформировавшихся в ходе историко-функционального развития авиации; 3) изучение возможных аспектов трансляции позитивного культурного опыта функционирования гражданской и военной авиации.

4. Философско-культурологические исследования в авиации. Цель: 1) определение места и роли авиации в жизни общества; 2) прогнозирование тенденций возможного развития авиационной отрасли в условиях меняющейся социальной реальности; 3) учет и анализ аспектов межкультурной коммуникации в различных средах авиационной деятельности; 4) изучение проблем развития авиатуризма, авиационных видов спорта, культурной семиотики в авиации.

5. Изучение тенденций развития авиационного образования. Цель: 1) анализ проблем совершенствования профильной подготовки кадров на современном этапе; 2) научный мониторинг тенденций модернизации авиационного образования; 3) изучение возможностей сотрудничества авиационных организаций в целях совершенствования практикоориентированности образовательного процесса; 4) анализ актуальных проблем авиационной психологии и педагоги-

ки, аспектов реализации человеческого фактора в авиации.

В социально-гуманитарных исследованиях авиационной отрасли в сравнительном историко-культурном аспекте важно учесть становление и развитие следующих авиационных артефактов и комплексов: авиакомпании Республики Беларусь; аэродромы и аэропорты на территории Беларуси; авиаотряды гражданской авиации в советский период; типы летательных аппаратов, воздушных судов, эксплуатировавшихся или эксплуатируемых в Беларуси; авиапамятники на территории Беларуси; авиастроения в Беларуси; авиаремонтная отрасль республики; летательные аппараты, используемые в качестве учебных средств и пособий; авиационные музеи и авиационные музейные экспозиции на территории Беларуси; авиационные учебные заведения; авиация ДОСААФ (аэроклубы); авиация ГАИ, МЧС и других ведомств; частная авиация; авиационные средства массовой информации (СМИ).

Если говорить, в частности, об исследовании авиакомпаний Республики Беларусь, то очевидно, что многие из них находятся вне социально-гуманитарного научного анализа в принципе. Есть малоизвестные авиакомпании, которые просуществовали после распада СССР только на протяжении 1990-х гг., исчезнув по экономическим причинам. Практически не упоминаются в исследованиях белорусской авиации авиакомпании «РубиСтар», «Genex», «BySky», «Rada airlines». Данные авиакомпании имеют сравнительно небольшой парк воздушных судов, однако являются частью отечественной авиационной отрасли. Отдельных исследований по направлению деятельности каждой авиакомпании не ведется.

На данный момент нет исторически обоснованного перечня аэродромов и аэропортов Беларуси. Не изучены также особенности динамики инфраструктуры данных авиационных объектов.

Как известно, во времена СССР единая авиакомпания «Аэрофлот» состояла из управлений гражданской авиации, выделенных по территориальному признаку. Управления, в свою очередь, вклю-

чали в себя авиационные отряды. На данный момент структура авиационных отрядов Белорусского управления гражданской авиации (БУГА), годы их существования, парк воздушных судов, обслуживаемые маршруты требуют систематизации и уточнения. Самая изученная тема — это Минский объединенный авиационный отряд, остальные отряды изучены в меньшей мере, про некоторые авиационные отряды информация практически отсутствует.

Отдельным объектом в рамках социально-гуманитарных исследований авиации Беларуси являются летательные аппараты, воздушные суда. Отследив динамику развития средств воздушных перевозок, можно установить, какими возможностями обладала авиация на всех этапах своего существования, и каковы возможные пути повышения эффективности работы отечественных авиационных организаций. Так, на начало 1960-х гг. на воздушных линиях республики широко эксплуатировались поршневые самолеты, а спустя 10 лет основную массу составляли турбовинтовые и реактивные машины. С 1990-х гг. весь парк был представлен самолетами советского производства. В 2003 г. появились первые западные машины, а с 2017 г. парк белорусских пассажирских авиаперевозок стал полностью состоять из самолетов западного производства.

Актуальна тема мемориализации авиационных артефактов. В послевоенный период в СССР начали появляться воздушные суда, которые были списаны из эксплуатации и впоследствии стали авиапамятниками. Как правило, местом для установки авиапамятников оказывались территории воинских частей. В начале 1990-х гг. мемориальных самолетов и вертолетов стало намного больше в связи с происходившим массовым сокращением Военно-воздушных Сил. В 2000-х гг., когда начался поиск экспонатов для планируемого музея авиационной техники в Минске, на проблему авиапамятников обратили пристальное внимание работники Центрального аэроклуба ДОСААФ. В ходе поиска удалось собрать приблизительную информацию о количестве и расположении списанных и/или ме-

мориализованных летательных аппаратов. Считалось, что общее их количество — 60–70 единиц. В дальнейшем, благодаря налаживанию контактов с местными жителями тех или иных населенных пунктов, удалось найти еще несколько десятков подобных летательных аппаратов. На данный момент по всей стране установлено более 150 самолетов и вертолетов-авиапамятников. Однако до сих пор процесс их мемориализации, хронология событий, связанная с этим, практически неизвестны.

С мемориализацией авиационных артефактов тесно связаны проблемы музеефикации истории отрасли. Музеи и экспозиции авиационной тематики появились в Беларуси еще во времена СССР. Одной из таких площадок стал музей в г. Лида Гродненской обл., открытый в 1985 г. Музей имел двухэтажное здание, в нем размещалась экспозиция, посвященная авиации и истории прославленной авиационной дивизии, в которой за время войны прошли службу 77 Героев Советского Союза. У лидского музея авиации была своя экспозиция техники, состоявшая из семи самолетов. Сегодня в Беларуси существуют такие авиационные музеи, как Музей авиационной техники в п. Боровая Минского аэроклуба ДОСААФ, Музей П. О. Сухого в г. Глубоком, Музей гражданской авиации на улице Короткевича в г. Минске и некоторые другие. Кроме этого, есть музеи с экспозициями авиационной направленности, как например, Музей Великой Отечественной войны в Минске, Линия Сталина, Музей Боевой Славы в г. Гомеле. На данный момент нет полного перечня подобных объектов. Исследование темы авиационных музеев и экспозиций позволит не только восполнить пробелы в исторической науке, но и содействовать развитию авиационного туризма.

Перспективно изучение авиационных объектов в Беларуси. Сегодня мало кто знает, что непродолжительное время Минский тракторный завод выпускал истребители, а в послевоенное время начал делать трактора. Данный факт заслуживает изучения и увековечения в истории нашей авиации. До войны в Могилеве существовал моторо-

строительный завод, который делал авиационные двигатели, но в начале войны он был эвакуирован. Возможно, на территории Беларуси существовали и другие авиационные предприятия.

Самолеты и вертолеты после окончания летной жизни не всегда разделяются на металлолом или устанавливаются как авиапамятники, часть из них служит в качестве учебных средств и пособий для отработки практических умений и навыков курсантами и слушателями авиационных учебных заведений, работниками авиационных служб. Содержательным в данном направлении стало изучение истории летательных аппаратов учебно-технической базы Минского авиационного технического училища гражданской авиации — БГАА, которые на протяжении многих десятков лет служили и служат делу обучения молодых авиаторов [8, с. 159–172]. Не менее актуальна тема использования летательных аппаратов в качестве учебных средств и пособий в других авиационных организациях различных ведомств.

Нуждается в дальнейшем исследовании проблема авиационных учебных заведений. В 1974 г. в г. Минске было создано Минское авиационное техническое училище гражданской авиации, на данный момент имеющее статус академии. Как правило, говоря об авиационном образовании в Беларуси, называют это учебное заведение, однако еще в довоенное время в Гомеле было развернуто Военное аэрофотограмметрическое училище, просуществовавшее до начала Великой Отечественной войны. Таким образом, история авиационных учебных заведений на территории Беларуси имеет более давнюю историю.

Авиация ДОСААФ, ГАИ, МЧС, других ведомств, частная авиация — темы для гуманитаристики Беларуси не новые, но также требующие системно-аналитических исследований. Если изучать, например, авиационный парк аэроклубов ДОСААФ, то станет очевидным, что на данный момент не отслежена динамика развития парка (сколько было самолетов и вертолетов на начало 1990-х гг., как за это время менялся авиапарк); не рассмотрены тенденции развития аэроклубов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авиация: современность, перспективы развития и история : сборник материалов I Международной заочной научно-практической конференции УО БГАА, г. Минск, 20–23 декабря 2016 г. / сост. А. А. Говин [и др.]; под науч. ред. Г. Ф. Ловшенко. — Минск : БГАА, 2016. — 475 с.
2. Авиация: история, современность, перспективы развития : сборник материалов II Международной заочной научно-практической конференции БГАА, г. Минск, 9–10 ноября 2017 г. / сост. М. А. Бабицкая [и др.]; под науч. ред. Г. Ф. Ловшенко. — Минск : БГАА, 2017. — 269 с.
3. Авиация: история, современность, перспективы развития : сборник материалов III Международной заочной научно-практической конференции БГАА, г. Минск, 8–9 ноября 2018 г. / ред. М. В. Кудин [и др.]; под науч. ред. А. А. Шегидевича. — Минск : БГАА, 2018. — 389 с.
4. Авиация: история, современность, перспективы развития : сборник материалов IV Международной научно-практической конференции БГАА, г. Минск, 24 октября 2019 г. / под науч. ред. А. А. Шегидевича. — Минск : Национальная библиотека Беларуси, 2020. — 329 с.
5. Авиация: история, современность, перспективы развития : сборник материалов V Международной научно-практической конференции БГАА, г. Минск, 22 октября 2020 г. / ред. А. А. Жукова [и др.]; под науч. ред. А. А. Шегидевича. — Минск : БГАА, 2021. — 901 с.
6. Аксенов, А. Ф. Гражданская авиация СССР / А. Ф. Аксенов. — М. : Знание, 1973. — 64 с.
7. Актуальные проблемы и перспективы развития авиации : сборник материалов II Международной научно-практической конференции БГАА, г. Минск, 25–26 апреля 2018 г. / сост. А. В. Дубовский [и др.]; под науч. ред. Г. Ф. Ловшенко. — Минск : Национальная библиотека Беларуси, 2018. — Ч. 1. — 332 с.
8. Белорусская государственная академия авиации: история и перспективы развития (к 45-летию со дня основания) / А. А. Шегидевич [и др.]; под общ. ред. А. А. Шегидевича и О. М. Борздовой. — Минск : Колорград, 2019. — 180 с.
9. Возрождая полет: 65 лет Минскому заводу гражданской авиации № 407 / авт.-сост. А. В. Жибуль. — Минск : БЕЛТА, 2018. — 166 с.
10. Гражданская авиация СССР 1917–1967 / под ред. Г. Ф. Безбородова. — М. : Транспорт, 1968. — 320 с.
11. Гурецкий, А. А. У истоков национальной школы подготовки авиаспециалистов / А. А. Гурецкий, А. А. Шегидевич // Наука и инновации. — 2019. — № 9. — С. 11–14.
12. Давыдов, А. И. Меч Минского неба / А. И. Давыдов. — Смоленск : Хартекс, 2015. — 187 с.
13. Дегтев, В. С. Крылья Белоруссии / В. С. Дегтев. — Минск : Беларусь, 1973. — 151 с.
14. Дорога в небо: полувековая летопись Минского авиаремонтного завода / авт.-сост. В. А. Теляков. — Минск : Минская фабрика цветной печати, 2003. — 224 с.
15. Доротыко, Г. Состав и базирование авиации Вооруженных Сил СССР на территории Белорусского военного округа (1945–1992 гг.) / Г. Доротыко. — Минск : Б. и., 2020. — 78 с.
16. Доротыко, Г. Состав и базирование государственной авиации Республики Беларусь (1992–2020 гг.) / Г. Доротыко. — Минск : Б. и., 2021. — 62 с.
17. Дроговоз, И. Г. Воздушный щит страны Советов / И. Г. Дроговоз. — Минск : Харвест, 2003. — 448 с.
18. Дьяков, Д. А. Дважды награжденный, родной Краснознаменный / Д. Дьяков, Д. Киенко, В. Мирчук. — Гродно : Хата, 2011. — 76 с.
19. Дьяков, Д. А. Развитие организационной структуры 26-й воздушной армии в период 1960–1992 гг. / Д. А. Дьяков // Военно-исторический журнал. — 2019. — № 4. — С. 12–17.
20. Земля и небо рядом: 80-летию гражданской авиации Республики Беларусь посвящается / авт.-сост. В. А. Теляков. — Минск : Кавалер, 2013. — 296 с.
21. Иванов, Ф. Ф. Исследование проблем развития гражданской авиации в условиях рыночных отношений / Ф. Ф. Иванов. — Минск : «ИВЦ Минфина», 2006. — 72 с.
22. История отечественной гражданской авиации. — М. : Воздушный транспорт, 1996. — 584 с.
23. Кочурин, В. В. Социокультурный феномен российской авиации: социально-философское осмысление / В. В. Кочурин [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.disserscat.com/content/sotsiokulturnyi-fenomen-rossiiskoi-aviatsii-sotsialno-filosofskoe-osmyslenie#ixzz5UEUjvZi6>. — Дата доступа: 14.10.2018.
24. Краткая летопись Минского государственного высшего авиационного колледжа / авт.-сост. Г. М. Русак. — Минск : МГВАК, 2002. — 70 с.
25. Набирая высоту... (85 лет гражданской авиации Республики Беларусь) / сост. О. М. Борздова, К. А. Шумский, И. В. Сикорский [и др.]. — Минск : Изд. дом «Проф-Пресс», 2018. — 224 с.
26. Надежные крылья гражданской авиации: 40-летний рубеж. — Минск : ОАО «Онорэ», 2013. — 25 с.
27. Науменко, А. И. Основные итоги работы транспортного комплекса Республики Беларусь за 2017 год / А. И. Науменко // Социально-гуманитарные аспекты развития общества и авиационной отрасли : сборник статей и материалов Республиканского научного семинара кафедры социально-гуманитарных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», г. Минск, 7 мая 2018 г. / сост. В. Н. Сивицкий, К. А. Шумский. — Минск : БГАА, 2018. — С. 106–112.
28. Науменко, А. И. По вопросу организации региональных перевозок воздушным транспортом в Республике Беларусь / А. И. Науменко // Актуальные проблемы и перспективы развития авиации : сборник материалов Международной научно-практической конференции БГАА, г. Минск, 8–9 июня 2017 г. / сост. А. А. Говин [и др.]; под науч. ред. Г. Ф. Ловшенко. — Минск : Национальная библиотека Беларуси, 2018. — С. 140–143.
29. Нестерович, Е. П. Небо: история любви: к 75-летию гражданской авиации Республики Беларусь / Е. П. Нестерович. — Минск : Медиафакт, 2008. — 304 с.
30. О государственной программе развития гражданской авиации Республики Беларусь на 2006–2010 годы: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 27 апреля 2006 г., № 557 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://pravo.kulichki.com/zak/new03/newc0715.htm>. — Дата доступа: 24.10.2018.
31. Проблемы современного авиационного образования : сборник материалов международной заочной научно-методической конференции БГАА, г. Минск, 23 марта 2018 г. / сост. И. И. Белекало [и др.]; под науч. ред. Г. Ф. Ловшенко. — Минск : БГАА, 2018. — 231 с.
32. Белорусский авиадневник [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://aircraft-museum.ucoz.ru>. — Дата доступа: 04.11.2021.
33. Сенькова, А. В. Мгновения из жизни стюардесс / А. В. Сенькова. — Минск : Ковчег, 2015. — 336 с.
34. Сидорович, Н. А. Краткая история воздухоплавания, авиации и освоения космоса : учеб. пособие по курсу «Основы авиации» / Н. А. Сидорович. — Минск : МГВАК, 2007. — 167 с.
35. Сквозь облака и годы: 70-летию гражданской авиации Республики Беларусь посвящается / авт.-сост. В. А. Теляков. — Минск : Минская фабрика цветной печати, 2003. — 272 с.
36. Социально-гуманитарные аспекты развития общества и авиационной отрасли : сборник статей и материалов Республиканского научного семинара кафедры социально-гуманитарных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», г. Минск, 7 мая 2018 г. / сост. В. Н. Сивицкий, К. А. Шумский. — Минск : БГАА, 2018. — 132 с.
37. Социально-гуманитарные аспекты развития общества и авиационной отрасли : сборник статей и материалов Международной научно-практической конференции кафедры социально-гуманитарных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», г. Минск, 16 мая 2019 г. / сост. В. Н. Сивицкий, Е. А. Волк; под общ. ред. В. Н. Сивицкого; Белорусская государственная академия авиации. — Минск : БГАА, 2020. — 143 с.
38. Социально-гуманитарные аспекты развития общества и авиационной отрасли : материалы Международной научно-практической конференции, г. Минск, 22 мая 2020 г. / под науч. ред. А. А. Шегидевича. — Минск : Национальная библиотека Беларуси, 2020. — 294 с.
39. Социально-гуманитарные аспекты развития общества и авиационной отрасли : сборник материалов II Международной научно-практической конференции учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», г. Минск, 20–21 мая 2021 г. / ред. совет: А. А. Жукова [и др.]; под науч. ред. А. А. Шегидевича. — Минск : Национальная библиотека Беларуси, 2021. — 355 с.
40. Шумский, К. А. Великая Отечественная война и ее отражение в сознании будущих авиаспециалистов / К. А. Шумский // Актуальные проблемы и перспективы развития авиации : материалы Международной научно-практической конференции, г. Минск, 8 июня 2017 г. / УО «Белорусская государственная академия авиации». — Минск : БГАА, 2017. — С. 107–109.
41. Шавлинский, Н. Б. Авиакомпания «Трансавиаэкспорт» — основной авиационный перевозчик Республики Беларусь и официальный перевозчик Организации Объединенных Наций / Н. Б. Шавлинский // Вестник БрГТУ. — 2017. — № 6. — С. 79–82.
42. Шавлинский, Н. Б. Белорусская гражданская авиация в годы становления и в период Великой Отечественной войны (1923–1945 гг.) / Н. Б. Шавлинский. — Минск : РИВШ, 2005. — 54 с.
43. Шавлинский, Н. Б. История создания и развития гражданской авиации Беларуси (1933 — середина 1980-х гг.) / Н. Б. Шавлинский. — Минск : БГАТУ, 2011. — 188 с.
44. Шавлинский, Н. Б. На переломе эпох: развитие гражданской авиации Беларуси в конце XX — начале XXI в. / Н. Б. Шавлинский. — Минск : БГАТУ, 2017. — 162 с.
45. Шавлинский, Н. Б. Национальная компания «Белавиа» / Н. Б. Шавлинский. — Минск : Маджик бук, 2006. — 208 с.
46. Шавлинский, Н. Б. Национальный аэропорт «Минск»: 30 лет с вами / Н. Б. Шавлинский. — Минск : Адукацыя і выхаванне, 2013. — 80 с.

REFERENCES

1. Aviation: modernity, development prospects and history: a collection of materials of the I International Correspondence Scientific and Practical Conference of the UO BGAA, Minsk, December 20–23, 2016 / comp. A. A. Govin [and others]; under scientific ed. G. F. Lovshenko. – Minsk: BGAA, 2016. – 475 p.
2. Aviation: history, modernity, development prospects: collection of materials of the II International Correspondence Scientific and Practical Conference of the BGAA, Minsk, November 9–10, 2017 / comp. M. A. Babitskaya [and others]; under scientific ed. G. F. Lovshenko. – Minsk: BGAA, 2017. – 269 p.
3. Aviation: history, modernity, development prospects: collection of materials of the III International Correspondence Scientific and Practical Conference of the BGAA, Minsk, November 8–9, 2018 / ed. M. V. Kudin [and others]; under scientific ed. A. A. Shegidevich. – Minsk: BGAA, 2018. – 389 p.
4. Aviation: history, modernity, development prospects: collection of materials of the IV International Scientific and Practical Conference of the BGAA, Minsk, October 24, 2019 / under scientific ed. A. A. Shegidevich. – Minsk: National Library of Belarus, 2020. – 329 p.
5. Aviation: history, modernity, development prospects: collection of materials of the V International Scientific and Practical Conference of the BGAA, Minsk, October 22, 2020 / ed. A. A. Zhukova [and others]; under scientific ed. A. A. Shegidevich. – Minsk: BGAA, 2021. – 901 p.
6. Aksenov, A. F. Civil aviation of the USSR / A. F. Aksenov. – M.: Knowledge, 1973. – 64 p.
7. Actual problems and prospects for the development of aviation: a collection of materials of the II International Scientific and Practical Conference of the BGAA, Minsk, April 25–26, 2018 / comp. A. V. Dubovsky [and others]; under scientific ed. G. F. Lovshenko. – Minsk: National Library of Belarus, 2018. – Part 1. – 332 p.
8. Belarusian State Aviation Academy: history and development prospects (to the 45th anniversary of its foundation) / A. A. Shegidevich [and others]; under general ed. A. A. Shegidevich and O. M. Borzdova. – Minsk: Kolorgrad, 2019. – 180 p.
9. Reviving flight: 65 years of the Minsk Civil Aviation Plant No. 407 / ed.-comp. A. V. Zhibul. – Minsk: BELTA, 2018. – 166 p.
10. Civil Aviation of the USSR 1917–1967 / ed. G. F. Bezborodova. – M.: Transport, 1968. – 320 p.
11. Guretsky, A. A. At the origins of the national school for the training of aviation specialists / A. A. Guretsky, A. A. Shegidevich // Science and innovations. – 2019, No. 9, p. 11–14.
12. Davydov, A. I. The sword of the Minsk sky / A. I. Davydov. – Smolensk: Harteks, 2015. – 187 p.
13. Degtev, V. S. Wings of Belarus / V. S. Degtev. – Minsk: Belarus, 1973. – 151 p.
14. Road to the sky: a half-century chronicle of the Minsk aircraft repair plant / ed. V. A. Telyakov. – Minsk: Minsk Color Printing Factory, 2003. – 224 p.
15. Dorotko, G. Composition and basing of aviation of the Armed Forces of the USSR on the territory of the Belarusian military district (1945–1992) / G. Dorotko. – Minsk: B. i., 2020. – 78 p.
16. Dorotko, G. Composition and basing of the state aviation of the Republic of Belarus (1992–2020) / G. Dorotko. – Minsk: B. i., 2021. – 62 p.
17. Drogovoz, I. G. Air shield of the country of the Soviets / I. G. Drogovoz. – Minsk: Harvest, 2003. – 448 p.
18. Dyakov, D. A. Twice awarded, native of the Red Banner / D. Dyakov, D. Kienko, V. Mirchuk. – Grodno: Khata, 2011. – 76 p.
19. Dyakov, D. A. Development of the organizational structure of the 26th Air Army in the period 1960–1992. / D. A. Dyakov // Military History Journal. – 2019, No. 4, p. 12–17.
20. Earth and sky are nearby: dedicated to the 80th anniversary of the civil aviation of the Republic of Belarus / ed. V. A. Telyakov. – Minsk: Cavalier, 2013. – 296 p.
21. Ivanov, F. F. Study of the problems of development of civil aviation in the conditions of market relations / F. F. Ivanov. – Minsk: "IVTS of the Ministry of Finance", 2006. – 72 p.
22. History of domestic civil aviation. – M.: Air transport, 1996. – 584 p.
23. Kochurin, V. V. Socio-cultural phenomenon of Russian aviation: socio-philosophical reflection / V. V. Kochurin [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.dissercat.com/content/sotsiokulturnyi-phenomen-rossiiskoi-aviatsii-sotsialno-filosofskoe-osmyslenie#ixzz5UEulvZi6>. – Access date: 10/14/2018.
24. A Brief Chronicle of the Minsk State Higher Aviation College / ed. G. M. Rusak. – Minsk: MGVAK, 2002. – 70 p.
25. Gaining altitude... (85 years of civil aviation of the Republic of Belarus) / comp. O. M. Borzdova, K. A. Shumsky, I. V. Sikorsky [i dr.]. – Minsk: Ed. house "Prof-Press", 2018. – 224 p.
26. Reliable wings of civil aviation: a 40-year milestone. – Minsk: JSC "Onore", 2013. – 25 p.
27. Naumenko, A. I. The main results of the work of the transport complex of the Republic of Belarus for 2017 / A. I. Naumenko // Social and humanitarian aspects of the development of society and the aviation industry: a collection of articles and materials of the Republican scientific seminar of the department of social and humanitarian disciplines of the educational institution "Belarusian State Aviation Academy", Minsk, May 7, 2018 / comp. V. N. Sivitsky, K. A. Shumsky. – Minsk: BGAA, 2018, P. 106–112.
28. Naumenko, A. I. On the organization of regional air transportation in the Republic of Belarus / A. I. Naumenko // Actual problems and prospects for the development of aviation: collection of materials of the International Scientific and Practical Conference of the BGAA, Minsk, June 8–9, 2017 / comp. A. A. Govin [and others]; under scientific ed. G. F. Lovshenko. – Minsk: National Library of Belarus, 2018. – P. 140–145.
29. Sky: a love story: to the 75th anniversary of the civil aviation of the Republic of Belarus / E. P. Nesterovich. – Minsk: Mediafact, 2008. – 304 p.
30. Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated April 27, 2006 No. 557 "On the State Program for the Development of Civil Aviation of the Republic of Belarus for 2006–2010" [Electronic resource]. – Access mode: <http://pravo.kulichki.com/zak/new03/newc0715.htm>. – Access date: 10/24/2018.
31. Problems of modern aviation education: collection of materials of the international correspondence scientific and methodological conference of the BGAA, Minsk, March 23, 2018 / comp. I. I. Belekalo [and others]; under scientific ed. G. F. Lovshenko. – Minsk: BGAA, 2018. – 231 p.
32. Belarusian aviation diary [Electronic resource]. – Mode of access: <http://aircraft-museum.ucoz.ru>. – Date of access: 04.11.2021.
33. Senkova, A. V. Moments from the life of flight attendants / A. V. Senkova. – Minsk: Ark, 2015. – 336 p.
34. Sidorovich, N. A. Brief history of aeronautics, aviation and space exploration: textbook. manual on the course "Fundamentals of Aviation" / N. A. Sidorovich. – Minsk: MGVAK, 2007. – 167 p.
35. Through the clouds and the years: dedicated to the 70th anniversary of the civil aviation of the Republic of Belarus / ed. V. A. Telyakov. – Minsk: Minsk Color Printing Factory, 2003. – 272 p.
36. Social and humanitarian aspects of the development of society and the aviation industry: a collection of articles and materials of the Republican scientific seminar of the department of social and humanitarian disciplines of the educational institution "Belarusian State Aviation Academy", Minsk, May 7, 2018 / comp. V. N. Sivitsky, K. A. Shumsky. – Minsk: BGAA, 2018. – 132 p.
37. Social and humanitarian aspects of the development of society and the aviation industry: a collection of articles and materials of the Republican scientific seminar of the department of social and humanitarian disciplines of the educational institution "Belarusian State Aviation Academy", Minsk, May 16, 2019 / comp. V. N. Sivitsky, E. A. Volk; under total ed. V. N. Sivitsky; Belarusian State Aviation Academy. – Minsk: BGAA, 2020. – 143 p.
38. Social and humanitarian aspects of the development of society and the aviation industry: materials of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, May 22, 2020 / under scientific ed. A. A. Shegidevich. – Minsk: National Library of Belarus, 2020. – 294 p.
39. Social and humanitarian aspects of the development of society and the aviation industry: collection of materials of the II International scientific and practical conference of the educational institution "Belarusian State Aviation Academy", Minsk, May 20–21, 2021 / ed. advice: A. A. Zhukova [and others]; under scientific ed. A. A. Shegidevich. – Minsk: National Library of Belarus, 2021. – 355 p.
40. Shumsky, K. A. The Great Patriotic War and its reflection in the minds of future aviation specialists / K. A. Shumsky // Actual problems and prospects for the development of aviation: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, June 8, 2017 / EE "Belarusian State Aviation Academy". – Minsk: BGAA, 2017, P. 107–109.
41. Shchavlinskiy, N. B. Aviakompaniya «Transaviaeksport» – osnovnoy aviatsionnyy perevozchik Respubliki Belarus' i ofitsial'nyy perevozchik Organizatsii Ob'yedinennykh Natsiy / N. B. Shchavlinskiy // Vestnik BrGTU. – 2017. – № 6 – P. 79–82.
42. Shchavlinskiy, N. B. Belorusskaya grazhdanskaya aviatsiya v gody stanovleniya i v period Velikoy Otechestvennoy voyny (1923–1945 gg.) / N. B. Shchavlinskiy. – Minsk: RIVSH, 2005. – 54 p.
43. Shchavlinskiy, N. B. Istoriya sozdaniya i razvitiya grazhdanskoy aviatsii Belarusi (1933 – seredina 1980-kh gg.) / N. B. Shchavlinskiy. – Minsk: BGATU, 2011. – 188 p.
44. Shchavlinskiy, N. B. Na perelome epokh: razvitiye grazhdanskoy aviatsii Belarusi v kontse KHKH – nachale KHKH v. / N. B. Shchavlinskiy. – Minsk: BGATU, 2017. – 162 p.
45. Shchavlinsky, N. B. National company "Belavia" / N. B. Shchavlinsky. – Minsk: Magic book, 2006. – 208 p.
46. Shchavlinsky, N. B. National airport "Minsk": 30 years with you / N. B. Shchavlinsky. – Minsk: Adukatsia i vykhavanne, 2013. – 80 p.

Статья поступила в редакцию
23.08.2022

Уважаемые авторы, приглашаем к публикации!

**Какие преимущества дает публикация
в научно-практическом журнале
«Авиационный вестник»?**

- Допуск к защите диссертации;
- публикация в издании, зарегистрированном ВАК Республики Беларусь;
- повышение рейтинга в академическом и научном сообществах;
- возможность участия в научных дискуссиях с профессионалами;
- создание положительного имиджа исследователя;
- возможность продвинуться вверх по карьерной лестнице.

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СТАТЬЯМ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ

К публикации в журнале принимаются оригинальные, достоверные и обоснованные материалы, которые имеют научное и практическое значение, отличаются актуальностью и новизной.

Объем текста статьи должен составлять не менее 14 тыс. печатных знаков, но не превышать 30 тыс. печатных знаков (8–14 стр.).

Статья должна быть выполнена в текстовом редакторе MS Word и отредактирована строго по следующим параметрам: ориентация листа – книжная, формат А4, поля по 2 см по периметру страницы, шрифт Times New Roman, размер шрифта для всей статьи, кроме аннотации, ключевых слов и таблиц – 14 пт, размер шрифта для таблиц – 12 пт, размер шрифта для аннотации и ключевых слов – 10 пт, междустрочный интервал – 1.0, выравнивание по ширине страницы, абзацный отступ – 1,25 см (без использования клавиш «Tab» или «Пробел»). Выделения в тексте возможны только полужирным шрифтом и (или) курсивом. Внутренние подзаголовки необходимо центрировать.

В структуру статьи входит:

1. УДК (номер тематической рубрики). Располагается отдельной строкой слева.

2. Название статьи. Должно содержать до 12 слов. Не допускается использовать в названии аббревиатуры и формулы. (Располагается по центру, начертание – полужирное, прямое).

3. Инициалы и фамилия автора (авторов).

4. Аннотация. Рекомендуемый средний объем аннотации составляет 500 печатных знаков, но не более 900, которая должна кратко

отражать структуру статьи и быть информативной.

5. Ключевые слова должны содержать 5–10 слов или 3–5 словосочетаний, которые отделяются друг от друга запятой.

6. Далее в той же последовательности идет **блок информации** (пункты 2–5) на *английском языке*. Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском языке.

7. Текст статьи, в который также могут входить рисунки и таблицы.

Таблицы набираются в редакторе MS Word. Таблицы должны иметь номера и названия, которые должны быть указаны над таблицами. Единственная таблица в публикации не нумеруется. Используемые в таблице сокращения подлежат расшифровке в конце таблицы.

Графический материал (рисунки, чертежи, схемы, фотографии) должны представлять собой обобщенные материалы исследований. Графический материал должен размещаться сразу же после ее первого упоминания в тексте, а также должен быть предоставлен в хорошем качестве в отдельных файлах в формате .jpg/ .png/ .cdr/ или .psd (Adobe Photoshop, без склеивания слоев) с разрешением не ниже 300 dpi. Названия и номера графического материала должны быть указаны под изображением. Элементы рисунков и кривые нумеруются курсивными арабскими цифрами, которые расшифровываются в подрисуночных подписях. Единственный рисунок в статье не нумеруется.

Формулы и математические символы. Простые формулы и буквенные обозначения величин нужно вставлять, используя меню

«Вставка. Символ». Сложные формулы набираются с помощью встроенного в MS Word редактора формул MathType. Нумеруются только те формулы, на которые автор ссылается по тексту.

Иллюстрации, формулы и сноски следует пронумеровать в соответствии с порядком цитирования в тексте.

Аббревиатуры. В тексте следует использовать только общепринятые сокращения (аббревиатуры). Полный термин, вместо которого вводится сокращение, следует расшифровывать при первом упоминании его в тексте.

Приводимые статистические данные, факты, цитаты, имена собственные и другие сведения должны быть обеспечены ссылками на источники. В тексте пишутся в квадратных скобках (например, [1]).

8. Список использованных источников должен включать в себя все работы, использованные автором в тексте и оформлен в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь. Каждый источник должен иметь свой порядковый номер в списке. Количество литературных источников – 10 – 15.

9. Информация об авторах предоставляется на двух языках – английском и русский/белорусский:

- фамилия, имя, отчество авторов (без сокращений);
- ученая степень, ученое звание (полное/сокращенное);
- должность, наименование учреждений, где работают авторы (полное/сокращенное) с указанием города и страны;
- контактные данные каждого автора (телефон, e-mail).

РУБРИКИ ЖУРНАЛА

Технические науки

(проектирование и эксплуатация авиационной техники, навигация и управление воздушным транспортом, авиационная безопасность и безопасность полетов)

Педагогические науки

(профессиональная подготовка авиационных специалистов, развитие профессионального образования)

Юридические науки

(правовое регулирование в области гражданской авиации)

УСЛОВИЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В ЖУРНАЛЕ

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить:

1. Экспертное заключение о возможности опубликования в открытых источниках печати в электронном виде в формате pdf (оригинальные экспертные заключения необходимо обязательно предоставить в оргкомитет).
2. Выписка из протокола заседания кафедры или иной научной структуры с рекомендацией к опубликованию материалов статьи в научно-практическом журнале «Авиационный вестник».
3. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры).
4. Анкету автора (форму можно посмотреть на сайте академии в разделе Академия/Наука и инновации/Журнал «Авиационный вестник».
5. Материалы статьи и сопроводительные документы представляются в электронном и письменном виде согласно установленным требованиям.
 - Электронную версию материалов присылать по адресу: avia.vestnik@bgaa.by. В названии файла указывать фамилию автора (либо соавторов через запятую) в именительном падеже, а также первые два-три слова из названия статьи.
 - Бумажный вариант статьи, подписанный всеми авторами (подписи должны быть заверены) направлять по адресу редакционной коллегии с пометкой «Научно-практический журнал «Авиационный вестник».

Языки материала статьи: белорусский, русский, английский.

Плата за публикацию не взимается.

Электронная версия журнала будет опубликована на сайте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации»:

bgaa.by

Журнал включен в перечень Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам (эксплуатация воздушного транспорта, навигация и управление воздушным транспортом) согласно приказу Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь № 94 от 01.04.2014 (в редакции приказа Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь 16.02.2021 № 36).

Журнал включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

220096, г. Минск, ул. Уборевича, 77

Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации»

Телефон: +375 (17) 354-32-34

e-mail: avia.vestnik@bgaa.by

Подписано в печать 29.12.2022. Формат 60x90/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 4,65. Тираж 100 экз. Заказ №1900.

Издатель и полиграфическое исполнение:

ООО «НАВИТЕХ», типография «ГРАДИЕНТ» ЛП № 02330/482 от 21.02.2017. Ул. Бабушкина, 6А, 220024, г. Минск.

К печати принимаются статьи, отвечающие профилю журнала, не публиковавшиеся ранее в других отраслевых изданиях.

Материалы, оформленные с нарушением требований или не прошедшие рецензирование (отклонены рецензентом) не публикуются.