

№ 3 ДЕКАБРЬ 2020
ISSN 2707-6989

БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ

Авиационный вестник

*The aviation
herald*



Научно-практический журнал

Главный редактор:

А.А. Шегидевич, к.т.н., ректор БГАА, Республика Беларусь

Заместители главного редактора:

Л.И. Гречихин, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования БГАА, Республика Беларусь

А.А. Жукова, к.т.н., проректор по научной работе БГАА, Республика Беларусь

Технический секретарь:

Е.А. Шапорова, к.х.н., доцент кафедры технической эксплуатации воздушных судов и двигателей 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., академик-секретарь ОФТН НАН Беларуси, Республика Беларусь;

В.Г. Залесский, д.ф.-м.н., директор ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;

А.Т. Волочко, д.т.н., профессор, заведующий лабораторией микрокристаллических и аморфных материалов ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;

М.М. Хакдоод, д.т.н., профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Таджикистан, чрезвычайный и Полномочный Посол Республики Таджикистан в Республике Беларусь, государственный советник 1-ой степени, Республика Таджикистан;

А.Х. Гильмутдинов, д.ф.-м.н., профессор, ректор 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, декан факультета транспорта и связи 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 Азербайджан;

О.И. Аксаментов, директор НОЧУ ДПО «Институт воздушного и космического права «Аэрохелп», Российская Федерация.

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, профессор кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР, Республика Беларусь;

В.Г. Стуканов, к.псих.н., д.пед.н., профессор, начальник кафедры психологии и педагогики Академии МВД, Республика Беларусь.

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИЯ В ЛИЦАХ

Директор Департамента по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь – о перспективах развития... 2

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

О. Капцевич, А. Дубовский, Д. Рабченко. Определение структуры пользовательского интерфейса диспетчера управления воздушным движением... 6

Л. Гречихин. Агрегатные состояния, их формирование и взаимосвязь... 13

А. Санько, В. Потапов, Р. Хованский. Диагностика технического состояния компрессора ГТД в процессе его эксплуатации по комплексному термогазодинамическому параметру... 19

О. Скрыпник, Р. Арефьев. Характеристики точности мультисистемных GPS/GLONASS/Beidou приемников... 26

А. Капустин, О. Карачун. Определение отказов источников электроэнергии системы электроснабжения переменного тока при использовании алгоритмов нечеткой логики... 31

А. Кириленко, О. Филиппенко, Д. Бельская. Построение моделей отказов противообледенительной и радиотехнической систем самолета Boeing - 737-300/500... 36

В. Тузлуков. Определение вероятности ошибок при использовании производящей функции моментов для синхронизированных систем с множественным доступом и кодовым разделением сигналов... 41

З. Машарский, Д. Умнов. Особенности учета человеческого фактора при работе диспетчера по обслуживанию полетов... 68

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Е. Снопкова. Педагогические инновации – ориентиры развития профессионально-педагогической деятельности преподавателя высшей школы... 74

Ю. Соколов, М. Завалей, И. Ротгон, А. Жадан. Обучение авиационного персонала медицинским аспектам безопасности полетов и оказанию первой помощи на борту воздушного судна: международная практика, особенности обучения в Республике Беларусь... 79

ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

А. Шегидевич, А. Жукова, О. Колошич. Теоретические аспекты и структура управления безопасностью полетов, применяемые государством, согласно Приложению 19 к Чикагской конвенции... 84

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) 341 94 22, факс (017) 341 66 32
academy@bsaa.by
www.bgaa.by

CONTENTS

AVIATION IN FACES

Director of Aviation Department of the Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus – on the prospects for developing 2

TECHNICAL SCIENCES

O. Kaptsevich, A. Dubovsky, D. Rabchenok. Determining the structure of the user interface of the air traffic controller 6
L. Gretchikhin. Formation and relationship between states of matter ... 13
A. San'ko, V. Potapov, R. Khovanskiy. Diagnostics of the technical state of a GTE compressor in the process of its operation according to the integrated thermogasdynamic parameter 19
O. Skrypnik, R. Arefyev. Accuracy characteristics of multi-system GPS/GLONASS/Beidou receivers 26
A. Kapustin, O. Karachun. Determination of electric power sources failures of ac power supply system using fuzzy logic algorithms 31
A. Kirilenko, O. Filippenko, D. Belskaya. Production models of failures of aircraft de-icing system on the plane and radio engineering system Boeing 737-300/500 36
V. Tuzlukov. Bit-error rate definition for synchronous mc-cdma using moment generating functions 41
Z. Masharsky, D. Umnov. Features of taking into account the human factor when working as a flight service dispatcher 68

PEDAGOGICAL SCIENCES

E. Snopkova. Pedagogical innovations – guidelines for the development of professional and pedagogical activities of a higher school teacher . 74
Y. Sokolov, M. Zavaley, I. Rotgon, A. Zhadan. Aviation personel training concerning medical aspects of flight safety and first-aid administration on board the aircraft: international practice; training peculiarities in the Republic of Belarus 79

SCIENCES OF LAW

A. Shegidevich, A. Zhukova, O. Koloshich. The theoretical aspects and structure of safety management applied by the state under Annex 19 to the Chicago convention 84

Educational establishment
BELARUSIAN STATE ACADEMY OF AVIATION

220096, Minsk, Ubovich St., 77
Tel. +375 (17) 341 94 22, fax (017) 341 66 32
academy@bsaa.by
www.bgaa.by

Колонка
главного редактора



**Шегидевич
Артём Артурович**

Ректор
Белорусской
государственной
академии авиации

Одним из важнейших направлений деятельности учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации» является развитие международного сотрудничества со странами ближнего и дальнего зарубежья в области подготовки высококвалифицированных авиационных специалистов, установление двухсторонних партнерских отношений. Академия авиации принимает активное участие в разработке и осуществлении различных международных проектов. Курсанты и работники академии неоднократно удостоивались международных грантов на выполнение научных исследований.

2020 год знаковый для Академии авиации – стартовала подготовка авиационных специалистов на английском языке. Развитие данного направления деятельности весомо повышает престиж и международный авторитет, обеспечивает интеграцию академии, как равноправного партнера в мировое научно-образовательное пространство.

Верстка, дизайн:

О.М. Борздова, магистр тех. наук, начальник редакционно-издательского отдела учреждения образования БГАА

Директор Департамента по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь – о перспективах развития



Сикорский Артём Игоревич
директор Департамента по авиации
Министерства транспорта и
коммуникаций Республики Беларусь

Руководство авиационной отраслью Беларуси осуществляется Департаментом по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь.

Сегодня мы в гостях у директора Департамента по авиации Артёма Игоревича Сикорского.

– Артём Игоревич, что же представляет собой Департамент по авиации, для чего и когда он был создан, чем занимается его директор?

– Ратифицировав в 1992 году Конвенцию о Международной организации гражданской авиации (ИКАО), наша страна взяла на себя обязательства исполнять международное законодательство в области гражданской авиации для создания единых подходов к безопасности, а также создать полномочный орган для обеспечения контроля исполнения международного законодательства. Упрощенно говоря, Департамент по авиации является представительством Международной орга-

низации гражданской авиации в Беларуси.

Необходимо отметить, что сама Конвенция насчитывает 19 Приложений, в соответствии с которыми выстроена работа Департамента по авиации. Данные Приложения устанавливают международные стандарты в вопросах выдачи свидетельств авиационному персоналу, производства полетов, аэронавигации, летной годности, охраны окружающей среды, эксплуатации аэродромов, безопасности полетов и авиационной безопасности. Для реализации Приложений ИКАО выпустило сотни руководств, инструкций и циркуляров. Все эти международные стандарты и рекомендуемая практика должны быть отражены в национальном законодательстве и обеспечена их реализация в практической работе гражданской авиации.

ИКАО по результатам инспекций периодически оценивает уровень реализации и соответствие государства международным стандартам и рекомендуемой практики.

По новым требованиям ИКАО, в случае если государство менее чем на 70% соответствует международным требованиям, то может быть рассмотрен вопрос включения государства в так называемый «черный список».

Права и обязанности Департамента по авиации расписаны на нескольких листах, но за сухими юридическими формулировками стоит работа команды Департамента по авиации, профессиональных и преданных делу специалистов, которые заняты решениями ежедневных, насущных и очень важных задач функционирования гражданской авиации.

На директора Департамента по авиации возлагается высокая личная ответственность за обеспечение безопасности полетов и авиационной безопасности. Необходимо иметь компетенции по различным направлениям работы гражданской авиации: летная

годность, производство полетов, сертификация персонала и авиационная медицина, аэродромные стандарты, аэронавигация и многое другое. И в каждой из этих сфер есть ряд подсистем. Например, аэронавигация – это и управление воздушным движением, его организация, вопросы связи и наблюдения, метеорология, картография, поиск и спасание и многое другое. Отсутствие у руководителей в авиации необходимых и очень высоких знаний и компетенции может привести к ошибке, которая может иметь катастрофические последствия.

Например, в Положении о Департаменте по авиации есть пункт, что директор Департамента имеет право принимать ненормативные решения, исходя из необходимости обеспечения безопасности полетов и авиационной безопасности. Скажем так, что не все случаи в жизни можно прописать в авиационных правилах, инструкциях и руководствах. Эти права возлагают огромную ответственность за принимаемые решения, потому что за этими решениями порой стоят вопросы жизни и судеб граждан, безопасности пассажира, члена экипажа, обычных людей на земле.

– Сейчас возникают все новые и новые проблемы, связанные с распространением коронавирусной инфекции, которые приходится решать ежедневно.

– Вспышка коронавирусной инфекции, больно ударила по всей мировой гражданской авиации. На команду Департамента по авиации в таких условиях легла большая нагрузка. Необходимо было правильно оценить и минимизировать возможные риски для безопасности полетов. Еще в мае на основе стандартов безопасности Европейского агентства по безопасности полетов (EASA) было разработано Руководство по предотвращению распространения коронавирусной инфекции в гражданской авиации Беларуси. Спустя месяц документ

дополнили в соответствии с рекомендациями Международной организации гражданской авиации (ИКАО). Сейчас готовится его уже третья редакция исходя из постоянно меняющейся обстановки и новых исследований в области здравоохранения и авиационной медицины.

В комплексе со строгим соблюдением стандартных правил для нераспространения коронавируса на объектах авиации принят целый ряд мер.

Как говорится нет худа без добра, в условиях пандемии помимо усиленной санитарной обработки самолетов, тестов, измерения температуры пассажиров и сотрудников, помогли обезопасить людей ранее внедренные современные системы обслуживания пассажиров, такие как стойки саморегистрации, система самостоятельной сдачи багажа Drop off, ускоренный проход пассажиров Fast Track. Думаю, что нужно извлечь уроки из этой ситуации и дальше стимулировать наши аэропорты внедрять современные технологии обслуживания, что выведет их на новый технологический уровень.

— Что предпринимает Департамент по авиации, чтобы урегулировать использование воздушного пространства беспилотными летательными аппаратами?

— В настоящее время действительно широкое распространение, как в нашей стране, так и за рубежом получают беспилотные летательные аппараты. Беспилотники — это уже не только небольшие квадрокоптеры, летающие на небольших высотах, это уже могут быть и серьезные аппараты весом до 50 кг и более, полеты которых могут представлять опасность для людей, если говорить об использовании их в населенных пунктах. Беспилотники это будущее авиации. Департамент по авиации сейчас проводит огромную работу по безопасной интеграции беспилотников в несегрегированное воздушное пространство. В целом нами разработана Концепция развития беспилотной авиации Беларуси. Сформирована команда и сейчас мы постепенно реализуем положения Концепции в части разработки процедур и подготовки нормативно-правовых актов по использованию воздушного пространства, подготовки внешних пилотов, учета и регистрации беспилотных летательных аппаратов.



— Насколько мне известно, Вы всегда говорите, что кадры — это ключевой ресурс любой организации.

— Кадры имеют ключевое значение для успешной реализации государственных задач, проектов отраслевого значения, успешного развития любой организации. В гражданской авиации профессионализм является мерой конкурентоспособности.

Огромное внимание в авиационной отрасли сегодня уделяется обеспечению ее высококвалифицированным персоналом. Для обеспечения высокого уровня подготовки персонала на основе международных стандартов для такой высокотехнологической отрасли как авиация, Департаментом по авиации разработаны авиационные правила по подготовке летного, инженерно-технического и диспетчерского персонала, разработаны руководства по обучению экзаменаторов летного состава и кабинного экипажа, инспекторов, по оценке систем тестирования уровня владения английским языком.

Были актуализированы в соответствии с требованиями международных стандартов учебные планы и программы Белорусской государственной академии авиации. Идет интенсивная подготовительная работа к открытию в учреждении образования новой специальности «Летная эксплуатация воздушных судов гражданской авиации».

— Одним из вопросов, которые курирует Департамент по авиации, является подготовка пилотов

гражданской авиации, которую в Беларуси планируют начать в 2021 году. Прежде в Беларуси пилотов коммерческой авиации не готовили — они проходили подготовку в России, Украине, странах Балтии. С какими проблемами приходится сталкиваться в этом направлении?

— Сейчас действительно наши летные кадры готовятся в вузах Российской Федерации и Украины, но мы уже вышли на завершающий этап работы по открытию летной специальности. Первых курсантов мы рассчитываем набрать в 2021 году. В настоящее время разработаны требования к вступительным экзаменам, физическому и психологическому отбору, медицинскому освидетельствованию поступающих. Департамент по авиации, как я уже говорил, разработал авиационные правила по подготовке летного состава. С соответствием с правилами совместно с заинтересованными мы выбрали типы воздушных судов и тренажеров на которых будет осуществляться подготовка. Также, готовится проектная документация для строительства тренажерного центра на территории Белорусской государственной академии авиации.

Можно сказать, что летчики — это определенный генофонд нации, потому что имеют хорошее состояние здоровья, высокий уровень образования. И мне хочется, чтобы летчиков и авиаторов в целом в нашей стране было как можно больше.

Есть требования к авиационному персоналу по медицинским

показаниям. Выделяют три группы здоровья: первая, вторая и третья. Первой группе должны соответствовать пилоты коммерческой авиации. Пилоты-любители могут соответствовать второй группе здоровья. Те же, кто поступают учиться на пилота, должны соответствовать группе здоровья ноль. Это группа самых здоровых людей. Важно иметь хорошее здоровье не только для того, чтобы поступить на летчика, но и для того, чтобы в дальнейшем выдерживать нагрузки, с которыми придется сталкиваться каждый день на летной работе.

Что касается требований к пилотам — это не только медицинское состояние и физическая подготовка, но и знание аэродинамики, устройства воздушного судна, правил, определяющих использование воздушного пространства, высокий уровень английского языка. Потому что с английским на работе придется сталкиваться постоянно, не нем вся документация. Все общение пилота с наземными службами осуществляется на английском языке.

Особое внимание уделяется качеству летной подготовки. Со-

временные реалии в гражданской авиации требуют от летчика умения работы в сложных пространственных положениях. Это, что значит — крен воздушного судна более 45 градусов, тангаж более 20 и пикирование более 10, неустойчивые показания скорости. В этих условиях пилот должен иметь четко усвоенные навыки качественного пилотирования, выхода из этих сложных положений. Для обучения этим навыкам недостаточно только воздушного судна способного выполнять простой, сложный и высший пилотаж, но и курсанты должны иметь определенные психологические навыки. Летчик — это специалист высшего умственного и духовного труда. Необходимо иметь особый склад характера — умение принимать решения, порой нестандартные, в условиях неопределенности и дефицита времени, брать на себя ответственность, расширять горизонты опасности, чтобы в ответственную секунду не запаниковать, иметь здоровый уровень оптимизма, быть целеустремленным в достижении своих целей, ценить жизнь и людей. Думаю, что мои слова отражают психологический

портрет почти всех работников крылатой отрасли.

Я честно могу вам сказать, что такой объем информации, с которым каждый день сталкивается пилот довольно высок. Чтобы подготовиться к полету, нужно знать не только необходимую оперативную информацию, надо иметь еще такой багаж знаний по авиационному законодательству, по документации, по вопросам метеорологического обеспечения, по вопросам эксплуатации воздушного судна. Объем информации огромный.

Я уверен, что с поддержкой которую оказал Глава государства и наше Правительство, а также видя высокую личную мотивацию специалистов Департамента по авиации, сотрудников БГАА, а также летчиков Минского аэроклуба мы обязательно реализуем намеченные планы по открытию летной специальности гражданской авиации.

Сегодня мы вместе решаем задачи, которые определяют облик нашей гражданской авиации на годы и десятилетия вперед.

*Материал подготовлен
техническим секретарем
журнала Е.А. Шапоровой.*



ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ES

УДК 681.396.36

О.А. КАПЦЕВИЧ, А.В. ДУБОВСКИЙ, Д.И. РАБЧЕНОК

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ДИСПЕТЧЕРА УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Олег Александрович Капцевич – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе ООО «ИнноТех Солюшнс», Республика Беларусь
vip.alehk@mail.ru

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

Дмитрий Иванович Рабченко – ведущий инженер ОАО «ВОЛАТВО», Республика Беларусь
dimedrolus1798@tut.by

Аннотация: рассмотрен математический аппарат, представляющий собой аналитические выражения, и учитывающий множества реализаций управления и состояний внешней среды, а также позволяющий на основании априорной информации определить необходимый набор элементов пользовательского интерфейса и последовательность их размещения на экране средства отображения информации для осуществления взаимодействия диспетчера радиолокационного контроля с автоматизированным рабочим местом районного диспетчерского центра управления воздушным движением.

Ключевые слова: управление воздушным движением, автоматизированное рабочее место, действия диспетчера.

Abstract: The mathematical apparatus is considered, which allows to determine the necessary user interface elements and the sequence of their placement for the interaction of the dispatcher with the workstation of the district air traffic control center.

Keywords: Air traffic control, workstation, dispatcher actions.

По данным Международной организации гражданской авиации каждые три из четырех авиационных происшествий происходят по причинам, обусловленным человеческим фактором [1, 2]. Ошибки, связанные с деятельностью человека в системе человек-машина, могут быть предопределены на этапе проектирования.

Автоматизированная система управления воздушным движением (АСУВД) содержит разнородные элементы, предназначенные для решения задач обработки информационных потоков. Одним из таких элементов является

автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера, в состав которого входит пользовательский интерфейс (ПИ). Проектирование и совершенствование ПИ АРМ для управления воздушным движением (ВД) является трудоемкой задачей по ряду причин, в том числе формирования объема информации, циркулирующей в АСУВД, исходя из необходимости обработки значительных массивов данных о воздушных судах (ВС), внешней среде и условиях организации ВД, причем в ограниченное время.

Используемый при разработке современных интерфейсов

АРМ АСУВД математический аппарат отличается наличием нерешенных задач по формализации отдельных составляющих этапов переработки человеком-оператором информации, в том числе его взаимодействием с элементами ПИ. Актуальной научно-практической задачей является разработка математической модели, предназначенной для определения состава и структуры ПИ на основании априорных данных, с учетом последовательности и структуры диалога, «сценария» и «действий сторон», расположения и характера смены информации.

Определение необходимых элементов пользовательского интерфейса

Проводя аналогию между задачами оценки эффективности управления сложной системой и оценки эффективности ПИ этой системы, необходимо отметить следующее.

В идеальном случае каждому варианту управления $U_i \in \mathbf{U}$ ставится в соответствие единственное состояние внешней среды $R_i \in \mathbf{R}$. В реальных системах каждому допустимому варианту управления U_i могут соответствовать различные R_i и соответствующие результаты управления u_{ij} . Под результатом u_{ij} подразумевается оценка соответствующему варианту управления U_i при условии R_j . Семейство результатов, характеризующее множество стратегий (вариантов) управления \mathbf{U} для множества состояний внешней среды \mathbf{R} , описывается матрицей [3]:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1j} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{i1} & u_{i2} & \dots & u_{ij} \end{pmatrix}.$$

Чтобы найти один из выгодных вариантов управления даже в том случае, когда каким-то вариантам U_i могут соответствовать различные состояния внешней среды R_j , вводят определенную оценочную (целевую) функцию. Например, можно ориентироваться на самые неблагоприятные условия внешней среды и выбрать наилучший вариант управления U_i (строку), а затем наилучший результат решения u_{ij} (в строке) [3]. Другими словами, ожидать наилучшего результата в наихудшем случае. Для каждого иного условия внешней среды R_j при рассматриваемом U_i результат управления может быть только равным этому или лучше.

Путем анализа условий организации ВД, алгоритмов управления диспетчера и предполагаемого набора элементов ПИ определяются усеченные множества наиболее стереотипных для предметной отрасли реализаций управления и наиболее вероятных состояний внешней среды. На основании временной оценки (величины времени реакции диспетчера [4]) i -го управления строится матрица результатов управления (Таблица 1).

Под результатом $\tau_{рк,ij}$ подразумевается длительность реализации диспетчером управления U_i при условиях R_j .

Наилучшая с точки зрения гарантированного результата реализация управления находится при помощи выражения:

$$U^{opt} = \left\{ U_i^{opt} \left| U_i^{opt} \in \mathbf{U} \wedge u_i^{opt} = \max_i \left(\min_j \tau_{рк,ij} \right) \right. \right\}, \quad (1)$$

Выбор наилучшей реализации управления (и необходимого набора элементов ПИ) в соответствии с критерием (1) не является однозначным, поскольку результат может достигаться на множестве результатов многократно. На практике выбирается одна из нескольких лучших по результатам оценки реализаций.

Определение последовательности размещения элементов

Диспетчер, в зависимости от R_j может действовать по одному из $N_{алг}$ возможных алгоритмов. Вероятность работы по n -му алгоритму равна P_n , где $n=1,2,\dots,N_{алг}$. Предполагается, что вероятности работы диспетчера по алгоритмам известны и равны между собой $P_1=P_2=\dots=P_N=1$. Общее количество элементов ПИ равно $M_{элементы,ПИ}$.

Для каждого алгоритма в порядке очередности выполнения выписываются все действия диспетчера, связанные с обращением к одному из элементов ПИ. Затем в соответствии с указанным алгоритмом все элементы ПИ нумеруются в порядке их использования. Если существуют элементы, которыми не пользуются в рассматриваемом алгоритме, но которые могут быть использованы в других алгоритмах, то им присваиваются следующие номера.

Таким образом, каждому из $M_{элементы,ПИ}$ подлежащих размещению элементов ПИ присваивается номер из интервала $j=1,2,\dots,M_{элементы,ПИ}$.

Таблица 1. Семейство результатов управления

	R_1	R_2	...	R_j
U_1	$\tau_{рк,11}$	$\tau_{рк,12}$	...	$\tau_{рк,1j}$
U_2	$\tau_{рк,21}$	$\tau_{рк,22}$	...	$\tau_{рк,2j}$
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
U_i	$\tau_{рк,i1}$	$\tau_{рк,i2}$	...	$\tau_{рк,ij}$

Таблица 2. Очередность использования элементов ПИ

Номер алгоритма	Номер обращения к элементу			
	1	2	...	$K_{макс}$
1	$C_1^{(1)}$	$C_2^{(1)}$	...	$C_{K_{макс}}^{(1)}$
2	$C_1^{(2)}$	$C_2^{(2)}$	...	$C_{K_{макс}}^{(2)}$
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
$N_{алг}$	$C_1^{(N_{алг})}$	$C_2^{(N_{алг})}$	...	$C_{K_{макс}}^{(N_{алг})}$

Таблица 3. Матрица очередности использования элементов ПИ при обращениях

Номер обращения	Номер элемента			
	1	2	...	$M_{элементы,ПИ}$
1	P_{11}	P_{12}	...	$P_1 M_{элементы,ПИ}$
2	P_{21}	P_{22}	...	$P_2 M_{элементы,ПИ}$
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
$K_{макс}$	$P_{K_{макс}1}$	$P_{K_{макс}2}$	...	$P_{K_{макс}} M_{элементы,ПИ}$

Таблица 4. Матрица связности элементов ПИ в алгоритмах

Номер обращения	Номер элемента				
	1	2	3	...	$M_{\text{элемент. ПИ}}$
1		S_{12}	S_{13}	...	$S_{1M_{\text{элемент. ПИ}}}$
2	S_{21}		S_{23}	...	$S_{2M_{\text{элемент. ПИ}}}$
3	S_{31}	S_{32}		...	$S_{3M_{\text{элемент. ПИ}}}$
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
$M_{\text{элемент. ПИ}}$	$S_{M_{\text{элемент. ПИ}}1}$	$S_{M_{\text{элемент. ПИ}}2}$	$S_{M_{\text{элемент. ПИ}}3}$...	

Исходя из полученной нумерации, каждому из алгоритмов ставится в соответствие ряд чисел C_m^n , где C_m^n – номер элемента ПИ из группы (в рамках алгоритма), который используется в n -ом алгоритме при m -ом обращении к группе ($m=1,2,\dots,K_{\text{макс}}$, где $K_{\text{макс}}$ – максимальное количество обращений к элементам).

Составляется таблица очередности использования элементов ПИ в алгоритмах (Таблица 2).

Для некоторых алгоритмов длина последовательности может быть меньше величины $K_{\text{макс}}$, которая соответствует алгоритму максимальной длины. Поэтому некоторые значения ряда C_m^n будут равны нулю.

На основании анализа Таблицы 2 составляется матрица очередности $\|P_{mj}\|$ использования элементов ПИ при обращениях (Таблица 3).

Элементы матрицы представляют собой усредненную частоту применения j -го элемента при m -ом обращении и определяются как:

$$P_{mj} = \frac{1}{N_{\text{алг}}} \cdot \sum_{n=1}^{N_{\text{алг}}} B_{mjn}, \quad (2)$$

где $B_{mjn} = 1$, если в n -ом алгоритме при m -ом обращении присутствует элемент j , в остальных случаях $B_{mjn} = 0$.

Далее строится матрица связности $\|S_{\xi\phi}\|$, в которой элементы представляют собой усредненную частоту следования элемента ϕ за элементом ξ (Таблица 4).

Элементы матрицы определяются выражением:

$$S_{\xi\phi} = \frac{1}{N_{\text{алг}}} \cdot \sum_{n=1}^{N_{\text{алг}}} Y_{\xi\phi n}, \quad (3)$$

где $Y_{\xi\phi n}$ – количество случаев, когда в n -ом алгоритме элемент ϕ следует за элементом ξ .

Диагональные элементы матрицы не заполняются, исходя из предположения, что в рамках одного алгоритма невозможно использование одного и того же

Таблица 6. Результаты управления

		Состояние внешней среды		
		R_1	R_2	R_3
Вариант управления	U_1	114,5	166,9	189,4
	U_2	142,9	178,4	231,2
	U_3	118,5	159,2	189,9

Таблица 5. Элементы ПИ для реализации действий диспетчера

Действие диспетчера	Элементы ПИ
1	2
поиск требуемого ВС	окно радиолокационной информации, символ радиолокационного трека ВС
определение количества ВС, требующих передачи управления	картографическая информация, формуляр сопровождения ВС
просмотр каталога авиатехники определенного государства	окно справочной информации, данные по ВС, полоса прокрутки информации
просмотр времени восхода и захода солнца для текущего месяца	окно справочной информации, астрономические данные, полоса прокрутки информации
отображение вектора упрежденного положения ВС	картографическая информация, вектор упрежденного положения ВС, элементы выбора, кнопки
просмотр конфликтных ситуаций по определенным ВС	окно среднесрочных конфликтных ситуаций, графическая информация, текстовая информация
поиск информации по определенным ВС в суточном плане полетов	окно суточного плана полетов, полоса прокрутки информации
уточнение расстояния между конфликтующими ВС, следующими в соседний сектор	сектора ответственности, окно среднесрочных конфликтных ситуаций, графическая информация, текстовая информация
уточнение оставшегося времени до встречи конфликтующих ВС	окно среднесрочных конфликтных ситуаций, графическая информация, текстовая информация
назначение позывного ВС	диалог назначения позывного ВС, поле ввода, элементы выбора, кнопки
обращение к полю формуляра сопровождения ВС, выбор необходимой функции (по указанию руководителя полетов)	диалог передачи управления ВС, элементы выбора, кнопки
поиск документированной информации по ВС изменившему установленный курс	окно с документированной информацией, элементы определения параметров отображения, кнопки выбора, полоса прокрутки информации
поиск в суточном плане полетов ВС с эшелонном входа по плану несовпадающим с запрошенным эшелонном	окно суточного плана полетов, полоса прокрутки информации
отображение при помощи фильтра по высоте ВС, находящихся в определенном высотном слое	диалог управления фильтром высоты, элементы выбора значений высоты
определение ВС, курсы которых пересекают опасные зоны	зоны опасных явлений погоды, вектор упрежденного положения и маршрут ВС
отображение границ секторов ответственности, государственных границ и маршрутов организации ВД	государственные границы и сектора ответственности, картографическая информация
определение ВС следующих в соседний сектор и находящихся внутри опасных зон (ВС маршруты которых пересекают опасные зоны)	сектора ответственности, зоны опасных явлений погоды, вектор упрежденного положения и маршрут ВС, предыстория радиолокационного трека

элемента ПИ несколько раз подряд.

Первым в очереди для размещения элементом ПИ (M_i) выбирается элемент для которого величина P_{1M} является максимальной. В случае наличия нескольких подобных элементов, в качестве первого выбирается любой из претендентов. В последующем производится возврат к данному шагу, выбирается другой претендент и процедура повторяется.

Для выбора второго в очереди элемента для размещения рассчитывается ряд величин $o_j = P_{2j} + 1/2 S_{M_j}$ для всех значений j (всех элементов), за исключением первого элемента. Находится элемент (элементы) для которого величина o_j максимальна. Данный элемент (элементы) будет являться вторым (M_2) элементом для размещения.

В общем виде для выбора очередного M_p элемента ПИ для размещения рассчитывается ряд:

$$o_j = P_{pj} + \frac{1}{2} S_{M_{(p-1)j}} \quad (4)$$

для всех значений j , не равных M_1, M_2, \dots, M_{p-1} (элементов ПИ которые уже размещены). Множитель при величине $S_{M_{(p-1)j}}$ характеризует ее меньший, по сравнению с величиной P_{pj} , вклад в оценку элемента ПИ.

Для оценки различных вариантов (в случае наличия нескольких претендентов на роль первого элемента) размещения элементов в ПИ необходимо определить для каждого из них следующий показатель:

$$\Delta = \frac{2}{n_{\max}^2 \cdot (n_{\max} + 1)} \cdot \sum_{n=1}^{n_{\max}} (\Upsilon_n - 1) \cdot x(n_{\max} + 1 - n), \quad (5)$$

где

Υ_n – количество элементов ПИ на n -ой позиции в очереди;

n – позиция в очереди (натуральное число);

n_{\max} – длина очереди.

Показатель Δ представляет собой усредненный по длине очереди, взвешенный по убыванию предпочтения нахождения на позициях в очереди (согласно схемы весов Фишберна) и количеству элементов на позициях коэффициент. Наилучшим является вариант размещения элементов ПИ, для которого показатель Δ минимален.

Предлагаемая математическая модель была использована для разработки структуры ПИ АРМ районного диспетчерского центра управления ВД. Были определены наиболее стереотипные [5–8] варианты реализации действий диспетчера. Один из указанных вариантов представлен в Таблице 5.

Матрица результатов управления, для трех вариантов управления представлена в Таблице 6.

Вероятные состояния внешней среды R_j определялись интенсивностью воздушного движения. Были выбраны низкая, средняя и высокая интенсивности соответственно [9].

Наилучшей согласно (1) реализацией управления стал вариант U_1 . Очередность использования элементов ИМ в алгоритмах указанного варианта представлена в Таблице 7.

Матрица очередности использования элементов при обращениях и матрица связности для варианта U_1 представлены в Таблицах 8 и 9 соответственно.

На роль первого для размещения одновременно претендовали элементы ПИ под номерами 16, 17 и 18 (значения для усредненных частот их использования были максимальны и равны между собой).

Соответствующие указанным случаям очередности (варианты) размещения элементов представлены в Таблице 10 (расчеты ряда величин o_j не приводятся ввиду значительного объема вычислений).

Значения показателя (5) для трех случаев размещения составили:

$$\Delta^{(16)} = \frac{1}{9} \cdot \sum_{n=1}^9 \frac{(\Upsilon_n - 1) \cdot (10 - n)}{45} = \frac{1}{9} \cdot (0,777 + 0,4 + 0,111 + 0,088 + 0,444) = 0,202,$$

$$\Delta^{(17)} = 1/9 \cdot (1,244 + 0,777 + 0,266 + 0,333 + 0,311) = 0,325,$$

$$\Delta^{(18)} = 1/9 \cdot (1,244 + 0,155 + 0,266 + 0,111 + 0,4) = 0,241$$

соответственно.

Таблица 7. Очередность использования элементов

Обозначение алгоритма	Номер обращения в алгоритме											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Номер элемента											
а)	1	2	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0
б)	5	6	7	6	5	8	9	8	5	10	11	10
в)	12	13	14	15	0	0	0	0	0	0	0	0
г)	16	17	18	19	20	19	0	0	0	0	0	0
д)	16	17	18	16	17	18	0	0	0	0	0	0
е)	21	22	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ж)	24	25	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з)	27	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
и)	29	30	29	31	29	0	0	0	0	0	0	0
к)	32	33	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
л)	34	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
м)	36	37	36	38	37	14	0	0	0	0	0	0

Таблица 10. Варианты размещения элементов ПИ

Очередность размещения элемента	Первый для размещения элемент		
	$M_1 = 16$	$M_1 = 17$	$M_1 = 18$
	Номер элемента		
второй	17	18	17
третий	18	3, 7, 14, 23, 26, 29, 32, 36	3, 7, 14, 23, 26, 29, 32, 36
четвертый	4, 6, 15, 19, 31, 36	4, 6, 15, 16, 19, 31	16, 19
пятый	5, 20, 29, 38	5, 20, 38	5, 20, 38
шестой	8, 37	8, 18, 19, 37	8, 37
седьмой	9, 14	9	9
восьмой	10	10	10
девятый	11	11	11
десятый	1, 2, 3, 7, 12, 13, 14, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 32, 33, 34, 35, 37	1, 2, 12, 13, 14, 21, 22, 24, 25, 27, 28, 30, 33, 34, 35	1, 2, 4, 6, 12, 13, 15, 20, 21, 22, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 35

Таблица 11. Необходимые элементы ПИ

№ п/п	Наименование элемента	№ п/п	Наименование элемента
1	окно радиолокационной информации	20	полоса прокрутки информации
2	символ радиолокационного трека ВС	21	панель управления окнами
3	картографическая информация	22	панель управления элементами картографии (метеоинформации)
4	формуляр сопровождения ВС	23	элементы выбора, кнопки
5	окно справочной информации	24	диалог назначения позывного ВС
6	данные по ВС	25	поле ввода
7	полоса прокрутки информации	26	элементы выбора, кнопки
8	астрономические данные	27	диалог передачи управления ВС
9	полоса прокрутки информации	28	элементы выбора, кнопки
10	каталоги авиатехники	29	окно с документированной информацией
11	полоса прокрутки информации	30	элементы определения параметров отображения
12	картографическая информация	31	кнопки выбора, полоса прокрутки информации
13	вектор упрежденного положения ВС	32	окно суточного плана полетов
14	предыстория радиолокационного трека	33	полоса прокрутки информации
15	элементы выбора, кнопки	34	диалог управления фильтром высоты
16	окно среднесрочных конфликтных ситуаций	35	элементы выбора значений высоты
17	графическая информация	36	зоны опасных явлений погоды
18	текстовая информация	37	вектор упрежденного положения и маршрут ВС
19	окно суточного плана полетов	38	государственные границы и сектора ответственности

Анализ результатов

С учетом $\Delta^{(16)} < \Delta^{(18)} < \Delta^{(17)}$ целесообразно выбрать вариант, при котором первым для размещения элементом ИМ является элемент под номером 16.

Сформированный, для данного варианта, перечень элементов представлен в *Таблице 11*.

Перечень представляет собой опорную структуру и может быть использован для статического прототипирования ПИ на АРМ диспетчера в АСУВД.

Заключение

Таким образом, разработана математическая модель (выражения (1) – (5)), позволяющая определять необходимые элементы ПИ для осуществления взаимодействия диспетчера с АРМ, а также последовательность их размещения. Использование априорной информации позволяет значительно снизить объем трудоемких экспериментальных исследований деятельности диспетчера управления ВД, связанных с многовариантностью его действий в различных условиях обстановки. Использование разработанной математической модели позволит эффективнее по сравнению с существующими математическими аппаратами учитывать человеческий фактор, оказывающий существенное

влияние на процесс управления сложной системой в условиях дефицита времени и высокой стоимости ошибки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по обучению в области человеческого фактора: утв. Генеральным секретарем Международной организации гражданской авиации 31.05.2013. – Монреаль, 2013. – 370 с.
2. Энциклопедия безопасности авиации / Н.С. Кулик [и др.]; под ред. Н.С. Кулика. – Киев : Техника, 2008. – 1000 с.
3. Макаров, И. М. Теория выбора и принятия решений: учебник / И. М. Макаров, Т. М. Виноградская, А.А. Рубчинский. – М. : Наука, 1982. – 328 с.
4. Капцевич, О.А. Временная составляющая аналитической модели действий диспетчера управления воздушным движением / О.А. Капцевич, А.В. Дубовский, Д.И. Рабченко // Доклады БГУИР. – 2019. – № 5. – С. 79–85.
5. Правила аэронавигационного обслуживания. Организация воздушного движения : утв. Генеральным секретарем Международной организации гражданской авиации 10.11.2016. – Монреаль, 2016. – 508 с.
6. Руководство оператора РМ–Д УВД: утв. ЕИРВ.51298–01 34 01–ЛУ. – Минск, 2018. – 113 с.
7. Руководство по эксплуатации изделия СИНТЕЗ–АР2: утв. ТАЛМ.461214.003 РЭ–ЛУ: в 2–х ч. – СПб, 2003. – Ч. 2. – 185 с.
8. Капцевич, О.А. Экспериментальные исследования интерфейса разработанного с использованием методики синтеза информационной модели на автоматизированном рабочем месте диспетчера управления воздушным движением / О.А. Капцевич, Д.И. Рабченко, К.Ю. Пономарев // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7–8. – С. 149–158.
9. Авиационные правила «Методика определения пропускной способности органов диспетчерского обслуживания воздушного движения» : утв. Министерством транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, 31.03.2008. – Минск, 2008. – 15 с.

*Статья поступила в редакцию
06.10.2020*

FORMATION AND RELATIONSHIP BETWEEN STATES OF MATTER

Leonid Ivanovich Gretchikhin – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of the Avionics Maintenance Department at the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
gretchihin@yandex.ru

Abstract: *The Heitler–London theory was significantly refined in quantum mechanics by introducing the following additional binding energies: 1 – energy of binding of an induced negative charge with singly ionized nuclei of interacting atoms; 2 – energy of suppression in the area of overlapping wave functions, where the exchange of valence electrons takes place; 3 – energy of repulsion of nuclei of the first and subsequent degrees of ionization with the determination of their probability. The distance between interacting atoms is determined at the moment the total interaction energy changes from negative to positive. The obtained values of the internuclear distance coincided with the value obtained from the vibrational spectra. The ionic binding theory, electron–dipole and dipole–dipole interactions were developed. The probabilities of repulsion of nuclei of interacting atoms of the first and second degrees of ionization were determined. The conditions for the formation of different states of matter were clarified. As a result of the excitation of quantons, relic plasma is formed.*

Keywords: *state of matter, quantum mechanics, cluster, quanton, physical vacuum.*

At the beginning of the 20th century, with the discovery and study of various elementary particles, it was concluded that our world consists of atoms and molecules, which, by interacting with each other, form various organic and inorganic substances. By appearance, all substances were classified into four states of matter: plasma, gas, liquid and solid. The van der Waals equation, which introduced two constants that were determined based on the molecular – kinetic theory, allowed us to qualitatively understand how the states of matter are formed and how they are interconnected with each other. It was especially difficult to understand the mechanism of radiation emitted when substances are heated in different states of matter.

When Planck proposed to consider light not only as the propagation of electromagnetic waves, but also as the propagation of individual photon particles with the energy proportional to the

frequency, he was able to explain the nature of the black – body radiation. The photon emission is caused by a change in the energy state of individual atoms or molecules. Taking into account this concept and using the ideas of Louis de Broglie, Schrodinger proposed to consider the energy properties of atoms and molecules as an oscillatory process and describe it by a second – order differential equation, as was proposed by Helmholtz in relation to elastic acoustic oscillations. By solving this equation, Schrodinger obtained the energy states of the hydrogen atom. The obtained results agreed with the experimental data on the excited states of the hydrogen atom and its emission spectrum. By using this representation to describe the interaction energy of atoms in a molecule, it was shown that atoms and molecules can be in strictly defined energy states, and when these states change, emission or absorption occurs in the form

of individual quanta of energy. Thereupon quantum mechanics describing the energy behaviour of atomic and molecular particles was born.

The use of quantum mechanics to describe the behaviour of many – electron atomic systems and polyatomic molecules turned out to be an unsolvable problem, since the Schrodinger equation has a solution only for binary interaction, and the equation of motion of three or more bodies cannot be mathematically described. Also, the wave function and interaction potential are not defined in the same equation, i.e., one equation contains two unknown quantities. Thus, Schrodinger obtained quantization of energy not by solving a second – order differential equation, but from the initial and boundary conditions under which the obtained differential equation has a solution. The problem of interaction of atoms was solved more consistently by Heitler and London [1]. They used

the interaction potential between hydrogen atoms and their wave functions, which made it possible to perform a direct calculation of the Schrodinger equation. The obtained interaction energy was much less than the experimentally measured dissociation energy of the hydrogen molecule. It turned out that it's not all that simple, since it was necessary to take into account other possible types of interactions, and then the results approached the experimental data [2].

In practice, not individual atoms and molecules, but rather macrobodies consisting of many atoms and molecules are considered. For such a macroenvironment, it is impossible to write an equation that takes into account the behaviour of all particles contained in the material. For such a case, Newton and Leibniz proposed to use a differential approach, in which a macrobody was broken up into separate very small particles which must possess all the properties of the macrobody. However, a macrobody cannot be broken down to the size of atoms and molecules, since these particles already have completely different properties, which are described by different equations.

The first attempt to match the behaviour of particles at the level of atoms and molecules with the properties of the macrobody was made by Leon Brillouin. He proposed a one-particle quantum theory of solids, assuming valence electrons to be free. This theory was later called the band theory of solids. The application of this theory to describe the behaviour of a solid in each specific case required the introduction of a specific interaction potential and a specific wave function. When both quantities were successfully fit, the results agreed well with the experimental data. In fact, all electrons in a solid are not free, but each is bound to its own atom or molecule, and in a crystal – to a positively charged core. Various empirical approximations do not contain the real physics of the phenomenon. For this reason, attempts to match solid-state physics with the behaviour of individual atoms and molecules of a solid were unsuccessful.

The fact that such approaches

are not feasible was first noticed by mechanical engineers. They suggested to consider the intermediate level and called it the meso-level of solid, which has properties of both quantum systems and a crystalline body in the macrostate [3]. In this approach, it was assumed that in practice it would be sufficient to consider the behaviour of a solid at the meso-level [4]. However, in this case, is not evident which particles form the meso-level, what their structure is, and how they interact with each other.

In parallel with the development of the meso-level approach, the cluster model of the structure of matter was developed. The first work in this direction was reported in 1983 [5]. In 1991, based on the data obtained using molecular dynamics, it was shown in [6] that metal melts have particles with packing equivalent to a single crystal, and between them there are volumes with a packing density almost two times less compared to a single crystal. The fact that clusters are nanoparticles that create nanocluster systems in the form of a crystal by interacting with each other is clearly formulated in [7]. After that it was necessary to find out how clusters are formed, how they interact with each other, which nanocluster systems can form, and, based on this, consider what distinctive physico-chemical properties nanocluster formations have. The first studies in this direction are summarized in monographs [8, 9]. The cluster model was further developed, improved, and at the same time the quantum-mechanical models of atoms, molecules, clusters and various condensed matter were refined. Let us consider this process in more detail.

Development of quantum mechanics

Quantum mechanics deals with the structure of atomic systems and their interaction under different conditions. The most thoroughly studied is the hydrogen atom. The developed mathematics allowed obtaining the total wave function in the form of the product of the radial and spherical components. The radial component depends on the radius of spin of the electron relative to the atomic nucleus. Consequently, the electron in each energy state is smeared over space along the radius around the atomic nucleus and at the same time has a different binding energy with the nucleus. Thus, the transition from one energy state to other results in formation of not separate spectral lines but full bands. This contradicts the experiment and, accordingly, Bohr's atomic theory. The wave function of the hydrogen atom should be represented as the product of the radial and spherical components with separation of variables

$$\psi = \psi(r, \theta, \phi) = R(r)Y(\theta, \phi), \quad (1)$$

where the radius (the distance of the electron from the atomic nucleus) in the radial component is fixed, and then the radial component in the hydrogen-like approximation of each element in the periodic table can be represented as follows:

$$R_{n,l}(r) = \sqrt{\frac{Z^*}{\pi n^*}} \exp\left(-\frac{Z^* r_a}{n^* a_0}\right). \quad (2)$$

Here, Z^* and n^* are the effective nuclear charge and the Rydberg denominator, respectively; a_0 is the radius of the hydrogen atom and r_a is

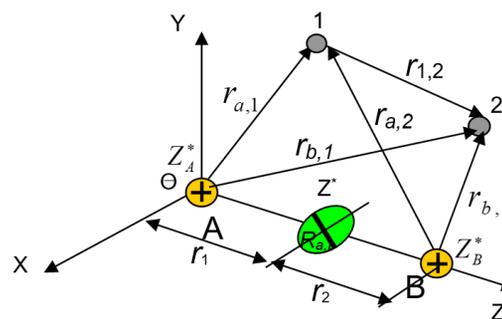


Fig. 1. General diagram of interaction of one pair of electrons of particles A and B in the binary approximation

the radius of spin of the electron along a strictly circular orbit in each atom.

By applying this definition of the wave function, the covalent bond between atoms can be calculated using the Heitler – London theory. The difference is that in the case of interaction of hydrogen atoms, the interaction potential does not take into account the suppression of electrons by nuclei in the process of their exchange. In the case of complex atoms, the suppression of the electron exchange process and the repulsion of the positively charged core in molecules and crystals should be taken into account. Based on *Figure 1*, the potential in the Heitler – London theory should be represented as follows:

$$\hat{H}' = -\frac{1}{r_{a,2}} - \frac{1}{r_{b,1}} + \frac{1}{r_{1,2}} - \frac{Z_A^* Z^*}{r_1} - \frac{Z_B^* Z^*}{r_2} + \frac{\theta_a Z_A^*}{r_{a,1}} + \frac{\theta_b Z_B^*}{r_{a,2}} + \frac{\sum_i P_i Z_{A,i}^* Z_{B,i}^*}{R_{a,b}}. \quad (3)$$

Here,

$1/r_{a,2}$ is the interaction of the valence electron of atom *A* with the nucleus of atom *B*;

$1/r_{b,1}$ is the interaction of the valence electron of atom *B* with the nucleus of atom *A*;

$1/r_{1,2}$ is the repulsion energy of valence electrons of atoms *A* and *B*;

$Z_A^* Z^*/r_1$ is the repulsion energy of valence electrons of atoms *A* and *B*;

$Z_B^* Z^*/r_2$ is the interaction of the induced charge with the nucleus of atom *A*;

$\theta_a Z_A^*/r_{a,1}$ is the suppression of the valence electron of atom *A* during the transition to atom *B*;

$\theta_b Z_B^*/r_{b,2}$ is the suppression of the valence electron of atom *B* during the transition to atom *A*;

$\sum_i P_i Z_{A,i}^* Z_{B,i}^*/R_{a,b}$ is the energy of repulsion of the nuclei of atoms *A* and *B* of different degrees of ionization, where P_i is the probability of involvement in the interaction of the *i* – the degree of ionization of atoms *A* and *B* in the repulsion of nuclei;

$R_{a,b} = r_1 + r_2$ is the distance between the interacting atoms.

In addition to the covalent bond, other types of chemical bonds occur in the interaction of atoms, namely: ionic, induced, electron – dipole, dipole – dipole and the repulsion of positively charged ions of different degree of ionization. To perform the calculation of all listed types of chemical bonds, it is necessary to take into account how inbuilt and induced electric moments, the presence of which was predicted by Coulson [10], occur inside the atomic systems. The theory of origin of inbuilt and induced dipole electric moments was developed by Gretchikhin [11]. Thus, the interaction between atoms is a quite difficult process. As an example, *Figure 2* shows the calculation of the interaction potential in the oxygen molecule in comparison with the Lennard – Jones and Morse potential. The properly selected interaction potential in a two – atom molecule allowed to obtain simultaneously dissociation energy, atomic spacing and rotation radius of the electron of the first degree of ionization. For oxygen, these values are respectively equal: $D = 5.12$ eV; $r_a = 0.799$ Å and $r_e = 1.125$ Å. The real experimental value of the dissociation energy of the oxygen molecule is 5.12 eV, the atomic radius $r_a = 0.74$ Å and the distance between the nuclei obtained from vibrational spectra, $r_e = 1.207$ Å. For oxygen,

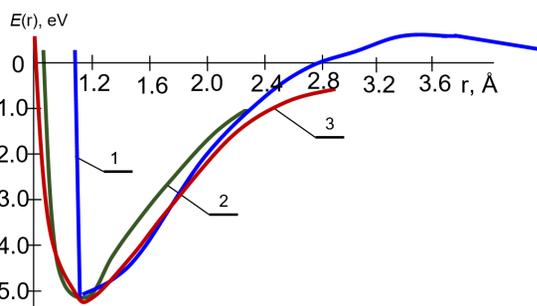


Fig. 2. The obtained potential in a diatomic oxygen molecule:
1 – theory taking into account all possible types of interaction;
2 – Lennard–Jones potential; 3 – Morse potential

the difference between different potentials within the error limits of the calculations performed in the range of distances between atoms greater than the equilibrium distance agrees rather well up to distances equal to two radii of the initial atoms. At distances greater than two atomic radii, the atoms in the molecule are repelled. The maximum repulsion intensity is the activation energy for molecule formation or bond breaking. The difference is significant in the range of distances between atoms in a molecule less than the equilibrium distance. Such calculation for a number of other molecules was presented in [12], and a very noticeable difference was obtained, both before and after the equilibrium distance.

Thus, the interaction of atoms with the formation of molecules is completely defined. As the temperature drops, molecules interact with the formation of clusters. The interaction of clusters determines the structure of crystals. At temperatures near absolute zero, clusters disintegrate into separate atoms, and intercluster interaction is replaced by collective interaction between atoms, forming a homogeneous tightly packed structure. All possible types of interaction arising between atoms, molecules and clusters form different states of matter.

States of matter

Taking into account all the complexity of the interaction between different elementary particles, atoms, molecules and clusters, a general structure of the sequential transition from one state of matter to another was developed (*Table 1*).

Table 1 shows the main results obtained in different states of matter, where electrons and positrons, protons and neutrons, atomic nuclei, atoms inside molecules and molecules inside clusters determine the sequential transition from individual nuclear particles and atoms to solids with a close – packed structure. The physical model of all states of matter is grounded, and their properties under different formation conditions are so complex that it is unclear when they will be fully studied. Let us sequentially consider what states of matter exist

Table 1. General view of the world

States of matter	Parameters		
	Parameters	Reactions of formation	Phenomena at the transition boundaries
Close-packed	Individual molecules form a homogeneous structure	Formation of a dense molecular structure	Breaking of collective interaction between molecules
Solid	Clusters of diatomic or triatomic molecules	An intercluster structure is formed	Breaking of the intercluster bond
Liquid	Simple molecules and free clusters	Free clusters are formed	Breaking of the intermolecular bond within a cluster
Gas	Simple molecules and atoms	Free molecules and atoms are formed	Breaking of the interatomic bond within molecules
Low-temperature plasma	Singly charged positive and negative ions and electrons	Formation of negative ions	Breaking of the bond between electrons with negative ions
High-temperature plasma	Multiply charged positive ions and electrons	Formation of positive ions	Breaking of the bond between electrons and nuclei of multiply charged ions
Ultra-high temperature plasma	Nuclei of heavy atoms at the end of the periodic table	Decay of nuclei of heavy atoms with the formation of two light atoms with the yield of α -, β - and γ -radiation	Energy release due to mass defect
Thermonuclear plasma	Individual protons, neutrons, α -particles and electrons	Synthesis of new nuclei from protons, neutrons and α -particles	Breaking of the bond between protons and neutrons
Relic plasma	Quantons	Synthesis of quantons from positrons and electrons	Decay of quantons with the formation of real masses (vacuum explosion)

in the world, how they are formed and what distinctive properties they possess.

Near absolute zero temperature, a close – packed state is formed [13, 14]. The density of matter increases and superconductivity occurs. In the case of metals, it was assumed that free electrons at Fermi level form pairs with spin equal to zero or one, i.e., they are Cooper pairs. Electron gas is transferred from the Fermi gas to the Bose – Einstein gas. A theoretical model of such a transition was developed and published in 1957 by three physicists: John Bardeen, Leon Cooper and Robert Schrieffer. The BCS theory proposed by them allowed explaining many phenomena that arise in the superconducting state. However, in [13, 14] it was shown that electron has spin only in the bound state, and since it has no spin in the free state, Cooper pairs do not form in nature at all. Nevertheless, in 1972 the physicists

were awarded the Nobel Prize¹⁾.

In 1986, Georg Bednorz and Alexander Muller discovered an alloy in the form of a dielectric without free electrons, but with superconductivity at a temperature of 30K, and at present, there are known dielectric alloys with superconductivity at a temperature of just below 100°C. The BCS theory cannot explain this phenomenon.

Thus, in 1986 Leonid Gretchikhin [9], considering the electric current not as the motion of free electrons, but as the propagation of electromagnetic waves, as proposed by Nikola Tesla, developed a different superconductivity occurrence mechanism in the form of the propagation of electromagnetic waves in a homogeneous structure. Electromagnetic waves are scattered and absorbed by microinhomogeneities, where a sudden change in the dielectric constant of the medium occurs. From

this point of view, all electrical and magnetic properties of many states of matter are clearly defined.

All solids are crystals and polycrystals. Crystals are formed by intercluster interaction. In free intercluster volumes there are randomly moving atoms or molecules of the initial material. In intercluster volumes they also act as a link between clusters. Due to the presence of intercluster voids, crystals are inhomogeneous in density. Voids emerge as a result of the destruction of the second and even the first coordination layer. With a decrease in the temperature of the test sample, the first and then the second coordination layer restore sequentially. Inclusions in the form of the third coordination layer containing individual atoms between clusters at a very low temperature simultaneously interact with all clusters that form this void. This leads to a complete levelling of the clusters.

This situation was experimentally proved in [15]. Therefore, at temperatures near absolute zero, clusters disappear and the crystal transforms into a homogeneous close – packed structure. Depending on the type of molecules, crystals of different systems are formed. Thus, body – centered structures are formed from diatomic molecules, and face – centered structures are formed from triatomic molecules. A model of such structures is shown in Figure 3.

A uniform close – packed structure can be artificially obtained by strengthening structural materials with diatomic molecules of nanoscale thickness. These are thin films.

When strengthening structural parts by applying thin films, the microinhomogeneities of the base material are "healed". The nanoscale film itself is a close – packed structure. As an example, the formation of a silicon surface is shown in Figure 4. by clusters of triatomic molecules (Figure 4,a); the formation of indium clusters on the silicon surface by diatomic molecules (Figure 4,b) and the formation of an indium cluster lattice structure on the silicon surface (Figure 4,c) without defects. This structure is a superconductor.

As the temperature rises from absolute zero, individual atoms of the third coordination layer are freed. An

¹⁾ All Nobel prizes for the development of the BCS theory and others related to superconductivity were awarded for erroneous physical concepts.

inhomogeneous structure with free atoms is formed in intercluster voids. As the temperature rises, the number of intercluster voids with one atom increases and tends to a certain limit. In this temperature range, the solid is a crystal formed by intercluster interaction in the presence of the first and second coordination layers in the cluster.

A complete destruction of the second coordination layer occurs at the melting point. As the temperature rises to the boiling point, the substance remains in the liquid state. In this state, there are clusters with the first coordination layer as well as diatomic or triatomic molecules. The clusters do not interact with each other. As a result, thermal emission occurs in the form of individual clusters and molecules of this substance. If the molecules have an electron affinity, then their emission occurs in the form of negative ions with the formation of an electric double layer.

At the boiling point, clusters dissociate into individual molecules. The liquid state transforms to the gaseous state. In this state, molecules and even individual atoms do not interact with each other.

A further increase in temperature leads to ionization of negative ions. In this case, low – temperature plasma is formed, which is mainly observed in arc and pulsed discharges, as well as under relatively weak laser irradiation.

Under conditions of intense ionization of atoms and molecules, high – temperature plasma is formed. Such plasma is observed in high power pulsed discharges, lightning discharges and under focused laser irradiation.

When the decay of the nuclei of heavy elements of plutonium and uranium takes place and the critical mass is reached, ultra – high temperature plasma is formed. This plasma is used in atomic bombs, and is currently used as a working fluid in nuclear power plants.

In thermonuclear bombs, where the synthesis of light nuclei takes place, the temperature rises further. This leads to the formation of mainly nuclei of the helium atom. Under such conditions, thermonuclear plasma is formed.

Finally, in the interior of planets and on the Sun, relic plasma is formed. The source of energy is

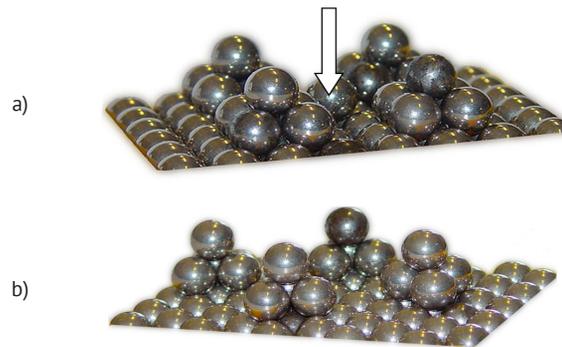


Fig. 3. General view of a crystal [15]:

- 1 – theory taking into account all possible types of interaction;
- 2 – Lennard-Jones potential;
- 3 – Morse potential

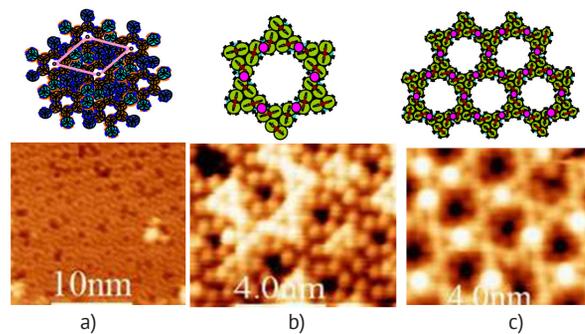


Fig. 4. Theoretical calculation (top) and experimental result (bottom) at a temperature of 573K for [2]:

- a) silicon surface formed by clusters of triatomic molecules;
- b) indium surface with a defect formed by diatomic molecules;
- c) healing of defects of the silicon surface by the cluster lattice structure of indium

the physical vacuum. The physical vacuum is formed by collapsed particles of an electron and a positron. If an electron and a positron are presented in the complex domain, then the real charge is defined as the electron charge, and the imaginary charge is the magnetic charge [16]. In the process of the collapse of an electron and a positron, a new particle quanton is formed in the complex domain, which contains the negative energy of real electric charges and the positive energy of magnetic charges. The total energy of the quanton is zero, since the negative energy of the real electric charge is completely compensated by the positive energy of the imaginary magnetic charge. As a result of interaction with the physical vacuum, an electron and a positron are formed, which have real mass. The resulting mass defect is the energy threshold at which an explosion of the physical vacuum occurs. To produce an explosion of the physical vacuum, energy in the

form of two electromagnetic quanta with energy equal to 1.022MeV is required. Such energy is difficult to achieve in practice.

As space exploration advances, there will be a need for a detailed study of the physical vacuum in order to extract energy from it and control such energy. The first research article in this field was published in the Aeronautics and Aerospace Open Access Journal [17]. A major challenge will be ultra – long range space communications.

Conclusions

A quantum – mechanical theory of the interaction of atoms in the formation of diatomic molecules was developed. Interaction potential includes:

- *cross-link of a valence electron with the nucleus of the opposite atom;*
- *repulsion energy of valence electrons;*

- *binding energy of the induced charge with the nuclei of interacting atoms;*
- *energy of suppression of electrons in the exchange process due to the interaction of a valence electron with its atomic nucleus, taking into account the probability of such an exchange;*
- *repulsion energy of nuclei with different degree of ionization, taking into account the probability of such an event.*

Triatomic molecules are formed when an atom interacts with a diatomic molecule. In this case, the diatomic molecule breaks with the formation of two new diatomic molecules, and the integral dipole electric moments with equal probability in the centre of the molecule create an excess positive

or negative electric charge.

By interacting with each other, diatomic and triatomic molecules form planar cluster structures, and the interaction of clusters forms a planar lattice structure. Planar lattice structures superimpose on each other creating a «layer cake» in the form of a solid (crystal).

It is shown which particles form a state of matter by interacting with each other. At the boundaries of the transition from one state of matter to another, some interacting particles are replaced by others. A new state of matter is formulated – the close-packed state, which is determined by the collective interaction of atoms in a solid.

There are five types of the plasma state of matter:

- *Low temperature plasma, which*

is formed when negative ions are ionized.

- *High-temperature plasma, which is formed when atoms and molecules are ionized.*
- *Ultra-high temperature plasma, which is formed when heavy atoms disintegrate into smaller atoms and release energy equal to the mass defect.*
- *Thermonuclear plasma, which is formed in the process of synthesis of light nuclei with the release of energy equal to the mass defect.*
- *Relic plasma, which is formed when the physical vacuum is excited with the release of the real mass of an electron and a positron, followed by the formation of lava from different elements of the periodic table.*

REFERENCES

1. Gombás, P., 1950. Das Variationsverfahren In: Theorie und Lösungsmethoden des Mehrteilchenproblems der Wellenmechanik. Lehrbücher und Monographien aus dem Gebiete der Exakten Wissenschaften (Physikalischen Reihe), 2. – pp. 151–217. – Basel: Dirkhäuser (in German) Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-6956-08>.
2. Gretchikhin, L.I. Induced potential between interacting particles at the nanoscale level / L.I. Gretchikhin, S.D. Latushkina, V.M. Komarovskaya // Military Technical Courier. Scientific journal of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. – 2015. – vol. 63. – No. 3. – pp. 29–41.
3. Panin, V.E. Structural deformation levels of solids / V.E. Panin, V.A. Likhachev, Y.V. Grinyaev. – Novosibirsk: Nauka, 1985. – 229 p.
4. Panin, V.E. Contemporary issues of plasticity and strength of solids / V.E. Panin // News of Higher Educational Institutions. Physics. – 1998. – No. 1. – pp. 7–34.
5. Frolov, I.A. Physical and chemical principles of cluster dynamics / I.A. Frolov // Cluster dynamics and physical principles of strength. – Gorky: Gorky State Pedagogical Institute Named after M. Gorky, 1983. – pp. 3–24.
6. Elansky, G. N. Structure and properties of metal melts / G. N. Elansky. – Moscow: Metallurgy, 1991. – 160 p.
7. Suzdalev, I.P. Nanoclusters and nanocluster systems. Structure, interaction and properties / I.P. Suzdalev, P.I. Suzdalev // Uspekhi khimii. – 2001. – vol. 70. – Issue 3. – pp. 203–240.
8. Gretchikhin, L.I. Physics of Nanoparticles and Nanotechnologies. General Principles, Mechanical, Thermal, and Emission Properties / L.I. Gretchikhin. – Minsk: Technoprint Ltd., 2004. – 399 pp.
9. Gretchikhin, L.I. Nanoparticles and Nanotechnologies / L.I. Gretchikhin. – Minsk: Pravo i Ekonomika IOOO, 2008. – 406 pp.
10. Coulson, C.A. Valence / C.A. Coulson. – M.: Physmathgiz, 1962. – 247 p.
11. Gretchikhin, L.I. Built-in and induced electric dipole moments in complex atomic systems and in the diatomic molecules / L. I. Gretchikhin // The Aviation Herald. – 2020. – №2. – pp. 28–34.
12. Gretchikhin, L.I. Interatomic interaction in diatomic molecules with taking into account the repulsion of the ions in a positively charged core / L. I. Gretchikhin // Military technical Courier. Scientific Priodixal of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. – 2020. – Vol. 68. – № 2. – pp. 225–248.
13. Gretchikhin, L.I. Close-packed state: the basis of nanotechnology: In 3 volumes / L. I. Gretchikhin / Proceedings of the XIX international scientific and technical conference in Sevastopol, 17–22 september 2012 r. – Donetsk: DonNTU, 2012. – vol. 1. – pp. 195–197.
14. Gretchikhin, L.I. Close-packed state and its role in the strengthening of structural materials / L.I. Gretchikhin, E. G. Podlozny // International collection of research papers «Progressive technologies and systems of mechanical engineering». – DonNTU. – 2013. – Issue 1,2 (46). – pp. 79–89.
15. Makogonyuk, G.D. Nanostructure of the surface of crystals obtained from solutions subjected to various physical actions / G. D. Makogonyuk, V. M. Aidarov, A. D. Sedov // Ulyanovsk Center for Technology Transfer: Collection of annotations of projects of the Youth Innovation Forum of the Volga Federal District (UISTU, 12–14 May 2009). – Ulyanovsk: UISTU, 2009. – p. 183.
16. Gretchikhin, L.I. Basics of radio communications / L.I. Gretchikhin. – Minsk: National Library of Belarus, 2016. – 377 p.
17. Gretchikhin, L.I. Complex charge and electron spin / L.I. Gretchikhin // Aeronautics and Aerospace Open Access Journal. – 2018. – Vol. 2. – № 6. – pp. – 424–428.

Статья поступила в редакцию
05.10.2020

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПРЕССОРА ГТД В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОМУ ПАРАМЕТРУ

Андрей Анатольевич Санько – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры воздушных судов и авиационного оборудования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь tin.777.144@mail.ru

Вячеслав Александрович Потапов – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь potapstark@gmail.com

Роман Игоревич Хованский – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь kettler32@mail.ru

Аннотация: в статье представлен способ измерения степени повышения давления компрессора вертолётного турбовального двигателя ТВ3–117, для определения его технического состояния в процессе эксплуатации в условиях запыленной атмосферы. Разработан блок измерения и записи на flash-накопитель значений давления за компрессором двигателя. Приведен пример результатов газовочных испытаний двигателя с разработанным блоком измерения давления. Представлен алгоритм контроля технического состояния компрессора двигателя ТВ3–117 по комплексному термогазодинамическому параметру – коэффициенту запаса газодинамической устойчивости, с применением метода малых отклонений.

Ключевые слова: запас газодинамической устойчивости, параметры газотурбинного двигателя, эрозионный износ компрессора, помпаж.

Abstract: The article presents a method for measuring the degree of pressure increase of a compressor of a helicopter turbo-shaft engine TV3-117, to determine its technical state during operation in a dusty atmosphere. A block for measuring and recording on flash has been developed - the accumulator of pressure values behind the engine compressor. An example of the results of gas tests of an engine with a developed pressure measuring unit is given. An algorithm for monitoring the technical condition of the compressor of the TV3-117 engine by a complex thermogasdynamic parameter – the safety factor of gas dynamic stability, using the method of small deviations is presented.

Keywords: Gas-dynamic stability margin, parameters of a gas turbine engine, compressor erosion wear, surge.

Обеспечение безопасности полетов является одним из важнейших требований к авиационной системе. Значимость успешного выполнения полетного задания, опасные последствия отказов авиационной техники, определяющее влияние надежности на ее боеготовность и эффективность,

заставляют предъявлять все более высокие требования к безотказной работе авиационной техники в полете. Одной из важнейшей части общей безопасности полетов является техническая безопасность полетов.

Одним из основных элементов воздушного судна (ВС), оказывающий наибольшее влияние на

эффективность выполнения поставленных задач и безопасность полета, является газотурбинный двигатель (ГТД). Из всех существующих авиационных двигателей особое внимание уделяется вертолётным ГТД. Условия работы вертолётных ГТД значительно отличается от самолётных. Выполняя



Рис. 1. Эксплуатация вертолета вблизи земной поверхности [12]

задачи вблизи земной поверхности, взлетая и садясь на естественных площадках, вертолёт находится в облаке им же поднятой пыли, что негативно влияет на газоздушный тракт двигателя (Рис. 1). Контроль технического состояния вертолётных двигателей в условиях запыленной атмосферы являются важными направлениями технической эксплуатации организаций, эксплуатирующих ВС в данных условиях.

Несмотря на принимаемые меры по защите ГТД от попадания песка (частиц пыли) [1], одной из основных проблем в эксплуатации вертолётных двигателей – это эрозийный износ, лопаток компрессора (в первую очередь) и других элементов проточной части двигателя [2, 3].

Пылевая эрозия элементов компрессора вызывает такие отказы, как недопустимый рост температуры газа перед турбиной, снижение мощности двигателя, вибрация из-за дисбаланса вращающихся компонентов, разрушения лопаток, нарушение устойчивой работы двигателя, помпаж.

Наиболее часто используемые в эксплуатации ГТД методы и средства диагностики, представлены на рис. 2. Методы инструментального контроля являются основными в эксплуатации ГТД и имеют достаточно высокую информативность, однако их применение требует больших трудозатрат и в большинстве случаев не дает возможность комплексной оценки технического состояния компрессора ГТД [4]. Однако в последнее время прослеживается тенденция в развитии аналитических методов контроля, широко используется методы диагностики по термогазодинамическим параметрам на основе статистических решений. Применение так называемых комплексных параметров, которые в аналитической форме связывают между собой несколько параметров, таких как давление, температура, расход воздуха, скорость потока и т.д., и тем самым наиболее полно ха-

рактеризуют рабочие процессы, происходящие в двигателе. Возникающие в процессе эксплуатации неисправности оказывают влияние на изменение комплексного параметра в большей степени, чем на каждый отдельно взятый рассматриваемый параметр [5]. При этом могут использоваться математические модели двигателя разного уровня, которые имеют разный уровень сложности для решения практических задач диагностики. Оценка процессов, происходящих в газоздушном тракте двигателя, может быть реализована в том числе с помощью автоматической системы контроля, в которой значения измеряемых параметров сравниваются с расчетными для заранее выбранных условий эксплуатации.

На сегодняшний день один из самых широко используемых вертолётных двигателей в мире является турбовальный ГТД серии ТВЗ – 117. Двигатель ТВЗ – 117 отличается высокой надежностью и большим ресурсом, однако в условиях запыленной атмосферы ресурс двигателя ограничивается допустимым абразивным износом лопаток компрессора [3]. Основным обобщающим параметром состояния компрессора, контролируемым в эксплуатации (Рис. 3), является длина хорды лопатки рабочего колеса первой ступени (РК). При достижении величины износа хорды в периферийной части РК, превышающего допустимую в ремонтной документации величину (>2 мм), лопатка бракуется и снимается с дальнейшей эксплуатации [6]. Таким образом, на практике решения о состоянии компрессора оценивается по состоянию нескольких лопаток первой ступени РК, что носит субъективный характер.

Многообразие факторов, влияющих на газодинамическую устойчивость компрессора (ГДУ), приводит к тому, что существует реальная необходимость в обоснованной с точки зрения ГДУ рекомендации по комплексной оценке технического состояния осевого компрессора двигателя ТВ – 117 в процессе эксплуатации.

Работа двигателя на режимах, где рабочая точка на характеристике компрессора располагается вблизи границы устойчивости (при

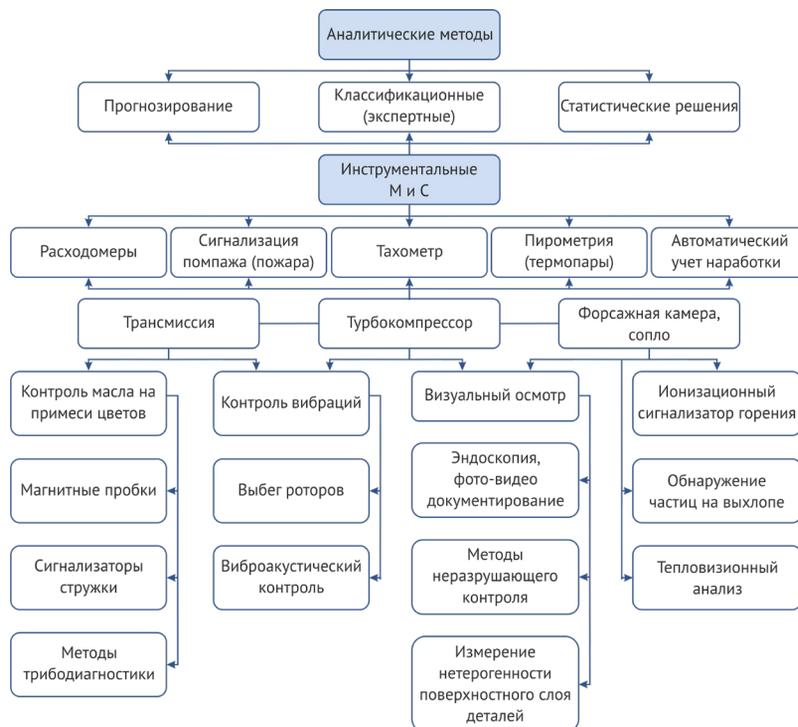


Рис. 2. Методы и средства диагностики ГТД [4]

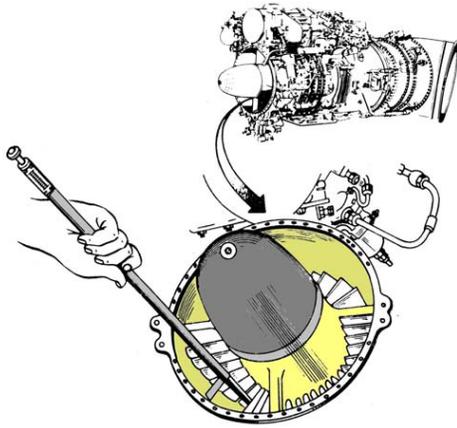


Рис. 3. Технология измерения хорды лопатки РК компрессора в эксплуатации двигателя ТВ3-117 [6]

ухудшении состояния компрессора), т.е. где запас устойчивости мал, недопустима (Рис. 4). Смещение сетки характеристики компрессора приводит и к сдвигу линии рабочих режимов и, вместе с ней, к сдвигу рабочей точки на заданном режиме. При этом двигатель находится в работоспособном состоянии, однако нарушается связь между тягой и частотами вращения роторов двигателя.

Таким образом, для комплексной оценки технического состояния компрессора необходимо располагать его диагностической моделью. Модель может быть, получена в частности, с помощью метода малых отклонений, который широко применяется при исследовании рабочего процесса газотурбинных двигателей [7]. Применение этого метода позволяет исходную систему в большинстве своем нелинейных уравнений рабочего процесса ГТД преобразовать к системе однородных алгебраических уравнений, связывающих между собой небольшие отклонения параметров от их исходных значений.

Основными уравнениями рабочего процесса являются [7]:

Уравнение баланса мощности на валу:

$$G_B L_K = G_T L_T \quad (1)$$

Уравнение неразрывности потока:

$$G_B \left(1 + \frac{1}{\alpha L_0}\right) = (G_T)_T = (G_T)_C \quad (2)$$

Уравнение, связывающее отношения давлений в элементах двигателя:

$$\pi_C = \frac{\pi_v \sigma_B \pi_K \sigma_T \sigma_C}{\pi_T} \quad (3)$$

Соотношения между малыми отклонениями параметров, входящих в уравнения (1) – (3) имеют вид:

$$\begin{aligned} \delta G_B + \delta L_K &= \delta G_T + \delta L_T; \\ \delta G_B &= (\delta G_T)_T = (\delta G_T)_C; \\ \delta \pi_T + \sigma_C &= \delta \pi_v + \delta \pi_K + \delta \sigma_B + \delta \sigma_T + \delta \sigma_C. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя в (4) выражения сжатия и расшире-

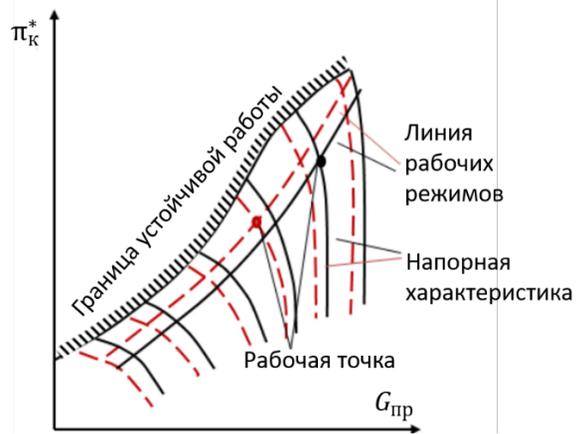


Рис. 4. Напорная характеристика компрессора двигателя ТВ3-117 с ухудшенной и нормальной проточной частью

ния, давлений, температуры и расхода газа, приведенные к малым отклонениям, можно составить систему уравнений в малых отклонениях, которые позволяют установить связь между взаимно обусловленными изменениями параметров рабочего процесса двигателя. В соответствии с принятыми условиями о постоянстве внешних условий: $\delta P_0 = 0$; $\delta T_0 = 0$; $\delta \pi_v = 0$.

Уравнение баланса мощности ГТД в малых отклонениях получает вид:

$$K_3 \delta \pi_T = K_1 \delta \pi_K - \delta \eta_K - \delta \eta_T - \delta T_T \quad (5)$$

Уравнение связывающее отношения давлений:

$$\delta \pi_C = \delta \pi_K - \delta \pi_T + \delta \sigma_B + \delta \sigma_T + \delta \sigma_C \quad (6)$$

Уравнение неразрывности потока в компрессоре, турбине и сопле позволяют определить перепады давлений в элементах двигателя и зависимость между их изменениями. Уравнение равенства расхода газа через критическое сечение соплового аппарата турбины и выходное сечение $(\delta G_T)_T = (\delta G_T)_C$ в малых отклонениях, имеет вид:

$$\delta p_T + \delta F_{c.a} - \frac{1}{2} \delta T_T = \delta p_C + \delta F_C - \frac{1}{2} \delta T_C + K_6 \delta \pi_C \quad (7)$$

Уравнение неразрывности потока через компрессор в малых отклонения устанавливает связь между изменениями расхода через компрессор и турбину. Изменение расхода воздуха через компрессор и турбину на приведенной частоте вращения ($n_k = const$) в рассматриваемом случае будет иметь вид:

$$(1 - K_{10}) \delta \pi_K = \frac{1}{2} \delta T_T - \delta \sigma_T - \delta F_{c.a} \quad (8)$$

Характеристики компрессора устанавливают также связь между относительными изменениями степени повышения давления $\delta \pi_K$ и КПД компрессора $\delta \eta_K$:

$$\delta \eta_K = K_{11} \delta \pi_K \quad (9)$$

Величина $\delta \eta_K$ в выражении (9), представляет собой изменение КПД компрессора в связи со сдвигом рабочей точки по характеристике компрессора $n = const$.

В ГТД величина n_k может изменяться и вследствие каких-либо отклонений от норм в проточной части самого компрессора. Тогда полное изменение КПД компрессора можно представить в виде:

$$\delta\eta_k^* = \delta\eta_k + \delta\eta_k' = K_{11}\delta\pi_k. \quad (10)$$

Если КПД компрессора изменяется только из-за сдвига рабочей точки, то $\delta\eta_k' = 0$. В этом случае уравнение баланса мощности (5) имеет вид:

$$K_3\delta\pi_T = (K_1 - K_{11})\delta\pi_k - \delta T_\Gamma - \delta\eta_k - \delta\eta_T. \quad (11)$$

Подставляя в формулу (10) выражение

$$\delta T_K = \delta T_B + K_1 K_2 \delta\pi_k - K_2 \delta\eta_k,$$

получаем соотношение, определяющее приращение температуры воздуха за компрессором:

$$\delta T_K = (K_1 - K_{11})K_2\delta\pi_k - K_2\delta\eta_k. \quad (12)$$

Изменение температуры заторможенного потока на выходе из турбины δT_T , представленное через параметры турбины, для выполненного двигателя сохраняет вид:

$$\delta T_T = \delta T_\Gamma - K_4\delta\eta_T - K_3 K_4 \delta\pi_T.$$

Таким образом, уравнения (6) – (12) позволяют выразить относительные изменения зависимых переменных в функции приращения независимых переменных.

По изменениям параметров рабочего процесса, пользуясь уравнением:

$$\delta R = \delta G_B + \frac{1}{2} K_9 \delta T_c + \frac{1}{2} K_9 K_3' \delta\pi_c - (K_9 - 1)\delta V,$$

можно вычислить приращение тяги δR :

$$\delta R = K_9 \delta F_c + K_7 K_8 K_9 \delta\pi_c - (K_9 - 1) \delta G_B \quad (13)$$

Соединив уравнения (8 – 13), получим систему уравнений, характеризующую взаимные изменения параметров рабочего процесса ГТД:

$$\begin{cases} K_3\delta\pi_T = (K_1 - K_{11})\delta\pi_k - \delta T_\Gamma - \delta\eta_k - \delta\eta_T; \\ \delta\pi_c = \delta\pi_k - \delta\pi_T + \delta\sigma_B + \delta\sigma_\Gamma + \delta\sigma_c; \\ (1 - 0.5K_3K_4)\delta\pi_T = \delta\sigma_c + \delta F_c' - \delta F_{ca} + 0.5K_4\delta\eta_T; \\ \delta G_B = K_{10}\delta\pi_k + \delta\sigma_B; \\ (1 - K_{10})\delta\pi_k = 0.5\delta T_\Gamma - \delta\sigma_\Gamma - \delta F_{ca}; \\ \delta T_K = (K_1 - K_{11})K_2\delta\pi_k - K_2\delta\eta_k; \\ \delta T_T = \delta T_\Gamma - K_3K_4\delta\pi_T - K_4\delta\eta_T; \\ \delta G_T = \delta G_B + K_5\delta T_\Gamma - (K_5 - 1)\delta T_K - \delta\eta_\Gamma; \\ \delta R = K_9\delta F_c + K_7K_8K_9\delta\pi_c - (K_9 - 1)\delta G_B \end{cases} \quad (14)$$

Преобразуем систему (14) с учетом особенностей рабочего процесса ГТД в условиях загрязнения его проточной части:

1. Система регулирования рассматриваемого типа ГТД выполнена таким образом, что расход топлива при постоянном положении рычага управления двигателем и неизменных внешних условиях изменяться не будет, т.е. $\delta G_T \approx 0$.
2. Поскольку при законе регулирования $n = \text{const}$ $G_T = \text{const}$, не происходит смещения рабочей точки относительно характеристики компрессора, то $K_{11} = 0$.
3. Коэффициент восстановления давления в воздухозаборнике в данном случае практически изменяться не будет, т.е. $\sigma_B \approx 0$.
4. Коэффициент восстановления давления в камере сгорания зависит в основном от конструкции камеры сгорания также практически не будет изменяться, т.е. $\sigma_\Gamma \approx 0$.
5. Коэффициент восстановления давления газа в сопле будет сохраняться постоянным, т.е. $\sigma_c \approx 0$.
6. Площадь сопла сохраняется постоянной $F_c \approx 0$. Коэффициент выделения тепла зависит, в основном, от конструкции камеры сгорания.
7. Для выполненного двигателя — $\eta_\Gamma \approx 0$.

Исходя из принятых допущений, после преобразований, систему уравнений (14) в малых отклонениях, можно записать в виде:

$$\begin{cases} \delta\pi_c = \delta\pi_k - \delta\pi_T; \\ \delta G_B = \delta\pi_k - 0.5\delta T_T; \\ (1 - 0.5K_3K_4)\delta\pi_T = K_6\delta\pi_c + 0.5K_4\delta\eta_T; \\ \delta T_K = K_1K_2\delta\pi_k - K_2\delta\eta_k; \\ \delta T_T = \delta T_T - K_3K_4\delta\pi_T - K_4\delta\eta_T; \\ \delta T_T + K_3\delta\pi_T + \delta\eta_T = \frac{K_{17}}{K_2}\delta T_T + (1 - K_{17})\delta G_B; \\ \delta G_B + K_5\delta T_T - (K_5 - 1)\delta T_K = 0; \\ \delta R = K_7K_8K_9\delta\pi_c - (K_9 - 1)\delta G_B. \end{cases} \quad (15)$$

Таким образом, для двигателя ТВЗ – 117 диагностические уравнения (модель) должны быть составлены таким образом, чтобы его основные параметры характеризовали собой узел компрессора, а также изменение характеристик двигателя в целом. При этом в качестве зависимого параметра должна быть использована температура газа перед турбиной. В качестве дополнительного зависимого параметра предлагается использовать величину смещения напорной характеристики компрессора [8]:

$$\delta\bar{n} = [(1 - K_{10})/K_{12}(K'_{10} - K_{10})] \cdot [\delta\pi_k - 0.5\delta T_T/(1 - K_{10})], \quad (16)$$

где K_{10} – постоянная величина, определяемая по напорным характеристикам компрессора; K'_{10} , K_{12} – коэффициенты, определяемые по характеристикам рабочих режимов компрессора.

Как следует из (16), для оценки смещения напорной характеристики $\delta\bar{n}$ наряду с T_T необходимо знать степень повышения давления воздуха в компрессоре π_k . Для этого требуется измерить давление воздуха за компрессором p_k при известных параметрах давления и температуры атмосферного воздуха.

В качестве основных параметров, характеризующих техническое состояние двигателя ТВЗ – 117, используются: $\delta\pi_k$ – изменение степени повышения давления воздуха в компрессоре; $\delta\bar{n}$ – смещение напорной характеристики; δG_B – изменение расхода воздуха; $\delta\eta_k$ – изменения к.п.д. компрессора; δT_T – температуры газа перед турбиной; δG_T – расхода топлива; δT_K – температура за компрессором; $\delta\Delta K_y$ – коэффициента запаса газодинамической устойчивости компрессора.

Для двигателя ТВЗ – 117В, система диагностических уравнений, будет иметь вид:

$$\begin{cases} \delta G_B = \delta\bar{n} - 0.5\delta T_T; \\ \delta\eta_k = K_1\delta\bar{n} - \frac{1}{K_2}\delta T_K; \\ \delta T_K = (-K_5\delta T_T - \delta G_B)/(K_5 - 1); \\ \delta\bar{n} = [(1 - K_{10})/K_{12}(K'_{10} - K_{10})] \cdot [\delta\pi_k - 0.5\delta T_T/(1 - K_{10})]; \\ \delta\Delta K_y = \delta G_B - \delta\bar{n} - 1; \end{cases} \quad (17)$$

Таблица 1. Коэффициенты взаимного влияния параметров двигателя ТВЗ–117

Коэфф. влияния	90% n_k	85% n_k	80% n_k
K_1	0.615	0.615	0.615
K_2	0.507	0.507	0.507
K_5	2.277	2.277	2.277
K_{10}	-0.5	-0.57	-0.61
K'_{10}	0.662	0.757	0.952
K_{12}	3.253	3.563	3.63

Коэффициенты взаимного влияния параметров (17), получены по характеристикам нового двигателя ТВЗ – 117 на соответствующем режиме его работы (Таблица 1).

С учетом Таблицы 1, уравнения (17) можно привести к виду указанному в Таблице 2.

В модели, приведенной в Таблице 2 для определения относительных изменений основных и зависимых параметров рабочего процесса, характеристик элементов проточной части и основных данных на заданном режиме, необходимо использовать начальные значения, полученные в результате статистической обработки результатов испытаний партии новых двигателей.

Предлагаемый алгоритм контроля технического состояния компрессора с применением метода малых отклонений представлен на рис. 5. Для определения

Таблица 2. Диагностическая модель двигателя ТВЗ–117, для различных режимов его работы

Парам.	Расчетные формулы для различных режимов двигателя		
	90% n_k	85% n_k	80% n_k
$\delta\bar{n}$	$0.4024\delta\pi_k - 0.1704\delta T_T$	$0.3429\delta\pi_k - 0.1389\delta T_T$	$0.3413\delta\pi_k - 0.1426\delta T_T$
δG_B	$-0.0763\delta T_T - 3.3878\delta\bar{n}$	$0.0948\delta T_T + 4.2823\delta\bar{n}$	$-0.0819\delta T_T + 5.7443\delta\bar{n}$
$\delta\eta_k$	$-17440\delta T_T + 1.8220\delta\bar{n}$	$-1.6037\delta T_T + 2.1110\delta\bar{n}$	$-1.4474\delta T_T + 2.0991\delta\bar{n}$
δT_K	$0.4540\delta T_T - 3.8740\delta\bar{n}$	$0.4380\delta T_T - 3.7249\delta\bar{n}$	$0.4270\delta T_T - 3.0145\delta\bar{n}$
$\delta\Delta K_y$	$-2.37958\delta T_T + 7.1678\delta\bar{n}$	$-2.37958\delta T_T + 9.789\delta\bar{n}$	$-2.37958\delta T_T + 8.671\delta\bar{n}$

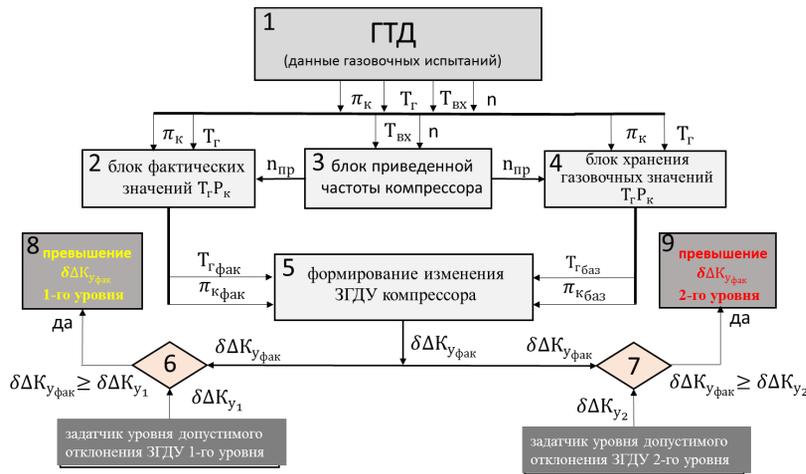


Рис. 5. Алгоритм определения изменения КЗГДУ компрессора и основных данных двигателя ТВ3–117

изменений параметров рабочего процесса используются значения, полученные в результате предыдущих испытаний двигателя, формируемых в блоке 4. С использованием полученной системы уравнений (Таблица 2) в блоке 5, формируется относительное изменение значения величины коэффициента запаса газодинамической устойчивости (КЗГДУ). Также данный алгоритм имеет возможность одновременного контроля двух уровней снижения КЗГДУ предкритического и критического состояний компрессора, блок 8 и 9 соответственно.

Для исследования предлагаемой методики были проведены натурные испытания разработанного газочного стенда ГТД ТР3–117 (Рис. 6) [9]. В результате испытаний

проведен анализ полученных параметров двигателя на расчетных режимах его работы с ухудшенной и номинальной характеристикой компрессора. Ухудшение характеристики компрессора выполнено за счет регулировки углов установки направляющего аппарата (НА). π_k компрессора уменьшила свое значение с 3,1 до 2,7. T_g — температура газов перед турбиной, выросла с 790 до 810 °С. При максимальной абсолютной погрешности датчиков давления и температуры $\Delta p_k = 0.2$ ед. и $\Delta T_g = 10$ ед.

В результате смещения НА компрессора на 4 ниже номинальной характеристик углов НА (что недопустимо по данным эксплуатационной документации и контролируется в регламентный период)



Рис. 6. Внешний вид газочного стенда ТР3–117

уменьшило КЗГДУ на 9% (Рис. 7). Таким образом, линия рабочих режимов компрессора приблизилась к границе неустойчивой работы (помпажу) с 15 до 6%.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный алгоритм позволяет комплексно определить состояния компрессора ГТД, в том числе выявить дефекты на ранней стадии их возникновения, а также осуществить контроль развития данных дефектов, что обеспечивает своевременное проведение работ по обслуживанию, ремонту компрессора или его замене. Однако существует проблема в дефиците получаемой информации от штатных датчиков регистрации работы ГТД на вертолёте. Помимо температуры газов перед турбиной T_g и оборотов турбокомпрессора n для определения состояния компрессора по комплексному параметру КЗГУ, необходимо знать степень повышения давления компрессора [10, 11].

Данный параметр можно измерить, используя штатный потенциометрический датчик давления МП–10МР, входящий в состав измерителя режимов ИР–117В [6]. Он предназначен для дистанционного контроля режимов работы двух двигателей вертолетов Ми–8 и Ми–24 с силовыми установками ТВ3–117. Для измерения напряжения $U_{вых}$ с датчика МП–10МР и преобразования сигнала в цифровой код был разработан блок (ПВ–1), представленный на рис. 8. Данный блок подключается к датчику МП–10МР по средствам коммутационных проводов и способен кроме P_k измерять давления, температуру и влажность атмосферного воздуха с последующей записью на flash-накопитель, с регистрацией времени и даты работы двигателя.

На рис. 9 представлены результаты измерения P_k , с помощью разработанного блока с сопоставлением оборотов и температуры двигателя по данным объективного контроля. Данные результаты свидетельствуют о возможности измерения P_k компрессора двигателя в процессе эксплуатации без нарушения его конструкции и применения полученных данных для определения технического состояния его компрессора.

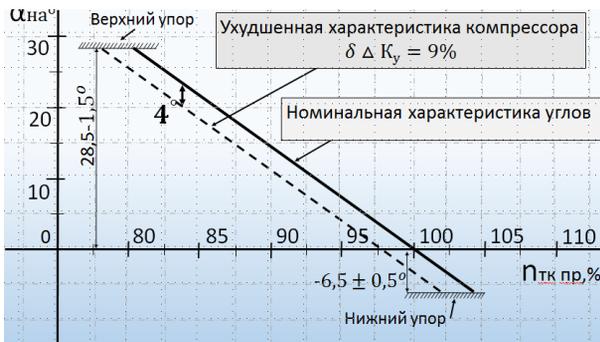


Рис. 7. График характеристики компрессора

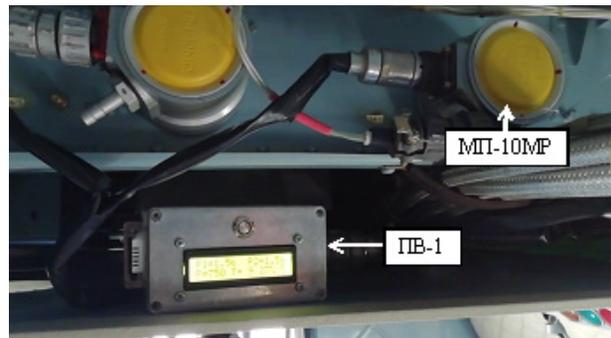


Рис. 8. Место установки блока ПВ-1 и расположение датчика МП-10МР на вертолете МИ-8

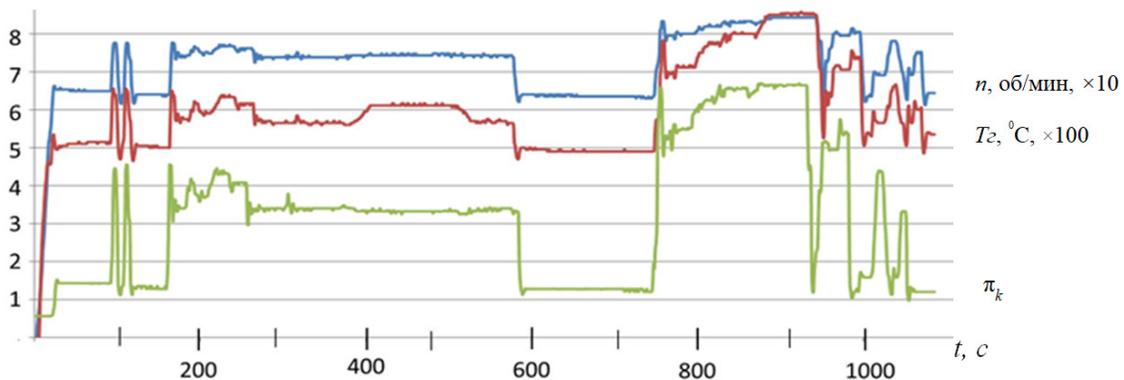


Рис. 9. Графики параметров ГТД ТВ3-117 полученные в ходе натуральных испытаний

Заключение

Таким образом, в ходе работы:

- разработана диагностическая модель контроля технического состояния вертолётного ГТД ТВ3-117 по комплексным термодинамическим параметрам на основе системы уравнений, полученных с помощью метода малых отклонений;
- разработан алгоритм позволяющий определить техническое состояние компрессора ГТД, в том числе выявить дефекты на ранней стадии их возникновения, а также осуществить контроль развития данных дефектов, что обеспечивает своевременное проведение работ по обслуживанию, ремонту компрессора или его замене;
- разработан и изготовлен цифровой блок измерения и записи на flash-накопитель значений давления за компрессором двигателя. Приведен пример первых результатов газодинамических испытаний двигателя с разработанным блоком.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гишваров, А.С. Моделирование и оптимизация характеристик пылезащитного устройства вертолётного ТВД / Р.Р. Аитов, А.М. Айтумбетов // Современные проблемы проектирования и эксплуатации авиационных двигателей: сб. науч. тр. – Уфа: УГАТУ, 2014. – С. 58–62.
2. Павленко, Д.В. Закономерности изнашивания рабочих лопаток компрессора вертолётных двигателей, эксплуатирующийся в условиях запыленной атмосферы / Д.В. Павленко // Вестник двигателестроения «Запорожье АО «Мотор Сич». – 2016. – № 1. – С. 42–51.
3. Двирник, Я.В. Предельное состояние осевого компрессора ГТД эксплуатируемого в условиях запыленной атмосферы // Я.В. Двирник, Д.В. Павленко // Вестник двигателестроения. «Запорожье АО «Мотор Сич». – 2018. – № 1. – С. 97–107.
4. Машошин, О.Ф. Диагностика авиационной техники: учебное пособие / О.Ф. Машошин. – М.: МГТУ ГА, 2007. – 206 с.
5. Сиротин, Н.Н. Основы конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS технологий. Эксплуатация и надежность ГТД и ЭУ / Н.Н. Сиротин, Е.Ю. Марчуков. – М.: НАУКА, 2012. – Книга 3. – 615 с.
6. Богданов, А.Д. Турбовальный двигатель ТВ3-117ВМ (Конструкция и техническое обслуживание): учебное пособие / А.Д. Богданов, Н.П. Калинин, А.И. Кривко. – М.: Воздушный транспорт, 2000. – 392 с.
7. Черкез, А.Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений / А.Я. Черкез. – М.: Машиностроение. – 1975. – 380 с.
8. Купчик, Г.Я. Использование метода малых отклонений для косвенного определения изменения параметров рабочего процесса и основных данных вертолётного ТВД, возникающих в результате эксплуатационных факторов / Г.Я. Купчик, К.К. Ступаков. – Киев, КИИГА, 1977. – 45 с.
9. Потапов, В.А. Контроль технического состояния компрессора газотурбинного двигателя ТВ3-117 по изменению запаса его газодинамической устойчивости / В.А. Потапов, А.А. Сянько // Вестник УГАТУ. – 2019. – № 3(85). – С. 88–95.
10. Ахмедзянов, А.М. Диагностика состояния ВРД по термодинамическим параметрам / А.М. Ахмедзянов. – М.: Машиностроение. – 1983. – 206 с.
11. Лозинский, Л.П. Оценка технического состояния авиационного ГТД / Л.П. Лозинский, А.К. Янко. – М.: Транспорт, 1982. – 160 с.
12. Научно-технический журнал «Двигатель» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://engine.aviaport.ru/issues/62/page04.html>

Статья поступила в редакцию
03.04.2020

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОЧНОСТИ МУЛЬТИСИСТЕМНЫХ GPS/GLONASS/BEIDOU ПРИЕМНИКОВ

Олег Николаевич Скрыпник – профессор, академик Российской академии естествознания, доктор технических наук, профессор кафедры организации движения и обеспечения полетов на воздушном транспорте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
skripnikon@yandex.ru

Роман Олегович Арефьев – кандидат технических наук, доцент кафедры авиационного радиоэлектронного оборудования Иркутского филиала Московского государственного технического университета гражданской авиации, Российская Федерация
seven7772009@yandex.ru

Аннотация: В работе приведены результаты натурных экспериментов по исследованию характеристик точности позиционирования, выполненных с приемниками Геос-1М (производство Россия) и модуля ATGM336H (Китай). Эксперименты проводились в городских условиях в режимах работы приемников по различному сочетанию систем, а также в ГЛОНАСС/GPS/Beidou режиме. Анализ результатов экспериментов выполнен путем применения специализированного программного обеспечения и алгоритмов статистической обработки. Полученные результаты позволяют оценить характеристики погрешностей позиционирования и эффективность работы мультисистемного GNSS приемника в различных условиях и режимах работы. Это может быть использовано на практике для выбора наиболее эффективного режима работы мультисистемного приемника при заданных условиях.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система, GNSS, мультисистемный GNSS приемник, точность позиционирования, геометрический фактор.

Abstract: The paper presents the results of experiments to study the characteristics of positioning accuracy performed with GEOS-1M receiver (manufactured in Russia) and the ATGM336H module (China). Experiments were carried out in urban conditions in receiver modes using a different combination of systems, as well as in GLONASS/GPS/Beidou mode. The analysis of experimental results is performed using specialized software and statistical processing algorithms. The results obtained allow us to evaluate the characteristics of positioning errors and the efficiency of the multi-system GNSS receiver in various conditions and operating modes. This can be used in practice to select the most efficient mode of operation of a multi-system receiver under specified conditions.

Keywords: Global navigation satellite system, GNSS, multi-system GNSS receiver, positioning accuracy, geometric dilution of precision.

Традиционно приемники глобальных навигационных спутниковых систем навигации (GNSS – Global Navigation Satellite System) гражданских потребителей различного назначения в основном обеспечивают обработку сигналов одного спутникового созвездия – системы ГЛОНАСС (Россия), GPS (США) или Beidou (Китай), введенной в июне 2020 г. в коммерческую

эксплуатацию как глобальная система. Для гражданских потребителей доступны для решения задачи позиционирования сигналы, принимаемые на одной частоте диапазона L1. Это в ряде случаев не обеспечивает требуемую точность, надежность, доступность, целостность и функциональную готовность системы навигации [1].

Получение дополнительных эксплуатационных выгод от приме-

ния спутниковых навигационных технологий станет возможным при одновременном использовании в GNSS созвездий навигационных спутников (НС) GPS, ГЛОНАСС и Beidou, а в перспективе – еще и системы Galileo (Евросоюз). Приемники GNSS, позволяющие работать по одному или нескольким созвездиям навигационных спутников (НС) как отдельно, так и одновременно, называют мультисистемными.

Мультисистемные, в основном ГЛОНАСС/GPS, приемники давно и успешно реализуются на рынке профессиональной аппаратуры, например в геодезической аппаратуре, в авиационных приемниках российского производства (СН – 4312, А – 737 и др.). Использование мультисистемных GNSS приемников, вместе с переходом к работе в двухчастотном режиме (DFMC), является одним из элементов дорожной карты в области навигации, содержащейся в Глобальном аэронавигационном плане и других документах Международной организации гражданской авиации ИКАО [2, 3].

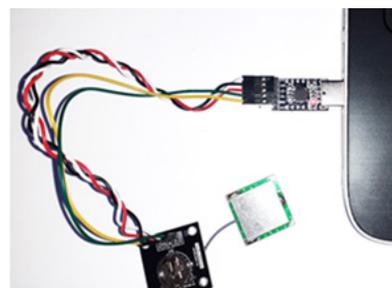
Работа GNSS приемника по нескольким созвездиям одновременно обеспечивает лучшие условия навигационного сеанса, под которыми будем понимать геометрический фактор (GDOP – Geometrical Dilution of Precision) – параметр, который зависит от числа и расположения относительно потребителя НС рабочего созвездия (по сигналам которых выполняются навигационные определения) [1]. Очевидное преимущество мультисистемного приемника заключается в способности принимать большое число сигналов от НС различных систем, что обеспечивает повышенную вероятность местоопределений при затрудненных условиях приема, например, при затенениях сигналов рельефом местности, высотными зданиями и сооружениями, в сложной помеховой обстановке. В ряде случаев можно ожидать повышения точности определения координат за счет избыточности измерений псевдодалностей до НС.

Цель исследования

Системы, входящие в состав GNSS, отличаются параметрами орбитальных группировок, структурой сигналов, точностью эфемеридного обеспечения, используемыми моделями земного эллипсоида. Это приводит к существенным различиям в схемных построениях радиочастотных трактов приемников и различиях в алгоритмах обработки информации. Важно отметить, что внедрение и сертификация мультисистемных GNSS приемников для использования в коммерческой авиации в соответствии



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид приемника Геос-1М (а) и модуля ATGM336Н с антенной (б)

со стандартами и рекомендуемой практикой (SARPs) ИКАО должно базироваться на оценке характеристик погрешностей навигационных определений, обеспечиваемых в различных условиях функционирования приемников.

Как показывает анализ результатов исследований различных авторов [4 – 8], работа в мультисистемном режиме, несмотря на очевидное улучшение геометрического фактора (ГФ), не всегда приводит к ожидаемому выигрышу в точности позиционирования. Это эффект проявляется по-разному для приемников различных производителей и в различных условиях функционирования. Поэтому представляет интерес исследование и сравнение характеристик погрешностей позиционирования GNSS приемников различных производителей при работе как по отдельным системам, так и в мультисистемном режиме.

Таким образом, цель представленной работы состоит в исследовании характеристик погрешностей позиционирования в различных режимах работы GNSS приемников различных производителей по системам ГЛОНАСС, GPS, Beidou и при их различных сочетаниях.

Проведение таких исследований является актуальной научно-практической задачей, решение которой позволит выявить особенности функционирования и получить практические рекомендации по применению мультисистемных GNSS приемников.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований использовался приемник Геос – 1М (Россия) и модуль ATGM336Н (Ки-

тай) (рис. 1). Приемник ГЕОС – 1М может работать по системам ГЛОНАСС и GPS отдельно, а также в ГЛОНАСС/GPS режиме. При этом возможно использование режима динамической фильтрации выходной информации приемника. Модуль ATGM336Н может работать по системам ГЛОНАСС, GPS, Beidou как отдельно, так и в различных сочетаниях, в том числе в режиме ГЛОНАСС/GPS/Beidou.

Эксперименты проводились в пункте с координатами 52,27° с.ш., 104,36° в.д., высота 466,15 м, размещенным в городской черте. Вследствие этого при навигационных определениях часть НС, близких к плоскости радиогоризонта, оказывалась в зоне затенения из-за наличия высотных зданий вблизи расположения антенны, вследствие чего прием сигналов от них был невозможен.

В процессе измерений фиксировались координаты приемника, количество НС рабочего созвездия, вертикальный VDOP и горизонтальный HDOP геометрические факторы. Измерения проводились с дискретностью 1 с на суточном интервале наблюдения. По полученному ряду измерений оценивалась среднеквадратическая погрешность (СКП) измерений каждой из координат согласно выражению:

$$\sigma_x = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2},$$

где N – число измерений, x_i – измеренное приемником на i -м шаге значение координаты, $m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ – оценка истинного значения координаты приемника.

Преобразование погрешностей позиционирования в ме-

трическую систему отсчета осуществлялась в соответствии с выражениями:

$$\delta B_i = (B_i - m_B) \cdot (a+H),$$

$$\delta L_i = (L_i - m_L) \cdot (a+H) \cdot \cos B_0,$$

где $\delta B_i, \delta L_i$ – погрешности измерения приемником соответственно широты и долготы на i -м шаге измерений; B_i, L_i – координаты приемника, измеренные на i -м шаге; m_B, m_L – оценки истинных координат (широты и долготы) приемника; $a = 6378245$ м – большая полуось земного эллипсоида; H – высота антенны приемника над поверхностью земного эллипсоида.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований приемника Геос – 1М в виде диаграмм рассеяния мгновенных значений погрешностей позиционирования по широте и долготе (при отключенной динамической фильтрации) представлены на рис. 2. На диаграммах показаны окружности, соответствующие предельной ($3\sigma_r$), максимальной ($2\sigma_r$) и среднеквадратической (σ_r) погрешностям определения местоположения, где

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_B^2 + \sigma_L^2}.$$

Представленные результаты показывают, что погрешности позиционирования максимальны в режиме ГЛОНАСС, уменьшаются в режиме GPS и минимальны при работе в совмещенном режиме. Степень рассеяния погрешностей при работе по ГЛОНАСС (рис. 2, а) значительно выше (от –70 м до +60 м по широте и от –30 м до +65 м по долготе), чем в остальных режимах. Следует отметить, что при работе по GPS (рис. 2, б) характерен эффект большего разброса мгновенных значений погрешностей по широте (от –40 м до +50 м), который становится менее выраженным при работе в режиме ГЛО – НАСС/GPS (рис. 2, в) (от –20 до +30 м).

На рис. 3 представлены реализации погрешностей позиционирования (1 – широта, 2 – долгота,

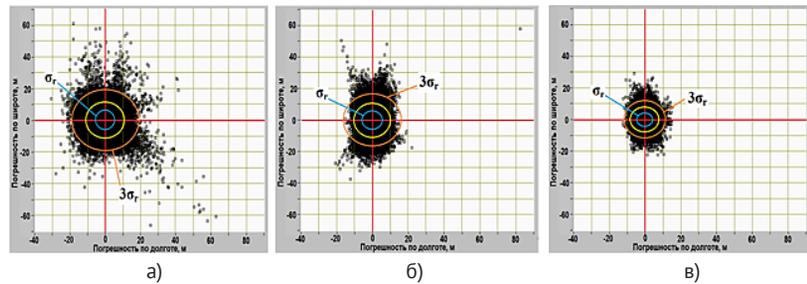


Рис. 2. Диаграммы рассеяния погрешностей позиционирования Геос–1М

Таблица 1. Обобщенные результаты экспериментов с приемником Геос–1М

	ГЛОНАСС	GPS	ГЛОНАСС/GPS
	п. Б/д.ф.*	п. Б/д.ф.	п. Б/д.ф.
СКП широты, м	4,73/2,83	4,81/0.41	3,31/0.53
СКП долготы, м	3,99/3,04	2,7/0.36	2,13/0.63
СКРП, м	6,2/4,15	5,5/0,55	3,9/0,82
СКП высоты, м	8,72/6,32	7,05/0.44	5,23/1.02
Среднее число НС	7,89	9,77	17,61
Средний VDOP	1.52	1.29	0.9
Средний HDOP	1.21	0.96	0.69

* д.ф. – включен режим динамической фильтрации

Таблица 2. Обобщенные результаты экспериментов с модулем ATGM336H

Режим работы	Среднеквадратическая погрешность, м			VDOP	HDOP	Среднее кол-во НС
	широта	долгота	высота			
ГЛОНАСС/GPS	0,93	0,45	1,18	0,87	0,59	21,2
Beidou/GPS	1,35	0,66	0,88	0,80	0,61	23,5
ГЛОНАСС/Beidou	1,06	0,92	0,75	0,88	0,71	19,6
ГЛОНАСС/GPS/Beidou	0,61	0,56	0,93	0,73	0,54	29,7

3 – высота) приемника Геос – 1М в режиме работы ГЛОНАСС/GPS, графики изменения ГФ (горизонтального HDOP, вертикального VDOP) и количество НС, измерения псевдодалностей до которых включены в обработку при навигационных определениях.

На рассматриваемом интерва-

ле времени наблюдалось от 15 до 21 НС. Прослеживается влияние величины ГФ на значения погрешностей позиционирования, а также очевидная зависимость величины ГФ от числа наблюдаемых НС. При этом нестабильность слежения за отдельными НС (области С, D на рисунках) приводит к заметному

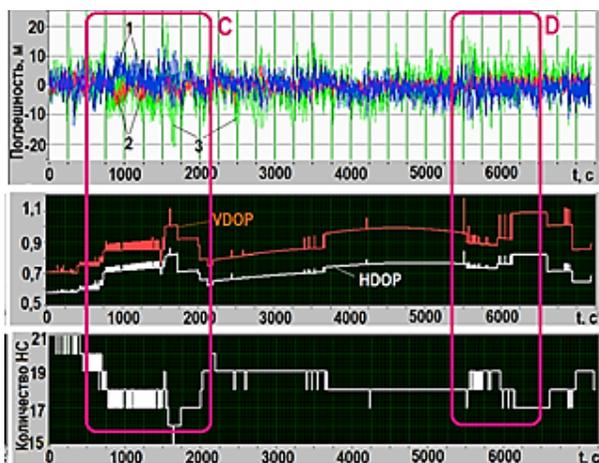


Рис. 3. Результаты эксперимента в режиме ГЛОНАСС/GPS

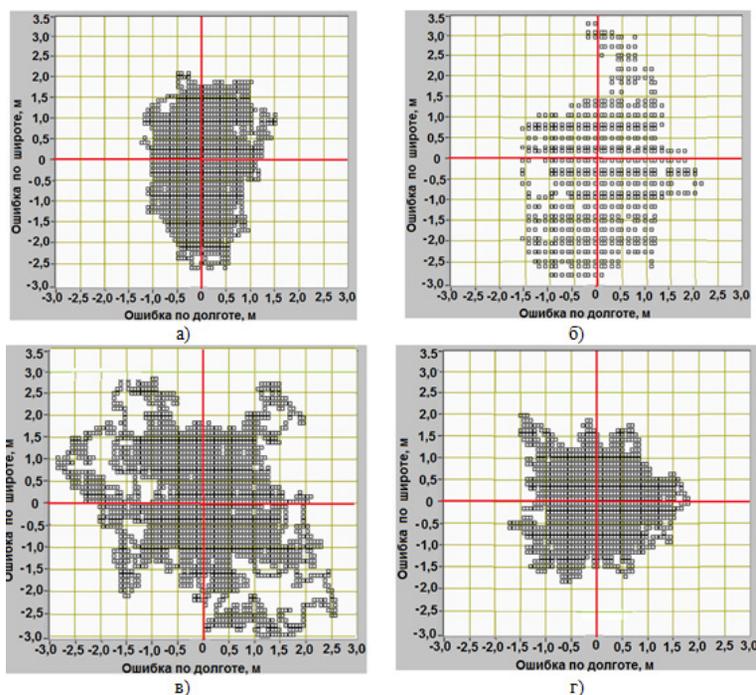


Рис. 4. Диаграммы рассеяния мгновенных значений погрешностей позиционирования модуля ATGM336H

возрастанию мгновенных значений погрешностей позиционирования.

Результаты статистической обработки данных проведенных экспериментов с приемником Геос-1М представлены в Таблице 1.

Анализ полученных результатов показал следующее:

- *среднеквадратическая радиальная погрешность (СКРП) определения местоположения приемником Геос-1М составила 6,2 м (режим ГЛОНАСС), 5,5 м (режим GPS) и 3,9 м (режим ГЛОНАСС/GPS). Работа в*

мультисистемном режиме повысила точность определения местоположения на 37 % (высоты – на 40 %) по сравнению с ГЛОНАСС, и на 29 % (высоты – на 25,8 %) по сравнению с GPS;

- *точность определения местоположения (СКРП) при работе по GPS лучше на 11,3 % (HDOP – на 21 %), чем при работе по ГЛОНАСС, высоты – на 19 % (VDOP – на 15 %);*
- *использование режима динамической фильтрации для неподвижного объекта привело к повышению точности опре-*

деления местоположения: в 1,5 раза (режим ГЛОНАСС), в 16 раз (режим GPS), в 5 раз (режим ГЛОНАСС/GPS).

Результаты исследований погрешностей позиционирования модуля ATGM336H в виде диаграмм рассеяния их мгновенных значений по широте и долготе представлены на рис. 4. На рис. 4,а показана диаграмма рассеяния в режиме ГЛОНАСС/GPS, на рис. 4,б – в режиме Beidou/GPS, на рис. 4,в – в режиме ГЛОНАСС/Beidou и на рис. 4,г – в режиме ГЛОНАСС/GPS/Beidou.

В Таблице 2 приведены результаты статистической обработки измерений, выполняемых в различных режимах работы модуля, на суточном интервале наблюдения 08.08.2020 (в режиме ГЛОНАСС/GPS/Beidou – 09.08.2020).

Анализ полученных результатов показывает, что при работе модуля по двум системам лучшие результаты по точности определения горизонтальных координат наблюдались в режиме ГЛОНАСС/GPS, что соответствует и наилучшему значению HDOP, а высоты – ГЛОНАСС/Beidou при наихудшем в этом режиме VDOP.

Работа модуля в режиме ГЛОНАСС/GPS/Beidou характеризуется улучшением горизонтального HDOP и вертикального VDOP при выполнении навигационных определений в среднем почти по 30 НС. Однако при этом наблюдается значительное улучшение точности позиционирования по широте, и ухудшение точности определения долготы по сравнению с режимом ГЛОНАСС/GPS и по высоте – по сравнению с режимами ГЛОНАСС/Beidou и Beidou/GPS.

Отсутствие существенного выигрыша в точности позиционирования при работе по всем трем системам одновременно может быть связано с недостатками в программно-аппаратной части модуля, связанными с обработкой сигналов Beidou.

Заключение

В результате проведенных исследований получены оценки характеристик точности и проанализированы особенности работы мультисистемных ГЛОНАСС/GPS

и ГЛОНАСС/GPS/Beidou GNSS приемников в различных режимах их работы.

Экспериментально показано, что работа по двум системам обеспечивает значительное повышение точности позиционирования по сравнению с работой по отдельным системам ГЛОНАСС или Beidou и достаточно существенное повышение точности по сравнению с работой по GPS. Работа исследуемого модуля ATGM336H в режиме ГЛОНАСС/GPS/Beidou существенного выигрыша в точности позиционирования, по сравнению с работой по двум системам, причем в любых их сочетаниях, не дает.

Наличие в приемниках функции динамической фильтрации погрешностей измерений обеспечивает значительное повышение точности позиционирования неподвижного объекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ грант № 19–08–00010.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Skrypnik, O.N. Radio Navigation Systems for Airports and Airways. – Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019. – 226 p.
2. Global Air Navigation Plan. Fifth Edition. – 2016. – 142 p.
3. Concept of operations (CONOPS) for dual-frequency multi-constellation (DFMC) Global Navigation Satellite System (GNSS). ICAO Navigation Systems Panel. CONOPS. – 2018. – Vol. 6(4). – P. 49.
4. Xueen Zheng. Analyses of the sensitivity of multi-constellation advanced receiver autonomous integrity monitoring vertical protection level availability to error parameters and a failure model over China / Xueen Zheng, Ye Liu, Guochao Fan, Jing Zhao and Chengdong Xu // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10(6). – P. 11.
5. Скрыпник, О.Н. Экспериментальные исследования характеристик совмещенного GNSS приемника в высоких широтах / О.Н. Скрыпник, Р.О. Арефьев, Н.Г. Астраханцева // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2015. – № 221 (11). – С. 35–42.
6. Маттос, Ф. ГЛОНАСС/GPS для всех: испытания на точность и доступность позиционирования однокристалльного приемника в сложных условиях эксплуатации / Ф. Маттос // Компоненты и технологии. – 2012. – № 5. – С. 165–170.
7. Md. Shaha Nur Kabir. Performance comparison of single and multi-GNSS receivers under agricultural fields in Korea / Md. Shaha Nur Kabir, Ming-Zhang Song, Nam-Seok Sung, Sun-Ok Chung, Yong-Joo Kim, Noboru Noguchi, Soon-Jung Hong // Engineering in Agriculture, Environment and Food. – 2016. – № 9. – pp. 27–35.
8. Скрыпник, О.Н. Оценка характеристик погрешностей позиционирования комбинированных ГЛОНАСС/GPS приемников / О.Н. Скрыпник, Р.А. Арефьев, Н.Г. Арефьева // Современные наукоемкие технологии. – 2019 – № 10. – С. 296–301.

*Статья поступила в редакцию
19.10.2020*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТКАЗОВ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

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

Олег Геннадьевич Карачун – стажер младшего научного сотрудника Научно-исследовательской лаборатории учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
oleg.karachun.99@mail.ru

Аннотация: рассматривается один из возможных подходов к определению отказов в источниках электроэнергии системы электроснабжения переменного тока современных и перспективных самолетов. Предложенный подход основан на использовании алгоритмов нечеткой логики. В качестве объекта исследования выбран синхронный генератор, а в качестве контролируемых параметров для определения состояния генератора – значения действующего напряжения по трем фазам и значение частоты напряжения, в качестве функций принадлежности для значений напряжения и частоты выбраны законы нормального распределения. Выполнены эксперименты, подтвердившие правильность формирования модели, выборы функций принадлежности и количества правил нечеткой логики. Показано, что использование алгоритмов нечеткой логики в ходе мероприятий по технической диагностике позволяет определять несколько состояний системы электроснабжения в сравнении с методами классической логики.

Ключевые слова: техническая диагностика, нечеткая логика, источник электроэнергии, источник переменного тока, отказ источника электроэнергии, определение отказа, отказ.

Abstract: One of the possible approaches to the determination of failures in the power sources of the AC power supply system of modern and future aircraft is considered. The proposed approach is based on the use of fuzzy logic algorithms. A synchronous generator was chosen as the object of research, and the values of the effective voltage in three phases and the value of the voltage frequency were selected as the controlled parameters for determining the state of the generator, the laws of normal distribution were selected as the membership functions for the voltage and frequency values. Experiments have been carried out that confirmed the correctness of the formation of the model, the choice of membership functions and the number of rules. It is shown that the use of fuzzy logic algorithms in the course of technical diagnostics makes it possible to determine several states of the power supply system in comparison with the methods of classical logic.

Keywords: Technical diagnostics, fuzzy logic, power source, alternating current source, power source failure, failure detection, failure.

В настоящее время концепция построения самолетов будущего «*All electric aircraft*» является наиболее совершенной и предусматривает полную электрификацию всех бортовых систем самолета [1]. При таком подходе единственным источником вторичной энергии на самолете является централизованная система электроснабжения. Поэтому ее роль в деле обеспечения безопасности полетов и бесперебойной работы приемников электроэнергии значительно возрастает. Следовательно, задача обнаружения неисправностей и отказов в электрических компонентах системы электроснабжения самолета с полностью электрифицированным оборудованием является актуальной и требует тщательной разработки ввиду, например, быстрого действия протекающих в ней электромагнитных процессов, тяжелых последствий проявления коротких замыканий и др. [2, 3].

Любая техническая система характеризуется одним из двух несовместных состояний: работоспособное и неработоспособное. Мероприятия по диагностике призваны однозначно определить принадлежность системы к одному из этих двух состояний. В особых случаях возникает необходимость в решении задачи классификации — определению соответствия текущего состояния системы одному из заранее классифицированного состояния.

В работе рассматривается один из возможных подходов к определению отказов в источниках электроэнергии системы электроснабжения переменного тока. Предложенный подход основан на использовании алгоритмов нечеткой логики.

В общем случае техническую диагностику с помощью аппарата нечеткой логики можно представить допусковым контролем [4, 5, 6].

В качестве контролируемых параметров для определения состояния источника электроэнергии выбраны значения действующего напряжения по трем фазам и значение частоты напряжения.

Для вычисления степени принадлежности произвольной величины универсального множества к нечеткому применяются функции принадлежности.

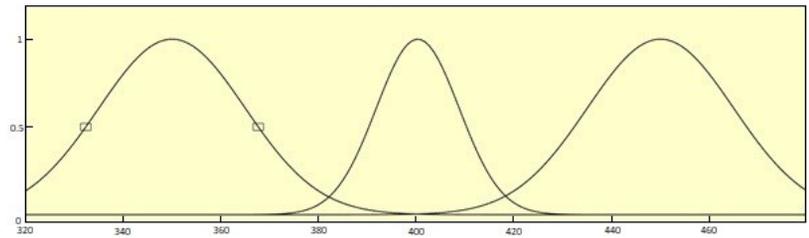


Рис. 1. Функции принадлежности для значений частоты

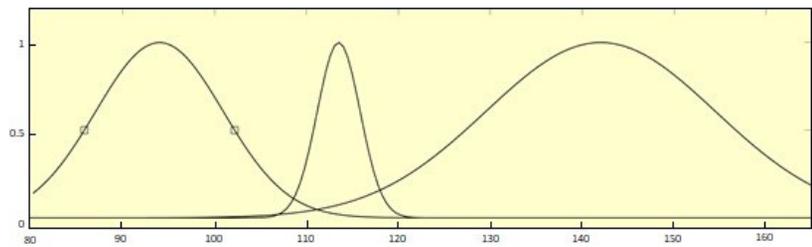


Рис. 2. Функции принадлежности для значений напряжения

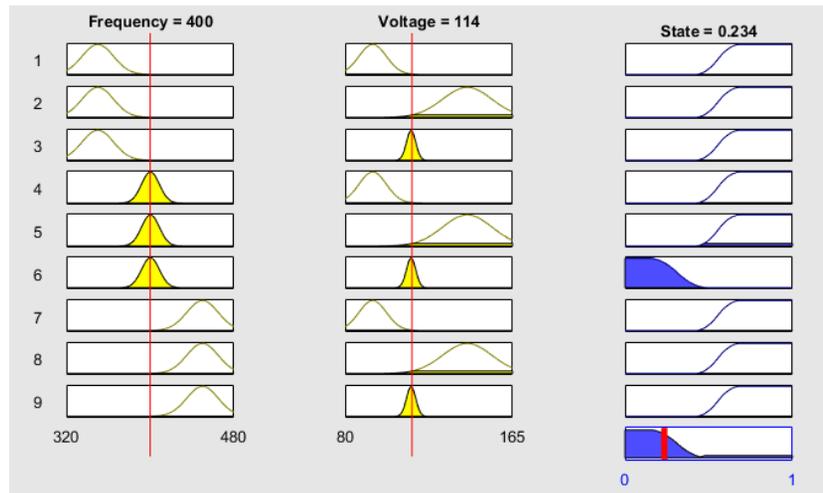


Рис. 3. Правила при значении входных параметров $U = 114$ В и $f = 400$ Гц

Функции принадлежности для значений частоты показаны на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что в качестве функций принадлежности выбраны Гауссовы распределения. Данный выбор обусловлен допущением о том, что максимум функций должен совпадать со значением контролируемого параметра близкого к среднему. В данном случае максимум функции принадлежности совпадает с ее математическим ожиданием, что удобно для дальнейших расчетов.

Функции принадлежности для значений напряжения показаны на рис. 2.

Для напряжения в качестве функций принадлежности также

выбраны законы нормального распределения (рис. 2).

Для описания термов лингвистической переменной диагностических параметров объекта вводятся функции принадлежности. Для термина «исправен» вводится Z-подобная функция принадлежности. Для термина «не исправен» вводится S-подобная функция принадлежности.

Исследования использования нечеткой логики в технической диагностике проводилось в пакете *Matlab*. В качестве алгоритма нечеткого вывода выбран алгоритм Мамдани [3, 4], а для определения выходного параметра составлены девять правил, описывающие зави-

симось выходного термина от комбинации входных (рис. 3). Исходя из классической теории комбинаторики, количество всех возможных комбинаций и исходов равно 9. В таком случае для точного описания модели требуется определить 9 правил (рис. 3).

Проведены эксперименты для утверждения о правильности формирования модели, то есть выборы функция принадлежности и количества правил. Далее рассмотрен каждый из наиболее возможных случаев комбинаций значений входных параметров (напряжение и частота).

На рис. 3 изображены правила при значении входных параметров $U = 114$ В и $f = 400$ Гц, что соответствует номинальным значениям рассматриваемых параметров [7].

Из рис. 3 видно, что выходной параметр в значительной степени принадлежит терму *Normal* и его значение равно 0,234. Таким образом следует однозначно утверждать об отсутствии отказа.

Рассмотрим случай максимально возможного допустимого значения напряжения ($U = 119$ В) и номинального значения частоты $f = 400$ Гц. Результаты эксперимента представлены на рис. 4.

Результатом является значение выходного параметра в большей степени относящееся к терму *Unnormal* и равное 0,623. В таком случае следует утверждать о наличии отказа. Данное заключение противоречит заданным значениям входных параметров, так как они относятся к области допустимых значений. Здесь принято во внимание допущение о возможной погрешности в измерении входного параметра для минимизации вероятности появления ошибки второго рода (ошибочного диагностирования объекта как работоспособного в случае его неработоспособности).

Рассмотрим случай с максимально возможным значением частоты $f = 420$ Гц при номинальном значении напряжения $U = 114$ В (рис. 5).

В данном случае принята во внимание погрешность во время определения значения входного параметра напряжения (U). Результатом логического вывода по алгоритму Мамдани является значение, принадлежащее терму *Unnormal* в большей степени.

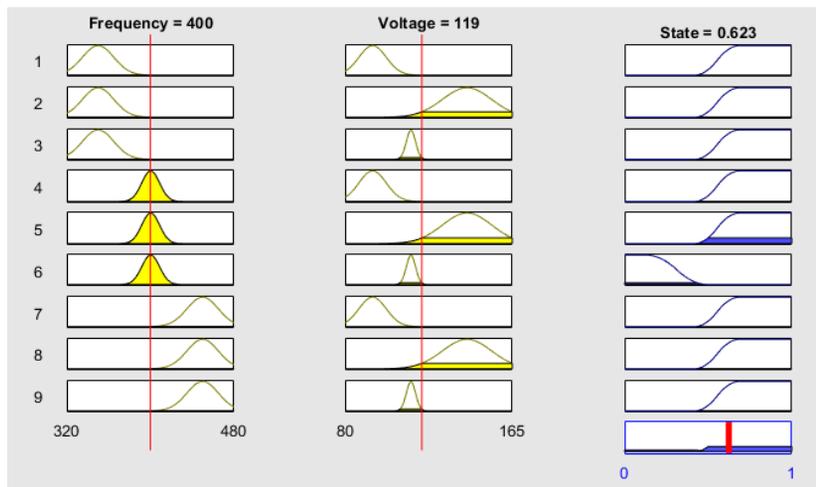


Рис. 4. Результаты моделирования при значении напряжения $U = 119$ В и номинального значения частоты $f = 400$ Гц

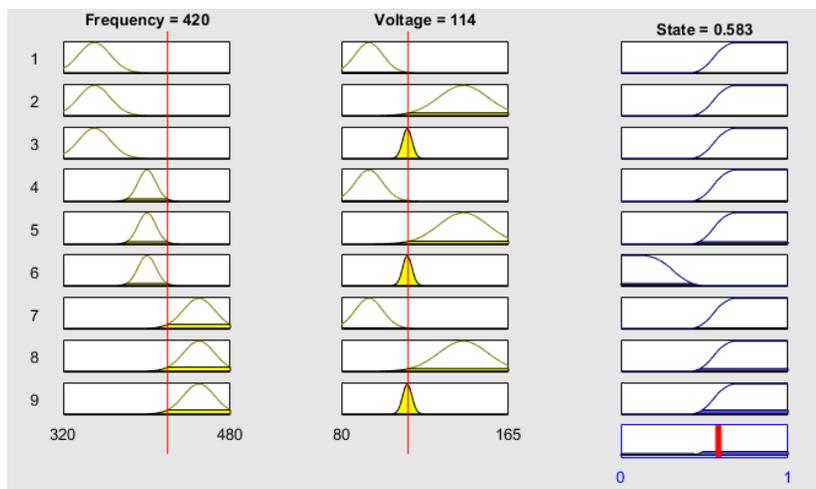


Рис. 5. Результаты моделирования при значении напряжения $U = 114$ В и значения частоты $f = 420$ Гц

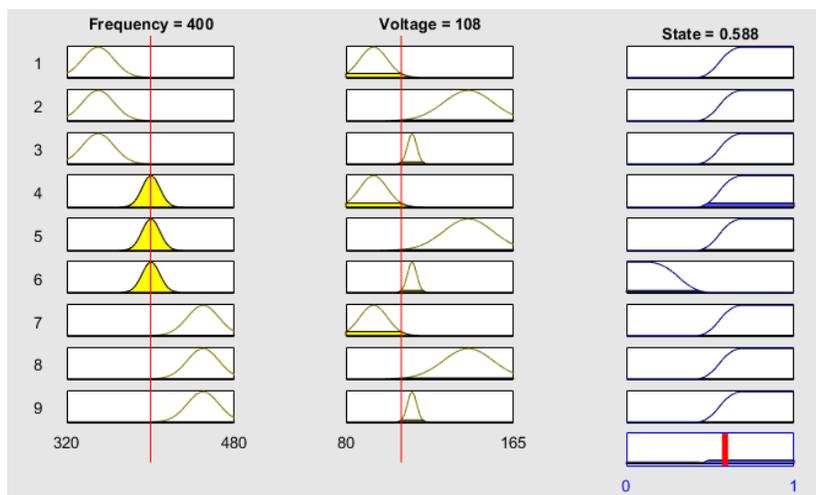


Рис. 6. Результаты моделирования при значении напряжения $U = 108$ В и номинального значения частоты $f = 400$ Гц

Следствием является утверждение о наличии отказа и наличие ошибки первого рода (ошибочного диагностирования объекта как неработоспособного в случае его работоспособности).

На рис. 6 и 7 показаны результаты эксперимента с самыми малыми значениями напряжения и частоты из области допустимых значений.

Из результатов исследований (рис. 6 и 7) видно, что при максимально малых значениях входных параметров, выходное значение относится к терму *Unnormal*, следствием чего является утверждение о наличии отказа и допущении ошибки первого рода.

Также рассмотрен случай одновременно крайних возможных значений из области допустимых значений для параметров *U* и *f* (рис. 8 и 9).

Анализ рис. 8 и 9 показывает, что для одновременно крайних возможных значений из области допустимых значений для параметров *U* и *f*, выходное значение относится к терму *Unnormal*, следствием чего является утверждение о наличии отказа и допущении ошибки первого рода.

Поверхность отклика изменения параметров напряжения, частоты и состояния источника электроэнергии изображена на рис. 10. Под понятием «поверхность отклика» подразумевается геометрическая интерпретация точной регрессионной зависимости, как функции многих переменных – факторов эксперимента.

Поверхность отклика построена в 3 координатах: напряжение (*voltage*), состояние (*state*) и частота (*frequency*). Данная поверхность построена для формирования поля градиентов (рис. 11). Также поверхность отклика может быть использована для общей оценки нечеткого алгоритма в применении к различным объектам диагностики (в данном случае источник электроэнергии).

На рис. 11 изображено поле градиентов в виде стрелок для каждой пары элементов массивов *X*, *Y* и *Z*, а пары элементов *DX*, *DY* и *DZ* используются для указания направления и величины вектора градиента.

Поле градиентов (рис. 11) позволяет отследить области для поля

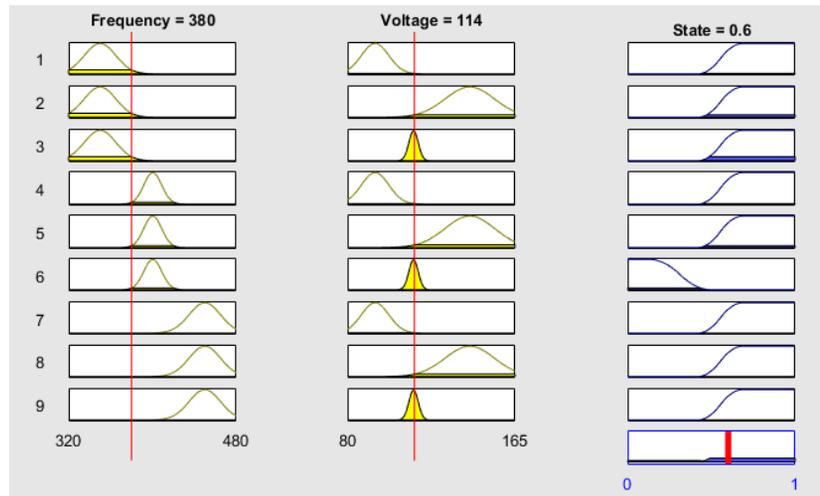


Рис. 7. Результаты моделирования при значении напряжения $U = 114$ В и номинального значения частоты $f = 380$ Гц

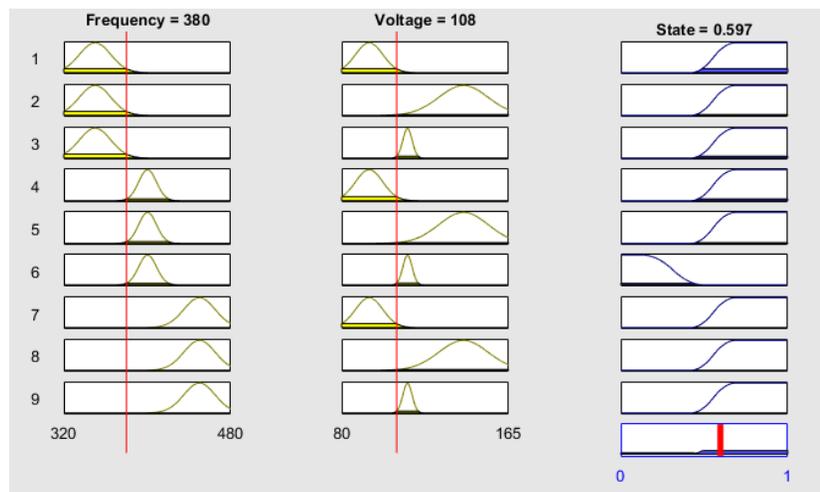


Рис. 8. Результаты моделирования при значении напряжения $U = 108$ В и номинального значения частоты $f = 380$ Гц

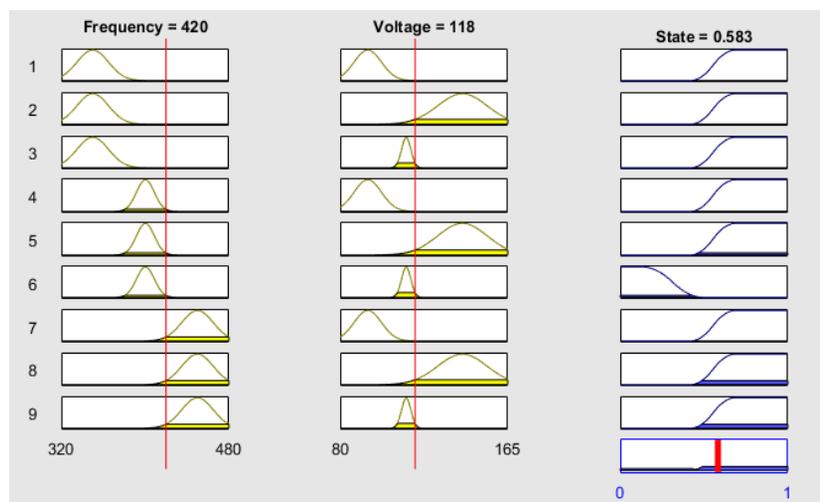


Рис. 9. Результаты моделирования при значении напряжения $U = 118$ В и номинального значения частоты $f = 420$ Гц

«частота-напряжение», в которых наблюдается наибольшее значение производной для поверхности отклика и ее направление. Например, в центральной области графика (рис. 11) векторы градиента направлены от центра, следовательно, в этой области наблюдается высокая степень изменения плоскости. Данное заключение следует использовать при определении направления изменения состояния при изменении контролируемых величин (приближение к неработоспособному состоянию или приближение к работоспособному состоянию).

Таким образом, использование алгоритмов нечеткой логики в ходе мероприятий по технической диагностике позволяет определять сразу несколько состояний системы электроснабжения в сравнении с методами, в которых используется аппарат классической логики (1 – работоспособное состояние и 0 – неработоспособное) [2, 5]. Следовательно, уменьшаются габариты и степень сложности алгоритма диагностики.

Кроме того, анализ результатов моделирования позволяет заключить, что применение нечетких алгоритмов открывает возможности построения практически безынерционной защиты каналов генерирования электрической энергии; повысить помехоустойчивость и быстродействие системы защиты; практически исключить ложные срабатывания защиты; осуществлять операции по изменению структуры систем электроснабжения в зависимости от их технического состояния, а также проводить техническое обслуживание и эксплуатацию систем «по состоянию».

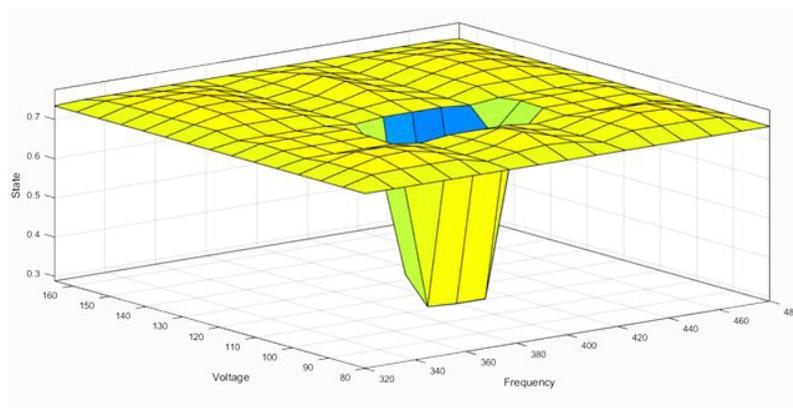


Рис. 10. Поверхность отклика

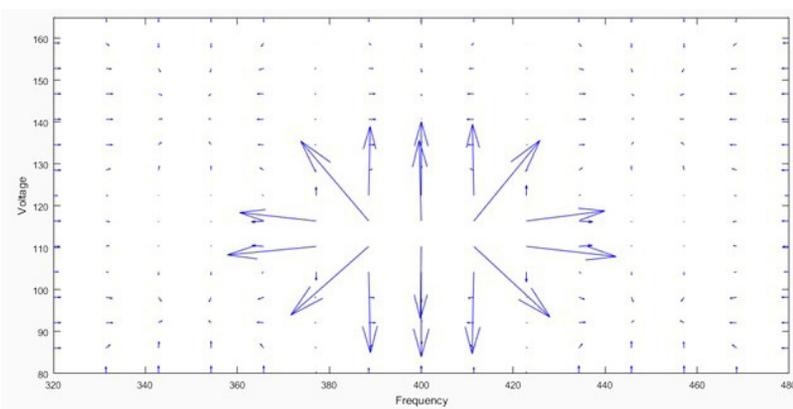


Рис. 11. Поле градиентов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тулинова, Е.Е. Обзор разработок полностью электрических самолетов / Е.Е. Тулинова, К.Л. Ковалев, Н.С. Иванов, А.Е. Ларионов // *Электричество*. – 2016. – № 4. – С. 15–25.
2. Схиртладзе, А.Г. Надежность и диагностика технологических систем / А.Г. Схиртладзе. – М.: Новое знание, 2008. – 518 с.
3. Половко, А.М. Основы теории надёжности / А.М. Половко. – М.: Наука, 2007. – 249 с.
4. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем в среде MatLab / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.
5. Крестин, Е.А. Диагностика машин и оборудования: учебное пособие / Е.А. Крестин, И.Е. Крестин. – СПб.: Лань, 2016. – 376 с.
6. Калитенков, Н.В. Надежность и диагностика транспортного радиооборудования и средств авионики: учебное пособие / Н.В. Калитенков, В.С. Солодов. – М.: МОРКНИГА, 2012. – 521 с.
7. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии: ГОСТ Р 54073 – 2017. – М.: Стандартинформ, 2018. – 33 с.

Статья поступила в редакцию
09.11.2020

УДК 629.7

А.И. КИРИЛЕНКО, О.С. ФИЛИППЕНКО,
Д.Е. БЕЛЬСКАЯ

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ОТКАЗОВ ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ И РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМ САМОЛЕТА Boeing – 737–300/500

Алексей Иванович Кириленко – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
End-bsaa@yandex.by

Ольга Сергеевна Филиппенко – старший преподаватель кафедры общей физики физического факультета учреждения образования «Белорусский государственный университет», Республика Беларусь
Volhafilippenko@gmail.com

Дана Евгеньевна Бельская – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
Danabelskaya2701@gmail.com

Аннотация: по предоставленным статистическим данным об отказах противообледенительной и радиотехнической системам самолета построены модели отказов с применением разных функций вероятностных распределений. Установлены основные причины возникновения отказов с применением разных функций вероятностных распределений. На основе построения вероятностных моделей рассматриваемых систем произведены оценки наработки систем для проведения профилактических мероприятий по устранению отказов, обеспечены оценки отказов имеющегося оборудования, а также минимизированы затраты на обслуживание.

Ключевые слова: противообледенительная система, радиотехническая система, экспоненциальная вероятностная модель, вероятностные распределения, надежность, отказы системы, адекватность модели.

Abstract: According to the statistics on failures of the aircraft's de-icing and radiotechnical systems failure models have been built using different functions of probabilistic distribution. The main causes of failures with different functions of probabilities have been identified. On the basis of probabilistic models provides of the systems are evaluated for preventive failures, assessments of failures of existing equipment, and minimizing maintenance costs.

Keywords: Anti-icing system, radio engineering system, exponential model, probability distribution, reliability, system failures, verify the models.

Одной из важных задач обеспечения безопасности полетов является анализ существующей статистики отказов и выявление основных причин их возникновения [1-3]. В работе предметом изучения выступает построение моделей отказов некоторых подсистем самолета: противообледенительной и радиотехнической. Исследуются модели отказов авиационного оборудования с установлением основных причин их возникновения. Дальнейшее использование разрабатываемых моделей позволяет опти-

мизировать процессы технической эксплуатации [4-5].

Выбор указанных подсистем связан с тем, что их работа оказывает существенное влияние на работу воздушных судов. Кроме того, из анализа данных, предоставленных «Белавиа» (Belavia) указанные системы имеют приблизительно одинаковое процентное содержание отказов (7%) [6-8].

Цель: разработать, построить и проанализировать вероятностных моделей отказов.

Для обоснования поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

щие задачи:

1. назначение и роль подсистемы;
2. построение ряда статистических данных;
3. подбор модели распределения;
4. оценка моделей распределения;
5. расчет некоторых надежностных характеристик.

Построение модели противообледенительной системы

Первым этапом построения модели противообледенительной системы является постановка задачи

на основе анализа существующих отказов и их причин.

«Обледенение — это процесс образования льда на поверхности летательного аппарата (ЛА)» [9, с. 372].

В эксплуатации авиационной техники наряду с турбулентностью атмосферы, электрическими разрядами обледенение является одним из опасных воздействий окружающей среды.

Обледенение поверхностей летательного аппарата может приводить различным отрицательным эффектам, например, к искажению формы профиля, что ведет к ухудшению аэродинамических характеристик [9, с. 372]. Обледенения могут быть как незначительные, так и существенные. Вследствие образования льда наблюдается ухудшение аэродинамических характеристик крыла (аэродинамическое качество, коэффициент подъемной силы, критический угол атаки) и летательного аппарата в 1,5-2 раза [9, с. 372]. Вследствие образования льда на крыле срыв потока с него происходит значительно раньше, чем на крыле безо льда. Сильная турбулизация потока за крылом приводит к тряске самолета, нарушению продольной балансировки, потере устойчивости, а также и сваливанию самолета [9, с. 372]. Образовавшийся лед может быть сброшен с крыла набегающим потоком и тем самым повредить хвостовое оперение и лопатки компрессоров двигателей, которые расположены в хвостовой части фюзеляжа.

Таким образом, выделены основные типы отказов. Далее используется статистика, представленная «Белавиа» («Belavia») к рассмотрению, на основании которой производится расчет моделей.

В процессе исследования получены варианты вероятностно-статистических моделей, с помощью которых можно описать отказы противообледенительной системы.

В качестве предполагаемых распределений рассмотрим: нормальное, Вейбулла, гамма, экспоненциальное и опытные данные. На основании выбранных распределений строятся гистограммы функции плотности распределений от числа отказов (Рис. 1).

Как видно из диаграммы экспериментальных данных, наиболее

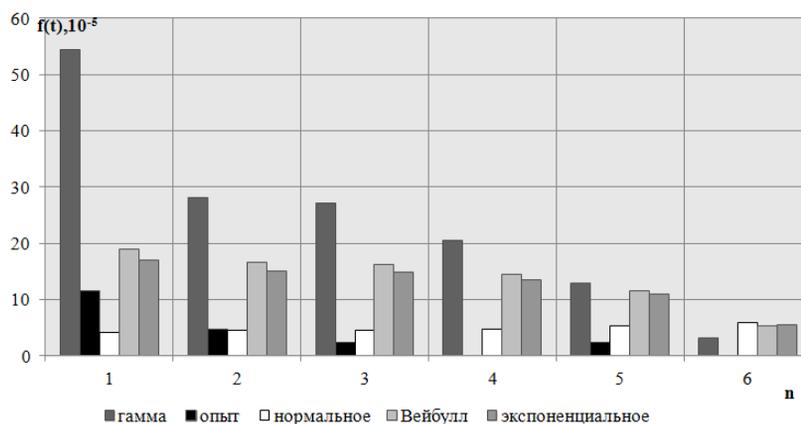


Рис. 1. Гистограмма плотности функции распределения вероятностей от числа отказов по видам распределений для противообледенительной системы

Таблица 1. Параметры α и λ распределения для распределения Вейбулла ($\beta=0,872$)

	Метод максимального правдоподобия	Метод моментов
$\lambda \cdot 10^4, 1/ч$	3,46	2,04
$\alpha, ч$	3257	5459

Таблица 2. Параметры модели для противообледенительной системы

Экспоненциальное	$T_0, ч$	$\lambda \cdot 10^4, 1/ч$
Нижняя граница	3537	0,59
Среднее	5848	1,71
Верхняя граница	16869	2,8

приемлемыми моделями являются распределения Вейбулла и экспоненциальное.

В качестве оценок распределений Вейбулла и экспоненциального используется метод максимального правдоподобия и метод моментов [8, 10].

Параметра α , характеризующего наработку на отказ, рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \left(\sum_{i=1}^n \frac{T_i^\beta}{n} \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (1)$$

По методу моментов этот коэффициент можно рассчитать параметр α :

$$\alpha = \frac{\bar{x}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}, \quad (2)$$

где

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i}$$

В Таблице 1 приведены расчеты параметров Вейбулловского и экспоненциального распределений. Значение второго параметра распределения Вейбулла было получено также экспериментально и составило 0,872.

Для экспоненциального распределения производятся оценки по

Таблица 3. Параметры модели для экспоненциального и Вейбулловского распределений

Распределение	Параметр 1	Параметр 2
экспоненциальное	$\lambda=17 \cdot 10^{-5}$	b=1
Вейбулла	$\alpha=5512$	b=1

Таблица 4. Оценка адекватности экспоненциальной модели

	$D_n^+, 10^{-3}$	$D_n^-, 10^{-3}$	Расчетное, 10^{-3}	Табличное, 10^{-3}
Статистика $\sqrt{n}D_n$ (при $\alpha=0,05$)	5,95	120,6	121	977
Статистика w^2	–	–	47	176

Таблица 5. Расчет характеристик экспериментальных данных по экспоненциальному распределению для противообледенительной системы

Гамма процентный ресурс	Вероятность безотказной работы
299,9	0,368

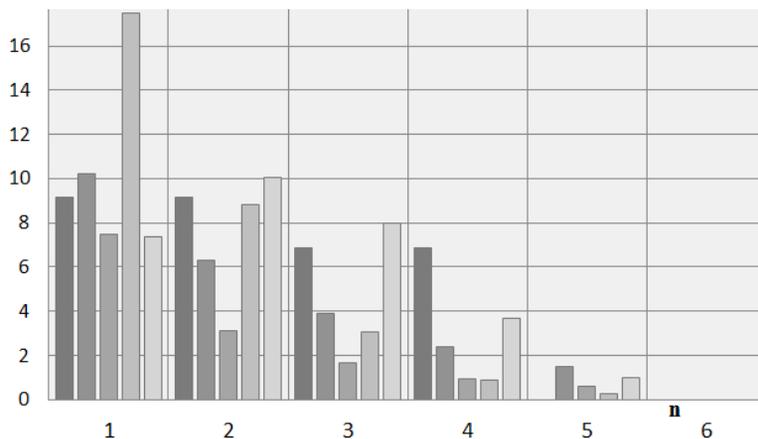


Рис. 2. Гистограмма плотности функции распределения вероятностей от числа отказов по видам распределений для радиотехнической системы

Таблица 6. Параметры α и λ распределения для распределения Вейбулла ($\beta=0,65$)

	Метод максимального правдоподобия	Метод моментов
$\lambda \cdot 10^4, 1/ч$	1,08	3,84
$\alpha, ч$	5518	2248

методу максимального правдоподобия. Производится оценка параметров распределения λ и наработку на отказ, а также их граничные значения (Таблица 2).

При испытаниях восстанавливаемых приборов может быть получена оценка выборки по имеющемуся времени испытания:

$$T_0 = \frac{t_n \cdot a(r, \alpha)}{r}, \quad (3)$$

где $a(r, \alpha)$ табличное значение, где r – число отказов, α – уровень значимости (Таблица 3).

Поскольку коэффициент $b = 1$, необходимо рассматривать частный случай распределения Вейбулла – экспоненциальное распределение.

Используем критерий Колмогорова – Смирнова для оценки адекватности модели неизвестного распределения. Указанный критерий позволяет осуществить проверку гипотезы в условиях, когда модельная функция известна полностью и не зависит от неизвестных параметров [10, с. 370].

Оценка выбранной экспоненциальной модели производится по критерию Колмогорова – Смирнова для экспоненциального распределения [10, с. 370]:

$$\begin{aligned} D_n^+ &= \max \left[\frac{1}{n} - F(z_i) \right]; \\ D_n^- &= \max \left[F(z_i) - \frac{i-1}{n} \right]; \\ D_n &= \max [D_n^+, D_n^-]. \end{aligned} \quad (4)$$

Также в случае указанных моделей используется критерий Камера – Мизеса – Смирнова для случайно цензурированных выборок. Статистикой критерия выступает среднеквадратичная мера расстояния между эмпирической и гипотетической функциями распределения [10, с. 370].

Критерий Смирнова – Крамера-фон Мизеса [10, с. 370]:

$$w^2 = \sum_{i=1}^n \left(F \left(z_i - \frac{2i-1}{2n} \right) \right)^2 + \frac{1}{12n} \quad (5)$$

Гипотеза о экспоненциальности распределения может быть принята, если расчетные значения критерия в Колмогорова – Смирнова и Смирнова – Крамера-фон Мизеса

Таблица 7. Параметры модели для радиотехнической системы

Экспоненциальное	$T_0, ч$	$\lambda \cdot 10^4, 1/ч$
Нижняя граница	3656	0,57
Среднее	6045	1,65
Верхняя граница	17438	2,7

Таблица 8. Параметры модели

Распределение	Параметр 1	Параметр 2
экспоненциальное	$\lambda=17 \cdot 10^{-5}$	b=1
Вейбулла	$\alpha=2278$	b=0,65

Таблица 9. Оценка адекватности экспоненциальной модели

	$D_n^+, 10^{-4}$	$D_n^-, 10^{-4}$	Расчетное, 10^{-4}	Табличное, 10^{-4}
Статистика $\sqrt{n}D_n$ (при $\alpha=0,05$)	22	2432	2432,7	1002
Статистика w^2	–	–	1877	188,8

Таблица 10. Расчет характеристик

Гамма процентный ресурс	Вероятность безотказной работы
310,08	0,367

меньше табличных значений:

В результате оценки получены данные в Таблице 4.

Для полученных данных может быть применима гипотеза об экспоненциальной модели.

В указанной модели кроме времени наработки и интенсивности отказов также могут быть определены гамма процентный ресурс и вероятность безотказной работы, представленные в Таблице 5.

Построение модели радиотехнической системы

Алгоритм построения вероятностно-статистической модели аналогичен рассмотренному в пер-

вой части работы.

Назначение радиотехнического оборудования – «обеспечение телефонной, телеграфной и других видов связи между различными воздушными судами, между летательными аппаратами и землей, внутри самолетов» [9, с. 410]. Отказы радиотехнического оборудования могут привести к нарушению связи (прекращению передачи сигнала) между экипажами летательных аппаратов и наземными командно-диспетчерскими пунктами и экипажами других летательных аппаратов, что может привести к авиакатастрофе. Также при отказах радиотехнического оборудования возможно наруше-

ние определения высотно-скоростных параметров полета, углов атаки и скольжения, углов тангажа и крена, выдающие информацию об ориентации ЛА относительно вертикали.

Именно поэтому оценка статистики отказов имеет большое значение и используется для анализа в рассматриваемых моделях.

Анализируется гипотеза о возможности приближения и описания опытных данных статистическими распределениями: нормального, экспоненциальным, Вейбулла, гамма.

Из гистограммы можно сделать вывод о том, что наиболее точно опытные данные описывают экспоненциальное и Вейбулловское распределения. Для этих типов распределений оцениваются значения параметров (Таблица 6).

Для экспоненциального распределения производятся оценки параметров распределения λ и наработку на отказ, а также их граничные значения по методу максимального правдоподобия. Расчетные значения приведены в Таблице 7.

Сводная таблица для Вейбулловского и экспоненциального распределений по найденным параметрам приведена в Таблице 8.

Предполагаем распределение экспоненциальным.

В Таблице 9 приведены результаты проверки согласно критериям Колмогорова – Смирнова и Смирнова – Крамера-фон Мизеса.

Из оценки адекватности следует, что модель, построенная на основе экспоненциального распределения, является более предпочтительной для имеющейся статистики данных.

Для указанной модели кроме времени наработки и интенсивности отказов также могут быть определены гамма процентный ресурс и вероятность безотказной работы (Таблица 10).

Заключение

На основании проведенных исследований было установлено, что имеющиеся данные по статистике отказов противообледенительной и радиотехнической систем самолета Boeing 737-300/500 наилучшим образом могут быть описаны моделью, построенной на основе экс-

понижения вероятности отказа. С помощью построенной модели вышеуказанных систем:

1. произведена оценка параметров распределений и получены значения наработки на отказ с применением вероятностных распределений;
2. отказы противобледенительной и радиотехнической систем наиболее точно описываются экспоненциальным распределением;
3. среднее время наработки каждой системы составило порядка 3600 часов.

4. коэффициенты корреляции, полученные при построении модели, составили порядка 1,0 для обеих систем, что согласуется с экспериментальными данными.

Построенные модели несут практическую значимость:

- обеспечивают расчет отказов имеющегося оборудования;
- позволяют рассчитывать и оценивать наработку для каждой системы с возможностью индивидуального подхода эксплуатации каждого самолета и его систем для последующего

перехода к процессам эксплуатации по техническому состоянию;

- проводить ряд профилактических мероприятий по устранению отказов;
 - минимизировать преждевременное проведение восстановительных работ на системах с низким показателем отказов.
- Построение вероятностно-статистических моделей позволяет оптимизировать процессы эксплуатации, что минимизирует затраты на обслуживание.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Надежность в технике. Термины и определения: ГОСТ 27.002–2015. – Введ. 01.03.17. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2015. – 28 с.
2. Глобальный план обеспечения безопасности полетов ИКАО 2020-2020гг. – Введ. 14.06.2019 г.– Международная организация гражданской авиации, 2019. – 10 с.
3. Государственный стандарт Республики Беларусь надежность в технике Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002-89. – Введ. 15.11.89 № 3375. – Минск, Госстандарт, 2008 – 33 с.
4. Евдокименков, В.Н. Инженерные методы вероятностного анализа авиационных и космических систем / В.Н. Евдокименков, В.Г. Динеев, К.А. Карп – М.: Физматлит, 2009. – 320 с.
5. Кокс, Д. Прикладная статистика. Принципы и примеры / Д. Кокс, Э. Снелл, пер. с англ. Е. В. Печурина. – М.: Мир, 1984. – 200 с.
6. Филиппенко, О.С. Построение модели отказов противобледенительной системы самолета Boeing 737-300/500 / О.С. Филиппенко, Д.Е. Бельская // Авиация: история, современность, перспективы развития: сборник материалов V международной научно-практической конференции БГАА. – Минск, 2020. –(в печати).
7. Старухин, А.С. Вероятностно-статистическое моделирование и расчет отказов оборудования на самолете / А.С. Старухин, О.С. Филиппенко // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации: IX Международная научно-практическая конференция, ВАРБ, 23-24 мая. – Минск, 2019. – С. 207.
8. Филиппенко, О.С. Применение методов максимального правдоподобия и метода моментов для оценки параметров распределения отказов пилотажно-навигационного оборудования / О.С. Филиппенко, Д.В. Полищук // Социально-гуманитарные аспекты развития общества и авиационной отрасли: сборник материалов международной научно-практической конференции БГАА. – Минск, 2020. – с. 282.
9. Егер, С.М. Основы авиационной техники: учебник / под ред. И.А. Шаталова. – М.: Машиностроение, 2003. – 720 с.
10. Айвазян, С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

Статья поступила в редакцию
07.12.2020

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБОК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ФУНКЦИИ МОМЕНТОВ ДЛЯ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ С МНОЖЕСТВЕННЫМ ДОСТУПОМ И КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ СИГНАЛОВ

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

Аннотация: При анализе вероятности ошибок в системах с множественным доступом и кодовым разделением каналов широко используется аппроксимация гауссовского распределения плотности вероятностей для разрешения проблемы, возникающей в случае излучения сигналов другими источниками, например, генераторами сигналов других радиотехнических систем, спектр которых перекрывается со спектром передаваемого сигнала, что всегда приводит к снижению точности определения вероятности ошибок. В настоящей работе предлагается совершенно новый подход к исследованию вероятности ошибок в синхронизированных системах с множественным доступом и кодовым разделением каналов, применяемых для обмена информацией с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и базовой станцией на земле, которые используют множество поднесущих частот, при наличии замираний в канале связи, подчиняющихся Накагами-т закону распределения плотности вероятностей. Представлен высокоточный и унифицированный анализ вероятности ошибок для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при определенном наборе поднесущих частот. Основная идея исследований в настоящей работе заключается в том, что вероятность ошибки на бит может быть численно определена с высокой точностью при использовании производящей функции моментов случайного процесса на выходе приемного устройства без каких-либо априорных знаний о распределении плотности вероятностей посторонних мешающих сигналов, излучаемых другими источниками, спектр которых может перекрываться со спектром передаваемого сигнала, при использовании квадратурной формулы Гаусса-Чебышева для выполнения инверсного преобразования Лапласа. Прежде всего, предполагается, что сигналы на всех поднесущих частотах системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов подвергаются воздействию независимых замираний в канале связи. Применяются два метода разнесенного многоканального приема сигналов: линейное суммирование сигналов равной мощности и суммирование дифференциально взвешенных сигналов каждого разнесенного канала. Анализируется вероятность ошибки на бит как для восходящего канала связи (передача информационного сигнала от базовой станции к БПЛА), так и для синхронизированного нисходящего канала связи (инфор-

мационный сигнал передается от БПЛА к базовой станции). Представлены многочисленные результаты численного моделирования для демонстрации корректности основных результатов теоретического анализа, проведенного в настоящей работе. Точность и корректность теоретических результатов, полученных при использовании квадратурной формулы Гаусса-Чебышева на основе производящей функции моментов, подтверждается различными подходами при численном моделировании, например, численным интегрированием и моделированием, используя статистику Монте-Карло, и точным вычислением вычетов.

Ключевые слова: вероятность ошибки на бит, антенная решетка, нисходящий канал, восходящий канал, многолучевое распространение сигналов, разнесенный многоканальный прием сигналов, отношение сигнал/помеха, Накагами- m замирания.

Abstract: In the bit-error rate (BER) analysis of code-division multiple-access (CDMA) systems, a Gaussian approximation is widely used to tackle the multiple access interference (MAI), although it does not always offer satisfactory accuracy. This paper investigates the BER performance of synchronous multicarrier (MC) CDMA systems over Nakagami- m fading channels in a different way. We present an accurate and unified BER analysis for synchronous MC-CDMA systems. To facilitate our analysis, we assume a synchronous uplink, whose BER performance can be intuitively viewed as a lower BER bound of the more realistic asynchronous MC-CDMA systems. The basic idea is that, by using the Gauss-Chebyshev quadrature (GCQ) rule to perform inverse Laplace transform, an accurate BER can be numerically obtained from the moment generating function (MGF) of the output decision variable at a receiver, without any assumption about the MAI distribution. First, signals on all subcarriers of MC-CDMA systems are assumed to experience independent fading. Two standard diversity combining techniques, equal gain combining (EGC) and maximal ratio combining (MRC), are employed. The BER performance in both downlink and synchronous uplink is analyzed. We then consider a more general system model, in which signals on different subcarriers undergo correlated fading. The asymptotic (error floor) performance of downlink MC-CDMA with MRC is studied. In particular, we investigate the effects of spreading sequences and the delay spread of the channel on the system performance. Numerical examples are provided to show the main results of this paper. The accuracy of the GCQ and MGF based solution is verified by different approaches such as Monte Carlo integration and the exact residue method. In addition, the accuracy of the commonly used Gaussian approximation is also examined.

Keywords: Bit-error rate, antenna array, downlink, uplink, signal multipath propagation, signal diversity, signal-to-noise ratio, Nakagami- m fading.

Комбинация методов модуляции [1], использующая набор поднесущих частот, и системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов, т.е., система с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот [2], использует все преимущества обеих технологий. Во-первых, параллельная передача информационных сигналов на разных поднесущих частотах при модуляции делает систему с множественным доступом и кодовым разделением каналов перспективной для широкополосных каналов связи [3]. Во-вторых, при предварительной обработке сигналов система с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот обладает большим потенциалом для обеспечения более высокой пропускной способности по сравнению с другими технологиями многостанционного доступа. Некоторые другие важные преимущества использования системы

с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот заключаются в следующем:

- высокий коэффициент передачи информационных сигналов в пределах полосы пропускания частот канала связи [4] вследствие использования мультиплексированных сигналов с ортогональным частотным разделением [5];
- операции модуляции и демодуляции могут использоваться эффективно с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье и инверсного быстрого преобразования Фурье [6];
- непосредственное разнесение по частоте в системах с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот позволяет аккумулировать всю энергию принятого сигнала, рассеянную в пределах частотного диапазона по каналам с частотным разделением [7] и [8], в то время

как многоканальное приемное устройство, используемое при приеме копий сигнала, переданного посредством многолучевого (многоканального) разнесения, т.е. приемное устройство для разнесенных сигналов или, другими словами, RAKE приемник, в системах с многостанционным доступом и кодовым разделением каналов и прямым расширением спектра, использует только часть энергии сигнала, разнесенного по частотным каналам связи.

Было показано, что система с множественным доступом и кодовым разделением каналов, использующая набор поднесущих частот, может превосходить по своим характеристикам систему с множественным доступом и кодовым разделением каналов, и прямым расширением спектра как при передаче информационных сигналов по нисходящему каналу [7] и [8], так и по восходящему каналу связи [9].

Вероятность ошибки на бит яв-

ляется одной из важнейших характеристик любой системы связи, и анализ вероятности ошибки на бит осуществляется интенсивно в последние десятилетия. Для того чтобы проанализировать вероятность ошибки на бит системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии набора поднесущих частот, включая систему с множественным доступом и кодовым разделением каналов, рассматриваемую в [2], систему с множественным доступом и кодовым разделением каналов и прямым расширением спектра при наличии набора поднесущих частот [10], [11], и многочастотную (многотональную) систему с множественным доступом и кодовым разделением каналов [12], сигналы, генерируемые другими источниками, спектры которых перекрываются со спектром ожидаемого сигнала, предполагаются, как правило, для простоты анализа, распределенными в соответствии с гауссовским законом распределения. Однако точность определения вероятности ошибки на бит при таком подходе зависит от конфигурации системы, особенно от количества БПЛА и мощности сигналов, поступающих к БПЛА. Хорошо известно, что гауссовская аппроксимация позволяет определять вероятность ошибки на бит с высокой погрешностью, если количество БПЛА не велико или существует значительный разброс энергетических характеристик сигналов на входах приемных устройств БПЛА. Следовательно, анализ вероятности ошибки на бит без использования гауссовской аппроксимации предпочтителен.

Для того чтобы устранить гауссовскую аппроксимацию для мешающих сигналов, излучаемых другими источниками, спектр которых перекрывается со спектром передаваемого сигнала, вероятность ошибки на бит может быть рассчитана в областях преобразования. Широко используемыми преобразованиями, как при проведении теоретического анализа, так и на практике, являются преобразование Фурье с характеристической функцией и преобразование Лапласа с производящей функцией моментов, соответственно. Основная идея настоящей работы заключается в том, что сначала необходимо получить характеристическую

функцию или производящую функцию моментов параметра принятия решения (искомой переменной), а затем выполнить соответствующее инверсное преобразование для расчета вероятности ошибки на бит. Поскольку искомая переменная может быть полностью и точно охарактеризована характеристической функцией или производящей функцией моментов, вероятность ошибки на бит может быть оценена посредством методов численного интегрирования с высокой степенью точности. По этой причине, методы, основанные на определении характеристической функции и производящей функции моментов, заслуживают пристального внимания. Метод определения характеристической функции используется для исследования вероятности ошибки на бит системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов, и прямым расширением спектра в том случае, когда случайные последовательности информационных сигналов подвергаются воздействию рэлеевских [13] и Накагами- m [14] замираний в каналах связи. В [14] метод определения производящей функции моментов на основе интегрирования седловой точки был предложен с целью расчета вероятности ошибок на бит с учетом межсимбольных и внутрисимбольных помех. Этот метод применяется для исследования характеристик систем с множественным доступом и кодовым разделением каналов в условиях наличия райсовских [15] и Накагами- m замираний [16] в каналах связи, а также для анализа вероятности ошибок на бит в системе с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот [17]. В [18] и [19] предлагается метод определения производящей функции моментов, основанный на квадратурной формуле Гаусса-Чебышева, для расчета вероятности ошибок на бит при наличии замираний в канале связи. Этот метод используется в различных областях применения обработки сигналов на фоне помех [20] – [22].

Цель настоящей работы – представить высокоточный и унифицированный анализ синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии

множества поднесущих частот в условиях Накагами- m замираний в канале связи, используя квадратурную формулу Гаусса-Чебышева, на основании которой определяется производящая функция моментов. Вместо гауссовской аппроксимации распределения плотности вероятностей мешающих сигналов, генерируемых другими источниками, спектр которых перекрывается со спектром передаваемого сигнала, определяется статистика параметра принятия решения, используя производящую функцию моментов. Затем рассчитывается вероятность ошибки на бит с помощью квадратурной формулы Гаусса-Чебышева с удовлетворительной точностью. В настоящей работе рассматриваются как восходящий канал, так и нисходящий канал системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. Предполагается, что рассмотрение синхронизированного восходящего канала рассматриваемой системы позволяет упростить анализ, причем, вероятность ошибки на бит может рассматриваться как самая минимальная граница (минимальный уровень ошибок), широко используемая в реальных условиях асинхронной системой с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. Отметим, что синхронизированный восходящий канал системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот является идеализированной моделью, которая полезна в том смысле, что позволяет определить вероятность ошибки на бит с требуемой точностью и математическим обоснованием, а также улучшить точность определения характеристики реальной асинхронной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. В некоторых специфических случаях рассматривается синхронизированный или квази-синхронизированный восходящий канал системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. Еще одним из важных результатов настоящей

работы является тот факт, что исследуется общая модель канала связи при наличии Накагами- m замираний ($m \geq 0.5$), причем, рассматриваются как независимые, так и коррелированные замирания в канале связи при разных значениях поднесущей частоты.

Настоящая работа имеет следующую структуру. Раздел 1 описывает модель системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, включая передающее устройство, канал связи, и приемное устройство. В разделе 2 подробно описывается метод определения производящей функции моментов, основанный на квадратурной формуле Гаусса-Чебышева. В разделе 3 представлен анализ вероятности ошибок на бит для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот на основе предположения наличия независимых замираний в канале связи для различных значений поднесущих частот. Рассматриваются как восходящий, так и нисходящий каналы связи системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, когда приемное устройство в целях многоканальной обработки сигналов использует метод линейного суммирования сигналов равной мощности или метод суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого разнесенного канала. В разделе 4, при условии коррелированных замираний в канале связи, исследуется асимптотическая характеристика, также известная, как минимальный уровень ошибок, нисходящего канала системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, когда приемное устройство в целях многоканальной обработки сигналов использует метод линейного суммирования сигналов равной мощности или метод суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого разнесенного канала. В разделе 5 представлены результаты численного моделирования и их обсуждение. Выводы представлены в разделе 6. В Прило-

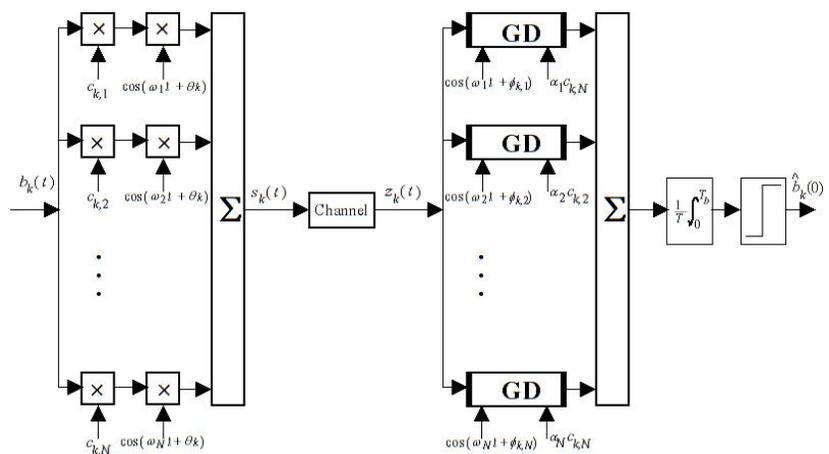


Рис. 1. Система с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот: передающее и приемное устройства для k -го БПЛА.

жении 1 представлено математическое определение характеристической функции для случайной величины $z \cos\theta$. Приложение 2 демонстрирует определения производящей функции моментов параметра принятия решений. В Приложении 3 представлена методика вычисления вычетов.

1. Модель системы

Передающее устройство. Рассмотрим систему с множественным доступом и кодовым разделением каналов [2] при наличии K мобильных станций (БПЛА) и N поднесущих частот. Предполагается, что восходящий канал системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот синхронизирован. Рассматривается только восходящий канал системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, хотя все результаты могут быть однозначно адаптированы и для нисходящего канала системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. На рис. 1 представлены структурные схемы передающего устройства, канала связи и приемного устройства k -го БПЛА системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. Необходимо отметить, что рис. 1 представлен здесь только для иллюстрации и понимания функционирования системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. В реальных условиях технологии модуляции и демодуляции могут применяться при использовании алгоритмов быстрого преобразования Фурье и инверсного быстрого преобразования Фурье. Если необходимо обеспечить высокую пропускную способность, можно перед выполнением операции модуляции на поднесущих частотах использовать преобразователь последовательного кода в параллельный [9].

Предполагаем, что используется двоичная фазовая модуляция и двоичная расширяющая последовательность $\{c_{k,n}\}_{n=1}^N$ для k -го БПЛА системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. Сигнал, передаваемый k -му БПЛА, можно представить в следующем виде:

$$s_k(t) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{2P}{N}} b_k(q) p_{T_b}(t - qT_b) \sum_{n=1}^N c_{k,n} \cos(\omega_n t + \theta_k), \quad (1)$$

где

$$\omega_n = \omega_c + \frac{2\pi(n-1)F}{T_b}; \quad (2)$$

P – мощность информационного бита для всех БПЛА системы с мно-

жественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот; $b_k(q)$ — q -й информационный бит для k -го БПЛА системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот; $p_{T_b}(t)$ — прямоугольный импульс, определенный на интервале $[0, T_b]$; T_b — длительность бита; ω_n — n -я поднесущая частота; θ_k — случайная фаза поднесущей частоты для k -го БПЛА системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов; ω_c — радиочастота; F — целое число, определяющее разброс поднесущих частот.

Модель канала связи. Предполагаем наличие медленно флюктуирующих замираний в канале связи, т.е. параметры замираний не изменяются в пределах длительности одного бита. Поскольку распределение Накагами [23] является универсальным даже относительно простой статистической модели и очень хорошо сочетается с характеристиками радиоканала [24], рассмотрим случайную величину, распределенную в соответствии с законом Накагами- m распределения плотности вероятностей для описания амплитуды коэффициента усиления канала связи. Определяя должным образом количество поднесущих частот, полагаем, что сигналы, передаваемые на каждой поднесущей частоте, подвергаются воздействию гладких или медленных замираний в канале связи. Коэффициент усиления канала связи для каждой n -ой поднесущей частоте k -го БПЛА системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, можно моделировать функцией $\beta_{k,n} \times \exp\{j\varphi_{k,n}\}$, где $\beta_{k,n}$ — случайная величина, характеризующая замирания и распределенная в соответствии с Накагами- m законом распределения плотности вероятностей с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $E[\beta_{k,n}^2] = 1$, где $E[\cdot]$ — математическое ожидание. Фаза $\varphi_{k,n}$ равномерно распределена на интервале $[-\pi, \pi]$. В связи с этим, случайная величина $\beta_{k,n}$ подчиняется следующему закону распределения плотности вероятностей $\beta\varphi \times \pi$

$$f_{\beta_{k,n}}(\beta_{k,n}) = \frac{2}{\Gamma(m)} m^m \beta_{k,n}^{2m-1} \exp\{-m\beta_{k,n}^2\}, \quad \beta_{k,n} \geq 0 \quad (3)$$

где $m \geq 0.5$ — параметр, характеризующий интенсивность замираний в канале связи; $\Gamma(m)$ — Гамма-функция [25]. Обозначая $\gamma_{k,n} = \beta_{k,n}^2$ получаем плотность распределения вероятностей случайной величины $\gamma_{k,n}$:

$$f_{\gamma_{k,n}}(\gamma_{k,n}) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} \gamma_{k,n}^{m-1} \exp\{-m\gamma_{k,n}\}, \quad \gamma_{k,n} \geq 0. \quad (4)$$

Для системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот важным аспектом является определение корреляции между поднесущими частотами, т.к. система с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот может подвергаться воздействию коррелированных замираний при различных значениях поднесущей частоты, если разброс между поднесущими частотами меньше полосы частот, одновременно замирающих в канале связи. В настоящей работе рассматриваются модели канала связи, как с независимыми замираниями, так и с коррелированными замираниями. В разделе 4 рассматриваются независимые замирания для различных поднесущих частот, что справедливо, если разнесение поднесущих частот системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов больше, чем полоса одновременно замирающих частот в канале связи, т.е. $F > 1$ [2], в то время, как в разделе 5 предполагается коррелированность замираний для различных поднесущих частот, что соответствует стандартной системе с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот [7] — [9], для которой разброс между поднесущими частотами минимизируется, т.е. $F = 1$, для достижения высокой эффективности пропускной способности. Однако для стандартной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот модель канала связи с коррелированными замираниями более приемлема. Модель канала связи с независимыми замираниями также имеет смысл, т.к. она позволяет определить вероятность ошибки на бит, которую можно рассматривать как опорную точ-

ку для системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот в реальных условиях, т.е. при коррелированных замираниях в канале связи. Например, в [26] и [27] показано, что наличие корреляции между поднесущими частотами увеличивает вероятность ошибки на бит при передаче информационных сигналов по восходящему каналу системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. Следовательно, модель канала связи с независимыми замираниями приводит к такой вероятности ошибок на бит, которая может рассматриваться, как нижняя граница вероятности ошибок на бит для коррелированных замираний в каналах связи системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот.

Обобщенный обнаружитель.

Приемное устройство как базовой станции, так и БПЛА конструируется на основе обобщенной методологии обработки сигналов на фоне помех [28] — [30]. Назовем такое приемное устройство как обобщенный обнаружитель. Обобщенный обнаружитель рассматривается как линейная комбинация корреляционного обнаружителя, который является оптимальным в смысле критерия Неймана-Пирсона при обнаружении сигналов с априори известными параметрами, и энергетического обнаружителя, являющегося оптимальным в смысле критерия Неймана-Пирсона при обнаружении сигналов с априори неизвестными или случайными параметрами. Эта особенность обобщенного обнаружителя, позволяет нам получать лучшие характеристики обнаружения сигналов по сравнению с другими классическими и современными приемными устройствами или обнаружителями, применяемыми на практике в настоящее время.

Специфической особенностью обобщенной методологии обработки сигналов на фоне помех является формирование дополнительного источника помехи, который не содержит какой-либо информации о передаваемом сигнале, с целью улучшения качества обна-

ружения сигналов. Этот дополнительный источник помехи может рассматриваться как контрольный уровень мощности помехи без какой-либо информации о сигнале, который необходимо обнаружить [28]. Совместно достаточная статистика математического ожидания и дисперсии логарифмического отношения правдоподобия образуются в случае применения обобщенной методологии обработки сигналов на фоне помех, в то время как классическая и современные теории обработки сигналов базируются на определении только достаточной статистики математического ожидания (корреляционный приемник) или только достаточной статистики дисперсии логарифмического отношения правдоподобия (энергетический приемник). Совместно достаточная статистика математического ожидания и дисперсии логарифмического отношения правдоподобия не формируются при использовании этих теорий. Таким образом, обобщенная методология обработки сигналов на фоне помех позволяет нам обладать большей информацией о принимаемом информационном сигнале. Благодаря этому факту, использование приемных устройств и обнаружителей, разработанных на основе обобщенной методологии обработки сигналов на фоне помех, позволяет нам улучшать характеристики системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот.

Структура обобщенного обнаружителя представлена на рис. 2. Как представлено на рис. 2, обобщенный обнаружитель состоит из 3-х каналов:

- *корреляционный канал обобщенного обнаружителя – предварительный фильтр PF; умножители 1 и 2; генератор модели сигнала MSG;*
- *энергетический приемник или автокорреляционный канал обобщенного обнаружителя – предварительный фильтр PF; дополнительный фильтр AF; умножители 3 и 4; сумматор 1;*
- *компенсационный канал обобщенного обнаружителя – сумматоры 2 и 3; накопитель $\Sigma 1$.*

Пороговое устройство THRA определяет порог обнаружения

сигналов обобщенным обнаружителем. Предварительный PF и дополнительный AF фильтры обобщенного обнаружителя рассматриваются как линейные системы, например, как полосовые фильтры, с импульсными характеристиками $h_{PF}[m]$ и $h_{AF}[m]$, соответственно. Для простоты анализа предположим, что эти фильтры обладают одинаковыми амплитудночастотными характеристиками или импульсными откликами одинаковой формы. Кроме того, дополнительный фильтр AF расстроен по центральной частоте относительно предварительного фильтра PF на такую величину, что информационный сигнал не может проходить через дополнительный фильтр AF из-за несовпадения полосы пропускания фильтра и ширины спектра частот передаваемого сигнала. Таким образом, информационный сигнал и помеха могут появляться только на выходе предварительного фильтра PF, и только помеха может наблюдаться на выходе дополнительного фильтра AF. Если величина рассогласования по центральной частоте между предварительным фильтром PF и дополнительным фильтром AF более чем $4\Delta f_s$ или $5\Delta f_s$, где Δf_s – ширина полосы частот передаваемого сигнала, процессы, формирующиеся на выходах дополнительного фильтра AF и предварительного фильтра PF обобщенного обнаружителя, могут рассматриваться как некоррелированные или независимые процессы. На практике, при выполнении этого условия, коэффициент корреляции между процессами, наблюдаемыми на выходах дополнительного AF и предварительного PF фильтров обобщенного обнаружителя, не превосходит по величине 0.05, что было подтверждено экспериментально в [31] и [32].

Случайные процессы на выходах предварительного PF и дополнительного AF фильтров обобщенного обнаружителя можно интерпретировать как случайные процессы, генерируемые двумя независимыми частотно-временными областями (источниками). Если дискретная по времени помеха $w_i[k]$ представляет собой гауссовский процесс на входах предварительного PF и дополнительного AF фильтров обобщенного обнаружителя, тогда дискретный по времени случайный процесс $\zeta_i[k]$, формирующийся на выходе предварительного фильтра PF, является также гауссовским процессом. Дискретный по времени случайный процесс $\eta_i[k]$, формирующийся на выходе дополнительного фильтра AF обобщенного обнаружителя, будет гауссовским процессом вследствие того, что предварительный PF и дополнительный AF фильтры обобщенного обнаружителя представляют собой линейные системы, которые не изменяют статистические параметры входного процесса. Процессы на выходах предварительного PF и дополнительного AF фильтров обобщенного обнаружителя представляют собой выборочные значения случайных процессов из двух независимых частотно-временных пространств. Таким образом, дополнительный фильтр AF обобщенного обнаружителя может рассматриваться как генератор эталонной помехи при наличии априорной информации об отсутствии информационного сигнала, т.е. как выборка эталонной помехи. Детальное обсуждение предварительного PF и дополнительного AF фильтров обобщенного обнаружителя представлено в [28] и [31, Глава 5]. Помеха на выходах предварительного PF и дополнительного AF фильтров обобщенного обнаружителя может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} w_{PF}[k] = \sum_{i=1}^M \zeta_i[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h_{PF}[m] w_i[k-m], \\ w_{AF}[k] = \sum_{i=1}^M \eta_i[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h_{AF}[m] w_i[k-m]. \end{cases} \quad (5)$$

При практическом использовании любого обнаружителя для определения спектральной чувствительности должна быть определена ширина спектра. Таким образом, ширина полосы пропускания спектра частот дополнительного фильтра AF обобщенного обнаружителя и центральная частота должны быть также определены. В настоящей работе мы рассматриваем проблему спектральной чувствительности одного радиоканала, в котором ширина полосы спектра частот дополнительного фильтра AF обобщенного обнаружителя всегда пустая и не может использоваться для

передачи ожидаемого сигнала по причине нахождения за пределами границ используемого спектра частот, т.е. ширины полосы частот передаваемого сигнала. Необходимо отметить, что в общем случае часть полосы пропускания дополнительного фильтра AF обобщенного обнаружителя может быть занята сигналами от других источников излучения, спектры которых перекрывают спектр передаваемого сигнала. В этом случае, такие сигналы от других источников излучения могут рассматриваться как помехи. Случай нахождения спектра частот помехи в пределах полосы пропускания дополнительного фильтра AF обобщенного обнаружителя, воздействие этого явления на характеристики обнаружения обобщенного обнаружителя, а также неидеальные условия функционирования обобщенного обнаружителя, когда помехи на выходах предварительного PF и дополнительного AF фильтров обобщенного обнаружителя не являются идентичными по статистическим параметрам, рассматривается в [33 – 38].

Как следует из рис. 2, при рассмотрении гипотезы H_1 (передаваемый сигнал $s_i[k]$ присутствует в принимаемом случайном процессе $z_i[k]$) корреляционный канал обобщенного обнаружителя генерирует сигнальную компоненту $s_i^{mod}[k]s_i[k]$, обусловленную взаимодействием между моделью сигнала $s_i^{mod}[k]$, формируемой на выходе генератора модели сигнала MSG, и сигналом $s_i[k]$ присутствующим в случайном процессе на входе обобщенного обнаружителя, и помеховой составляющей $s_i^{mod}[k]\zeta_i[k]$, обусловленной взаимодействием между моделью сигнала $s_i^{mod}[k]$ и помехой $\zeta_i[k]$, формируемой на выходе предварительного PF фильтра обобщенного обнаружителя. Энергетический приемник обобщенного обнаружителя, т.е. автокорреляционный канал, генерирует энергию информационного сигнала $s_i^2[k]$ и случайную помеховую компоненту $s_i[k]\zeta_i[k]$, обусловленную взаимодействием между информационным сигналом $s_i[k]$ и помехой $\zeta_i[k]$ на выходе предварительного PF фильтра обобщенного обнаружителя. Основное назначение компенсационного канала обобщенного обнаружителя заключается в пол-

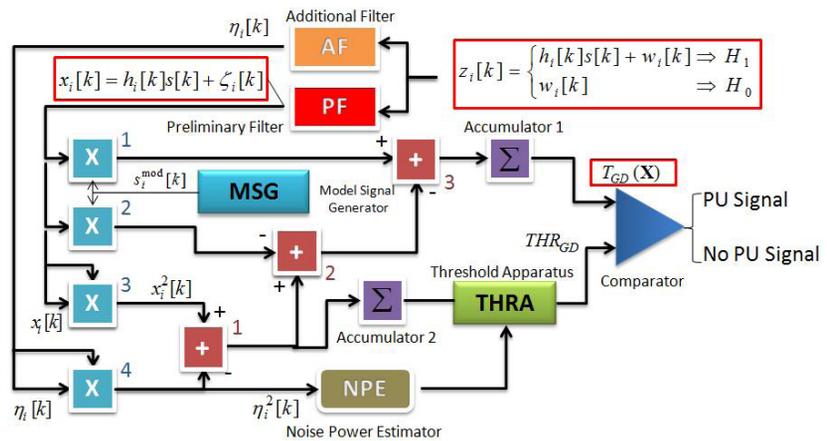


Рис. 2. Структурная схема обобщенного обнаружителя (GD):

- AF (Additional Filter) – дополнительный фильтр;
- PF (Preliminary Filter) – предварительный фильтр;
- MSG (Model Signal Generator) – генератор модели сигнала;
- NPE (Noise Power Estimator) – определение оценки мощности сигнала;
- THRA (Threshold Apparatus) – пороговое устройство;
- Accumulator 1 – сумматор или накопитель 1;
- Accumulator 2 – сумматор или накопитель 2;
- PU signal – наличие передаваемого сигнала;
- No PU signal – отсутствие передаваемого сигнала.

ной компенсации в статистическом смысле помеховой составляющей $s_i^{mod}[k]\zeta_i[k]$ корреляционного канала обобщенного обнаружителя и случайной составляющей $s_i[k]\zeta_i[k]$ энергетического обнаружителя (автокорреляционного канала) обобщенного обнаружителя между собой на основе одной и той же помехи $\zeta_i[k]$. Соотношение между обнаруживаемым сигналом $s_i[k]$ и моделью сигнала $s_i^{mod}[k]$ имеет вид

$$s_i^{mod}[k] = \mu s_i[k], \quad (6)$$

где μ – коэффициент пропорциональности.

Основным условием функционирования обобщенного обнаружителя в любой системе беспроводной связи, включая систему с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, является равенство между параметрами модели сигнала $s_i^{mod}[k]$, генерируемой в месте приема, и передаваемым сигналом $s_i[k]$, например, по амплитуде. При этом условии, в статистическом смысле возможна полная компенсация между помеховой составляющей $s_i^{mod}[k]\zeta_i[k]$ корреляционного канала обобщенного обнаружителя и случайной составляющей $s_i[k]\zeta_i[k]$ энергетического обнаружителя (автокорреляционного канала) обобщенного обнаружителя.

Удовлетворяя основное условие функционирования обобщенного обнаружителя (6) при $\mu \rightarrow 1$ требует значительного усложнения структуры обобщенного обнаружителя и, следовательно, приводит к увеличению вычислительных затрат. Например, на практике необходимо применять следующую систему по амплитуде или использовать автономную обработку выборки данных. При рассмотрении гипотезы H_0 (передаваемый сигнал $s_i[k]$ отсутствует во входном случайном процессе), и удовлетворяя основное условие функционирования $\mu \rightarrow 1$ (6), сигнал на выходе обобщенного обнаружителя представляет собой фоновую помеху $\eta_i^2[k] - \zeta_i^2[k]$, т.к. генератор модели сигнала MSG выключен в этот момент. Пороговое устройство, отмеченное на рис. 2 как THRA, позволяет нам определить порог обнаружения при использовании обобщенного обнаружителя.

При практическом использовании обобщенного обнаружителя в системах обработки сигналов реальная структура обобщенного обнаружителя зависит от специфики области применения, например радиолокационные сенсорные системы, адаптивные системы беспроводной связи, когнитивные радиосети, спутниковые системы связи, мобильные системы связи и т.д. В настоящей работе струк-

турная схема обобщенного обнаружителя демонстрируется только с целью пояснения основных принципов функционирования. Поэтому, структурная блок-схема обобщенного обнаружителя, представленная на рис. 2, должна рассматриваться только с этой точки зрения. В настоящей работе, рассматривается возможность применения обобщенного обнаружителя в системах с множественным доступом и кодовым разделением каналов связи при наличии множества поднесущих частот. Поскольку решающая статистика на выходе обобщенного обнаружителя определяется энергией передаваемого сигнала и мощностью помехи, требуемое равенство между параметрами модели сигнала $s_i^{mod}[k]$, генерируемой в месте приема, и обнаруживаемым сигналом $s_i[k]$, в частности, по амплитуде, приводит к усложнению структуры приемного устройства на основе обобщенного обнаружителя. Подробное обсуждение основных условий функционирования обобщенного обнаружителя, если отсутствует априорная информация о параметрах передаваемого сигнала и существует неопределенность относительно параметров передаваемого сигнала, т.е. параметры передаваемого сигнала являются случайными, представлено в [28] и [30].

Реализовать на практике согласование модели сигнала $s_i^{mod}[k]$ и передаваемого сигнала $s_i[k]$, например, равенство по амплитуде, является очень сложной практической проблемой вследствие того, что передаваемый сигнал $s_i[k]$ зависит как от замираний в канале связи, так и от вида модуляции передаваемого сигнала, и невозможно оценить коэффициенты замираний в канале связи при малых значениях отношения сигнал/помеха. Согласование (равенство) модели сигнала $s_i^{mod}[k]$ и передаваемого сигнала $s_i[k]$ по амплитуде и другим параметрам возможно только в идеальном случае. Характеристики обнаружения обобщенного обнаружителя будут ухудшаться при рассогласовании параметров модели сигнала $s_i^{mod}[k]$ и передаваемого сигнала $s_i[k]$. Этот эффект обсуждается в [33] – [38], где присутствует полный анализ функционирования обобщенного

обнаружителя в реальных условиях, т.е. полный комплекс нарушений идеального функционирования обобщенного обнаружителя. Кроме того, при использовании обобщенного обнаружителя на практике, его решающая статистика требует оценки дисперсии помехи $\sigma_{\eta_i}^2$, используя эталонную помеху $\eta_i[k]$ на выходе дополнительного фильтра АФ обобщенного обнаружителя.

При рассмотрении гипотезы H_1 сигнал на выходе предварительного ПФ фильтра обобщенного обнаружителя (Рис. 2) может быть определен как $x_i[k]=s_i[k]+\zeta_i[k]$, где $s_i[k]=h_i[k]s[k]$. При рассмотрении гипотезы H_0 и $\forall i, k$ случайные величины $x_i[k]=\zeta_i[k]$ на выходе предварительного ПФ фильтра обобщенного обнаружителя подчиняются комплексному гауссовскому распределению плотности вероятностей и могут рассматриваться как независимые и идентично распределенные случайные величины. В идеальном случае, полагаем, что на выходе дополнительного фильтра АФ обобщенного обнаружителя присутствует эталонная помеха $\eta_i[k]$, статистические параметры которой совпадают с аналогичными параметрами помехи $\zeta_i[k]$, образующейся на выходе предварительного ПФ фильтра обобщенного обнаружителя. На практике всегда существует различие между статистическими параметрами процессов $\eta_i[k]$ и $\zeta_i[k]$. Как это различие в статистических параметрах помех $\eta_i[k]$ и $\zeta_i[k]$ влияет на характеристики обнаружения обобщенного обнаружителя, детально обсуждается в [30].

В настоящей работе мы расширяем решающую статистику, формируемую на выходе обобщенного обнаружителя [15] и [16] для случая, когда для передачи и приема сигналов применяется множество антенных решеток систем направленных антенн, что эффективно для подавления негативных явлений ослаблений и замираний сигнала в канале связи [33] – [44]. Решающая статистика на выходе обобщенного обнаружителя может быть представлена в виде:

$$T_{GD}(\mathbf{X}) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M 2x_i[k]s_i^{mod}[k] - \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M x_i^2[k] + \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M \eta_i^2[k] \underset{<H_0}{\overset{>H_1}{>}} THR_{GD} \quad (7)$$

где TNR_{GD} – порог обнаружения сигналов. Выражение (7) можно записать в матричной форме:

$$T_{GD}(\mathbf{X}) = 2\mathbf{S}^{mod}\mathbf{X} - \mathbf{X}^2 + \boldsymbol{\eta}^2 \underset{<H_0}{\overset{>H_1}{>}} THR_{GD} \quad (8)$$

где

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}(0), \dots, \mathbf{x}(N-1)] \quad (9)$$

– матрица случайного процесса на выходе предварительного ПФ фильтра обобщенного обнаружителя размером $M \times 1$, элементы которой представлены следующим образом:

$$\mathbf{x}[k] = [x_1[k], \dots, x_M[k]]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{S}^{mod} = [\mathbf{s}^{mod}(0), \dots, \mathbf{s}^{mod}(N-1)] \quad (11)$$

– матрица размером $M \times 1$ процесса, образующегося на выходе генератора модели сигнала MSG , элементы которой могут быть представлены в следующем виде:

$$\mathbf{s}^{mod}[k] = [s_1^{mod}[k], \dots, s_M^{mod}[k]]^T \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}(0), \dots, \boldsymbol{\eta}(N-1)] \quad (13)$$

– матрица размером $M \times 1$ случайного процесса, образующегося на выходе дополнительного фильтра АФ обобщенного обнаружителя, элементы которой могут быть представлены в виде:

$$\boldsymbol{\eta}[k] = [\eta_1[k], \dots, \eta_M[k]]^T \quad (14)$$

В соответствии с обобщенной методологией обработки сигналов на фоне помех и структурой обобщенного обнаружителя, представленной на рис. 2, решающая статистика на выходе обобщенного обнаружителя принимает следующий вид при рассмотрении гипотез H_1 и H_0 , соответственно

$$T_{GD}(\mathbf{X}) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M s_i^2[k] + \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M \eta_i^2[k] - \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M \zeta_i^2[k] \Rightarrow H_1, \\ \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M \eta_i^2[k] - \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M \zeta_i^2[k] \Rightarrow H_0, \end{cases} \quad (15)$$

где член $\sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M s_i^2[k]$ — средняя энергия передаваемого сигнала, а член $\sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M \eta_i^2[k] - \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M \zeta_i^2[k]$ представляет собой фоновую помеху на выходе обобщенного обнаружителя, которая по физическому смыслу является разностью мощностей помех, образующихся на выходах дополнительного фильтра АФ и предварительного ПФ фильтра обобщенного обнаружителя, соответственно.

Математическое ожидание $m_{H_0}^{GD}$ и $Var_{H_0}^{GD}$ дисперсия решающей статистики на выходе обобщенного обнаружителя при рассмотрении гипотезы H_0 могут быть представлены в следующем виде [30]:

$$\begin{cases} m_{H_0}^{GD} = E[T_{GD}(\mathbf{X})|H_0] = 0, \\ Var_{H_0}^{GD} = Var[T_{GD}(\mathbf{X})|H_0] = 4NM\sigma_w^4. \end{cases} \quad (16)$$

Проведенный выше анализ корректен для случая, когда дисперсия или мощность помехи, формирующейся на выходах предварительного ПФ и дополнительного АФ фильтров обобщенного обнаружителя, одинаковая и совпадает с дисперсией или мощностью помехи на входе этих фильтров при условии, что импульсные характеристики предварительного ПФ и дополнительного АФ фильтров обобщенного обнаружителя не вносят каких-либо искажений, т.е. $\sigma_\xi^2 = \sigma_\eta^2 = \sigma_w^2$. При практическом использовании предварительный ПФ и дополнительный АФ фильтры обобщенного обнаружителя представляют собой полосовые фильтры, параметры которых отличаются, т.е. $\sigma_\xi^2 \neq \sigma_\eta^2$. В этом случае, для простоты рассуждений, мы можем предположить, что $\sigma_\xi^2 = \sigma_w^2$ и $\sigma_\eta^2 = v\sigma_w^2 = v\sigma_\xi^2$, где v — коэффициент пропорциональности. При этих условиях, (16) принимает вид:

$$\begin{cases} m_{H_0}^{GD} = E[T_{GD}(\mathbf{X})|H_0] = 0, \\ Var_{H_0}^{GD} = Var[T_{GD}(\mathbf{X})|H_0] = 2NM\sigma_w^4(1+v^2). \end{cases} \quad (17)$$

Детальный анализ основных принципов функционирования обобщенного обнаружителя в случае отсутствия априорной информации о передаваемом сигнале и присутствия неопределенности относительно параметров этого сигнала, т.е. параметры являются случайными, представлен в [28] и [30].

Приемное устройство: Предполагается, что приемные устройства всех БПЛА системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот синхронизированы. Сигнал на входе приемного устройства базовой станции имеет следующий вид:

$$z(t) = \sqrt{\frac{2P}{N}} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^K b_k(q) p_{T_b}(t - qT_b) \sum_{n=1}^N \beta_{k,n} c_{k,n} \cos(\omega_n t + \phi_{k,n}) + w(t), \quad (18)$$

где $\phi_{k,n} = \theta_k + \varphi_{k,n}$ и $w(t)$ — аддитивный белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и двусторонней спектральной плотностью мощности $0.5 H_0$. Когерентный обобщенный обнаружитель, использующий при многоканальной обработке сигналов методы линейного суммирования сигналов равной мощности или суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала, рассматривается в системе с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. Предполагается, что известна полная

информация о параметрах канала связи. Без потери общности, рассмотрим параметр принятия решения для i -го БПЛА

$$\Delta = \sum_{n=1}^N \frac{\alpha_n c_{i,n}}{T_b} \int_0^{T_b} z(t) \cos(\omega_n t + \phi_{i,n}) dt, \quad (19)$$

где $\alpha_n = 1$ при линейном суммировании сигналов равной мощности и $\alpha_n = \beta_{i,n}$ при суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала. Составляющая параметра принятия решения на n -ой поднесущей частоте может быть представлена в виде:

$$\Delta_n = D_n + \sum_{k=1, k \neq i}^K MAI_{k,n} + w_n, \quad (20)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

где D_n — ожидаемый сигнал, $MAI_{k,n}$ — мешающий сигнал на n -ой поднесущей частоте, генерируемый другим источником, спектр которого перекрывается со спектром ожидаемого сигнала, w_n — аддитивный гауссовский шум. Тогда параметр принятия решений можно представить в виде:

$$\Delta = D + MAI + w, \quad (21)$$

где

$$\begin{cases} \Delta \equiv \sum_{n=1}^N \Delta_n, \quad D \equiv \sum_{n=1}^N D_n, \quad w = \sum_{n=1}^N w_n, \\ MAI \equiv \sum_{n=1}^N MAI_n, \\ MAI_n \equiv \sum_{k=1, k \neq i}^K MAI_{k,n}. \end{cases} \quad (22)$$

Полагая, что передается $b(0) = 1$ и опуская коэффициент $0.5\sqrt{2P/N}$, получаем

$$\begin{cases} D_n = \alpha_n \beta_{i,n}, \\ MAI_{k,n} = b_k(0) \alpha_n c_{i,n} c_{k,n} \beta_{k,n} \cos \tilde{\phi}_{k,n}, \end{cases} \quad (23)$$

где $\tilde{\phi}_{k,n} = \phi_{k,n} - \phi_{i,n}$ представляет собой разность фаз, равномерно распределенную в пределах интервала $[-\pi, \pi]$. Аддитивный гауссовский шум на n -ой поднесущей частоте обладает нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной

$$\sigma_{w_n}^2 = \frac{NN_0}{2E_b} \alpha_n^2, \quad (24)$$

$E_b = PT_b$ — энергия сигнала на бит и E_b/N_0 — отношение сигнал/помеха.

2. Базовые методы

В этом разделе детально рассматривается метод, основанный на определении квадратурной формулы Гаусса-Чебышева, используя производящую функцию моментов. Численное интегрирование методом Монте-Карло используется для подтверждения корректности применимости квадратурной формулы Гаусса-Чебышева и производящей функции моментов.

Метод, основанный на определении производящей функции моментов: Производящая функция моментов MGF и характеристическая функция Θ параметра принятия решений определяются следующим образом:

$$\begin{cases} MGF : \Phi_{\Delta}(s) \equiv E\{\exp[-s\Delta]\} , \\ \Theta : \Psi_{\Delta}(j\omega) \equiv E\{\exp[j\omega\Delta]\} . \end{cases} \quad (25)$$

Очевидно, что производящая функция моментов MGF и характеристическая функция Θ соответствуют двустороннему преобразованию Лапласа и инверсному преобразованию Фурье, соответственно. Как отмечено в [45], в области сходимости производящей функции моментов $\Phi_{\Delta}(s)$, где существует двустороннее преобразование Лапласа, можно получить производящую функцию моментов $\Phi_{\Delta}(s)$, используя характеристическую функцию $\Psi_{\Delta}(j\omega)$ путем замены переменных $j\omega = -s$. В связи с тем, что преобразование Фурье очень часто упрощает анализ, определим характеристическую функцию $\Psi_{\Delta}(j\omega)$, а затем получим производящую функцию моментов $\Phi_{\Delta}(s)$.

Теоретически вероятность ошибки на бит на входе приемного устройства i -го БПЛА может быть получена следующим образом [18] и [19]:

$$BER_i = \Pr(\Delta < 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} \frac{\Phi_{\Delta}(s)}{s} ds \quad (26)$$

где параметр $c > 0$ выбирается для обеспечения сходимости интеграла в (26). Остается проблема, а именно: как получить численное значение комплексного контурного интеграла.

Точное решение: Точное решение возможно только в том случае, когда можно определить остаточ-

ные значения производящей функции моментов $\Phi_{\Delta}(s)/s$. Согласно [18], вероятность ошибки на бит можно записать следующим образом:

$$BER_i = - \sum_{\text{Re}\{poles\} > 0} \text{остаток} \left[\frac{\Phi_{\Delta}(s)}{s} \right] , \quad (27)$$

где остаточные значения определяются и суммируются по всем полюсам, у которых действительная часть положительная. В особых случаях, когда производящая функция моментов $\Phi_{\Delta}(s)$ является достаточно простой функцией, точное значение вероятности ошибок на бит BER может быть получено на основе (12). В общем случае, определение вероятности ошибки на бит BER представляет собой довольно-таки сложную процедуру [18], [19].

Решение на основе численного интегрирования, используя квадратурную формулу Гаусса-Чебышева. Методы численного интегрирования могут быть использованы для решения проблемы, связанной с инверсным преобразованием Лапласа. Существуют, по крайней мере, два опубликованных метода численного интегрирования. Один из методов основан на интегрировании с использованием седловой точки совместно с формулой трапеций [14]–[17]. Другой метод основан на использовании квадратурной формулы Гаусса-Чебышева [18]–[22]. В настоящей работе используется второй метод, который требует оценивания производящей функции моментов $\Phi_{\Delta}(s)$ при ограниченном ряде комплексных точек:

$$\begin{cases} s_l = c + jc\tau_l , \\ \tau_l = \tan \left\{ \frac{(2l-1)\pi}{2L} \right\} , \quad l = 1, 2, \dots, 0.5L \end{cases} \quad (28)$$

где L — число точек, в которых кривая функции пересекает саму себя, используемых для определения квадратурной формулы Гаусса-Чебышева. Вероятность ошибки на бит при приеме информационных сигналов приемным устройством i -го БПЛА может быть определена следующим образом:

$$BER_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^{0.5L} \{ \text{Re}[\Phi_{\Delta}(s_l)] + \tau_l \text{Im}[\Phi_{\Delta}(s_l)] \} + E_L , \quad (29)$$

где ошибка E_L стремится к нулю, как только L становится достаточно большим по значению, т.е. сходимость вероятности ошибки на бит BER_i будет наблюдаться при возрастании значения L . Отметим, что в (29) используется квадратурная формула Гаусса-Чебышева при четном числе точек (узлов), в которых кривая функции пересекает саму себя, но только половина этих точек используется при вычислении вероятности ошибки на бит BER_i вследствие того, что действительная часть производящей функции моментов $\Phi_{\Delta}(s)$ является четной функцией, а мнимая часть производящей функции моментов $\Phi_{\Delta}(s)$ является нечетной функцией относительно τ_l . Подводя итог, необходимо отметить, что параметр c определяет скорость сходимости квадратурной функции Гаусса-Чебышева. Оптимальное значение параметра c , в общем случае, очень сложно получить, но различные значения параметра c приводят нас к тем же самым значениям вероятности ошибки на бит BER_i , сходящимися в одной точке. Практический опыт выполнения численного интегрирования показывает, что выполнение условия $0 < c < 1$ приводит к хорошим результатам.

Монте-Карло численное интегрирование. Как следует из (19) – (24), параметр принятия решений Δ является гауссовской случайной величиной с математическим ожиданием $D + MAI$ и дисперсией σ_w^2 , зависимой от $D_n + MAI_n$, или, что эквивалентно, зависимой от $\{\alpha_n\}, \{\beta_{k,n}\}, \{\tilde{\phi}_{k,n}\}, \{b_k(0)\}, k \neq i$. В соответствии с этим, условная вероятность ошибки на бит BER_i на входе приемного устройства i -го БПЛА имеет вид:

$$BER_{i|\{\alpha_n\}, \{\beta_{k,n}\}, \{\tilde{\phi}_{k,n}\}, \{b_k(0)\}} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left\{ \frac{D + MAI}{2\sigma_w^2} \right\} , \quad (30)$$

где $\text{erfc}(x)$ — дополнительная функция ошибок. Зависимость от

$\{\alpha_n\}, \{\beta_{k,n}\}, \{\tilde{\phi}_{k,n}\}, \{b_k(0)\}$ может быть удалена численным интегрированием, используя метод Монте-Карло.

3. BER при независимых замираниях

В этом разделе рассматриваются независимые и идентично распределенные замирания при наличии различных поднесущих частот. Предположение о независимости замираний, которое обеспечивается с помощью соответствующего выбора значения гипергеометрической функции ${}_1F_1(x)$, дает возможность рассматривать компоненты параметра принятия решений при передаче информационных сигналов на каждой поднесущей частоте отдельно и независимо.

Нисходящий канал. При рассмотрении нисходящего канала сигналы от различных БПЛА обрабатываются приемным устройством базовой станции (наземная станция). Индекс k , используемый при обозначении параметра канала $\beta_{k,n}$, опускается. Для простоты используем следующее определение

$$A_n = 1 + \sum_{k=1, k \neq i}^K b_k(0) c_{k,n} c_{i,n}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (31)$$

Рассмотрим линейное суммирование сигналов равной мощности, т.е. $\alpha_n = 1$. В этом случае

$$D_n + MAI_n = \beta_n A_n. \quad (32)$$

Аддитивный гауссовский шум имеет нулевое математическое ожидание и дисперсию, равную

$$\sigma_w^2 = \frac{N^2}{E_b / N_0}. \quad (33)$$

Поскольку передаваемый сигнал и аддитивный гауссовский шум представляют собой независимые случайные процессы, и суммирование аддитивного гауссовского шума с мешающими сигналами, генерируемыми другим источником, спектр которых перекрывается со спектром ожидаемого сигнала, являются также независимыми случайными процессами. При этих условиях, характеристическая функция $\Psi_\Delta(j\omega)$ параметра принятия решений Δ , зависящего от $\{b_k(0)\}$, может быть выражена следующим образом:

$$\Psi_\Delta(j\omega | \{b_k(0)\}) = \Psi_w(j\omega) \prod_{n=1}^N \Psi_{D_n + MAI_n}(j\omega | \{b_k(0)\}) \quad (34)$$

где

$$\Psi_w(j\omega) = \exp\left\{-\frac{N^2 \omega^2}{2E_b / N_0}\right\}, \quad (35)$$

и учитывая (77), получаем

$$\Psi_{D_n + MAI_n}(j\omega | \{b_k(0)\}) = {}_1F_1(m; 0.5; -A_n^2 \omega^2 / 4m) + j\omega A_n [\Gamma(m + 0.5) / \Gamma(m) \sqrt{m}] {}_1F_1(m + 0.5; 1.5; -A_n^2 \omega^2 / 4m) \quad (36)$$

где ${}_1F_1(\cdot)$ — является гипергеометрической функцией [25]. Условная производящая функция моментов MGF параметра принятия решений Δ может быть определена следующим образом:

$$\Phi_\Delta(s | \{b_k(0)\}) = \exp\left\{\frac{N^2 s^2}{2E_b / N_0}\right\} \prod_{n=1}^N \left[{}_1F_1(m; 0.5; -A_n^2 s^2 / 4m) - s A_n [\Gamma(m + 0.5) / \Gamma(m) \sqrt{m}] {}_1F_1(m + 0.5; 1.5; -A_n^2 s^2 / 4m) \right] \quad (37)$$

Применяя квадратурную формулу Гаусса-Чебышева, заданную (28) и (29), получаем условную вероятность ошибок на бит $BER_{i|\{b_k(0)\}}$. Поскольку $\{b_k(0)\}$ являются независимыми и идентично распределенными с равными вероятностями случайными величинами в пределах интервала $[-1, +1]$, безусловная вероятность ошибок на бит определяется следующим образом:

$$BER_i = \frac{1}{2^{k-1}} \sum_{\substack{b_1(0) \in [-1, +1] \\ \dots \\ b_{k-1}(0) \in [-1, +1] \\ \text{исключая } b_i(0)}} \dots \sum_{b_k(0) \in [-1, +1]} BER_{i|\{b_k(0)\}}. \quad (38)$$

Поскольку вероятность ошибок на бит может принимать различные значения при приеме информационных сигналов разными БПЛА, соответствующей характеристикой для всей системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот является вероятность ошибок на бит, усредненная по всем каналам передачи информационных сигналов от базовой станции к различным БПЛА, т.е.

$$BER = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K BER_i. \quad (39)$$

Рассмотрим теперь суммирование дифференциально взвешенных сигналов в каждом канале, т.е. $\alpha_n = \beta_n$. При использовании суммирования дифференциально взвешенных сигналов в каждом канале мы можем записать

$$\begin{cases} D_n + MAI_n = \gamma_n A_n, \\ \gamma_n = \beta_n^2. \end{cases} \quad (40)$$

Аддитивный гауссовский шум w_n обладает нулевым математическим ожиданием и дисперсией, заданной в (24). Поскольку заданные γ_n и $\{b_k(0)\}$, $D_n + MAI_n$ и w_n являются условно независимыми, то из этого следует, что условная характеристическая функция Θ параметра принятия решений Δ_n может быть представлена в виде

$$\Psi_{\Delta_n}(j\omega | \gamma_n, \{b_k(0)\}) = \Psi_{w_n}(j\omega | \gamma_n) \Psi_{D_n + MAI_n}(j\omega | \gamma_n, \{b_k(0)\}), \quad (41)$$

где

$$\begin{cases} \Psi_{w_n}(j\omega | \gamma_n) = \exp\left\{-\frac{N\omega^2 \gamma_n}{2E_b/N_0}\right\}, \\ \Psi_{D_n + MAI_n}(j\omega | \gamma_n, \{b_k(0)\}) = \exp\{j\omega A_n \gamma_n\}. \end{cases} \quad (42)$$

Усредняя (41) относительно γ_n , плотность распределения вероятностей γ_n задана в (4), получаем

$$\Psi_{\Delta_n}(j\omega | \{b_k(0)\}) = m^m \left[m + \frac{N\omega^2}{2E_b/N_0} - j\omega A_n \right]^{-m}. \quad (43)$$

Характеристическая функция Θ параметра принятия решений Δ , усредненная относительно $\{b_k(0)\}$, имеет следующий вид

$$\Psi_{\Delta}(j\omega | \{b_k(0)\}) = m^{Nm} \prod_{n=1}^N \left[m + \frac{N\omega^2}{2E_b/N_0} - j\omega A_n \right]^{-m}, \quad (44)$$

и соответствующая производящая функция моментов *MGF* может быть представлена в следующем виде

$$\Phi_{\Delta}(s | \{b_k(0)\}) = m^{Nm} \prod_{n=1}^N \left[m - \frac{Ns^2}{2E_b/N_0} + sA_n \right]^{-m}. \quad (45)$$

Однозначно ясно, что необходимо применять квадратурную формулу Гаусса-Чебышева для определения условной вероятности ошибки на бит $BER_{i|\{b_k(0)\}}$ для приемного устройства *i*-го БПЛА. В этом случае, вероятность ошибки на бит может быть определена, используя (38).

Восходящий канал. Рассмотрим теперь восходящий канал, т.е. канал передачи информационных сигналов от базовой станции (наземная станция) к мобильным станциям (БПЛА). Для восходящего канала системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот приемлемо предположить, что сигналы на входах приемных устройств всех БПЛА подвержены воздействию независимых и идентично распределенных замираний. Кроме того, предполагается, что независимые и идентично распределенные замирания воздействуют на корректность передачи информационных сигналов на каждой поднесущей частоте. Эти предположения значительно упрощают математическое определение характеристической функции Θ и производящей функции моментов *MGF*. Возможно независимое использование любой поднесущей частоты из множества поднесущих частот для приема информационных сигналов приемным устройством любого БПЛА.

Рассмотрим метод линейного суммирования сигналов равной мощности. Ожидаемый сигнал, передаваемый на *n*-ой поднесущей частоте, и мешающий сигнал, генерируемый посторонним источником излучения, спектр которого перекрывается со спектром передаваемого сигнала, и также распространяется на *n*-ой поднесущей частоте, обрабатываются приемным устройством *k*-го БПЛА. Эти сигналы можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} D_n = \beta_n, \\ MAI_{k,n} = b_k(0) c_{i,n} c_{k,n} \beta_{k,n} \cos \tilde{\phi}_{k,n}. \end{cases} \quad (46)$$

Поскольку аддитивный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, заданной в (33), передаваемый сигнал и мешающий сигнал *MAI* генерируемый посторонним источником излучения, спектр которого перекрывается со спектром передаваемого сигнала, являются взаимно независимыми процессами, характеристическую функцию сигнала на входе приемного устройства БПЛА можно представить в следующем виде:

$$\Psi_{\Delta}(j\omega) = \Psi_w(j\omega) \prod_{n=1}^N \Psi_{D_n}(j\omega) \prod_{k=1, k \neq i}^K \prod_{i=1}^N \Psi_{MAI_{k,n}}(j\omega) , \quad (47)$$

где $\Psi_w(j\omega)$ и $\Psi_{D_n}(j\omega)$ определяются (35) и (77) (Приложение 1), соответственно. Используя (77), получаем условную характеристическую функцию мешающих сигналов $MAI_{k,n}$, генерируемых посторонним источником излучения, спектр которых перекрывается со спектром передаваемого сигнала,

$$\Psi_{MAI_{k,n}}(j\omega | b_k(0)) = {}_1F_1 \left[m; 1; -\frac{[b_k(0)c_{k,n}c_{i,n}]^2 \omega^2}{4m} \right] . \quad (48)$$

При наличии двоичной фазовой модуляции и использовании бинарных расширяющих кодовых последовательностей передаваемого сигнала определение (48) сводится к следующему выражению

$$\Psi_{MAI_{k,n}}(j\omega) = {}_1F_1 \left[m; 1; -\frac{\omega^2}{4m} \right] , \quad (49)$$

где зависимость от $b_k(0)$ автоматически устраняется. Выражение (49) показывает, что мешающий сигнал $MAI_{k,n}$, генерируемый посторонним источником излучения, спектр которого перекрывает спектр передаваемого сигнала, не имеет какой-либо функциональной связи с бинарными расширяющими кодовыми последовательностями при их использовании. Другими словами, кодированная ортогональность между БПЛА теряется. В итоге, производящая функция моментов MGF параметра принятия решений Δ может быть представлена следующим образом:

$$\Phi_{\Delta}(s) = \exp \left\{ \frac{N^2 s^2}{2E_b/N_0} \right\} \left[{}_1F_1 \left[m; 1; \frac{s^2}{4m} \right] \right]^{N(K-1)} \left[{}_1F_1 \left[m; \frac{1}{2}; \frac{s^2}{4m} \right] - s \frac{\Gamma(m+1/2)}{\Gamma(m)\sqrt{m}} {}_1F_1 \left[m + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{s^2}{4m} \right] \right]^N . \quad (50)$$

Вероятность ошибки на бит BER_i при обработке принимаемого сигнала многоканальным приемным устройством i -го БПЛА может быть определена без каких-либо сложностей, используя квадратурную формулу Гаусса-Чебышева.

Рассмотрим суммирование дифференциально взвешенных сигналов каждого канала, т.е. выполняется условие $\alpha_n = \beta_{i,n}$. Сигнал, передаваемый передатчиком i -го БПЛА на вход приемного устройства базовой станции, транслируется на n -ой поднесущей частоте. Мешающий сигнал $MAI_{k,n}$, генерируемый посторонним источником излучения, т.е. генератором k -го БПЛА, спектр которого перекрывается со спектром передаваемого сигнала от i -го БПЛА, также приходит на вход приемного устройства базовой станции, используя n -ую поднесущую частоту

$$\begin{cases} D_n = \beta_{i,n}^2 ; \\ MAI_n = b_k(0)c_{k,n}c_{i,n}\beta_{i,n}\beta_{k,n} \cos \tilde{\phi}_{k,n} . \end{cases} \quad (51)$$

Аддитивный гауссовский шум w_n на n -ой поднесущей частоте обладает нулевым математическим ожиданием и дисперсией, определенной в (24). Отметим, что передаваемый сигнал D_n , аддитивный гауссовский шум w_n и мешающий сигнал $MAI_{k,n}$, генерируемый посторонним источником излучения, спектр которого перекрывается со спектром передаваемого сигнала, являются условно независимыми случайными процессами при заданном $\beta_{i,n}$. Отсюда следует, что

$$\Psi_{\Delta_n}(j\omega | \beta_{i,n}) = \Psi_{w_n}(j\omega | \beta_{i,n}) \Psi_{D_n}(j\omega | \beta_{i,n}) \prod_{k=1}^K \Psi_{MAI_{k,n}}(j\omega | \beta_{i,n}) \quad (52)$$

при

$$\begin{cases} \Psi_{w_n}(j\omega | \beta_{i,n}) = \exp \left\{ -\frac{N\beta_{i,n}^2}{2E_b/N_0} \right\} ; \\ \Psi_{D_n}(j\omega | \beta_{i,n}) = \exp(j\omega\beta_{i,n}^2) \end{cases} \quad (53)$$

и, как показано в (76), Приложение 1, мы имеем

$$\Psi_{MAI_{k,n}}(j\omega | \beta_{i,n}) = {}_1F_1(m; 1; -\beta_{i,n}^2 \omega^2 / 4m) , \quad (54)$$

где предполагается наличие двоичной фазовой модуляции и бинарных расширяющих кодовых последовательностей информационных сигналов. В этом случае, зависимость $b_k(0)$ автоматически удаляется. Обозначая $\gamma_{i,n} = \beta_{i,n}^2$, характеристическая функция параметра принятия решений Δ , определяемая $\gamma_{i,n}$, может быть представлена в

следующем виде:

$$\Psi_{\Delta_n}(j\omega | \beta_{i,n}) = \exp\left\{\gamma_{i,n} \left[j\omega - \frac{N\omega^2}{2E_b/N_0} \right]\right\} \left[{}_1F_1(m; 1; -\gamma_{i,n}\omega^2/4m) \right]^{K-1}. \quad (55)$$

Усреднение (55) относительно $\gamma_{i,n}$ (возврат к определению производящей функции моментов *MGF*) позволяет получить следующее выражение

$$\Psi_{\Delta_n}(s) = \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^\infty x^{m-1} \exp(-x) \left[{}_1F_1\left(m; 1; \frac{xs^2}{4m}\right) \right]^{K-1} \exp\left\{-\frac{x}{m} \left[s - \frac{Ns^2}{2E_b/N_0} \right]\right\} dx, \quad (56)$$

где $x = m\gamma_{i,n}$. Этот интеграл имеет решение в закрытой форме при $m=1$ [45]. В общем случае, этот интеграл можно оценивать при использовании методов численного интегрирования, например, таких как квадратурная функция Гаусса-Лаггера [45] и [46]. В частности, в [46] продемонстрирована связь между полиномами Лаггера и весовыми функциями.

Вследствие предположения независимых замираний для различных поднесущих частот производящая функция моментов *MGF* параметра принятия решений определяется как $\Phi_{\Delta}(s) = [\Phi_{\Delta_n}(s)]^N$. Мы можем использовать также квадратурную функцию Гаусса-Чебышева, получаемую из определения производящей функции моментов, представленную в разделе 3, для оценивания вероятности ошибок на бит *BER*.

4. BER при коррелированных замираниях

В предыдущем разделе предполагалось, что каждая несущая частота подвергается воздействию независимых замираний. Это предположение справедливо при условии $F > 1$, при котором система с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот не является эффективной с точки зрения полосы пропускания частот или рабочего диапазона частот. В общем случае, система с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот, т.к. частотный интервал между соседними поднесущими частотами системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот обычно минимизируется, т.е. $F=1$, для поддержания высокой эффективности относительно полосы пропускания частот. В этом разделе проводится исследование вероятности ошибок на бит системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот и наличии коррелированных замираний, подчиняющихся Накагами-*m* распределению плотности вероятностей, при передаче информационных сигналов как по синхронизированному восходящему каналу (от базовой станции к БПЛА), так и по нисходящему каналу (от БПЛА к базовой станции) системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот.

Модель коррелированных замираний. Рассмотрим модель коррелированных замираний как в синхронизированном восходящем канале (передача информационных сигналов от базовой станции к БПЛА), так и в нисходящем канале (передача информационных сигналов от БПЛА к базовой станции) системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. Полагаем, что используются антенны с круговым обзором. Также считаем, что синхронизированный восходящий и нисходящий каналы системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот обладают экспоненциальным многолучевым профилем интенсивности замираний с разбросом временной задержки, равной T_d . Коэффициенты усиления канала на двух разных поднесущих частотах ω_n и $\omega_{n'}$ могут быть промоделированы в частотной области с помощью двух комплексных случайных величин $\beta_n \exp(j\varphi_n)$ и $\beta_{n'} \exp(j\varphi_{n'})$, где параметры замираний β_n и $\beta_{n'}$ распределены в соответствии с Накагами-*m* распределением плотности вероятностей с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией

$$E[\beta_n^2] = E[\beta_{n'}^2] = 1, \quad (57)$$

φ_n и $\varphi_{n'}$ представляют собой случайные фазы, равномерно распределенные в пределах интервала $[-\pi, \pi]$. В [23] и [46] показано, что совместная плотность распределения вероятностей случайных величин β_n и $\beta_{n'}$ может быть представлена в виде

$$f_{\beta_n, \beta_{n'}}(\beta_n, \beta_{n'}) = \frac{4m^{m+1}(\beta_n \beta_{n'})^m}{\Gamma(m)(1-\rho)\rho^{0.5(m-1)}} \exp\left\{-\frac{m[\beta_n^2 + \beta_{n'}^2]}{1-\rho}\right\} I_{m-1}\left(\frac{2m\sqrt{\rho}\beta_n\beta_{n'}}{1-\rho}\right), \quad (58)$$

где $I_m(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода *m*-го порядка [25] и ρ – коэффициент корреляции между β_n и $\beta_{n'}$.

При рассмотрении рэлеевских замираний обозначим две соответствующие огибающие амплитуды рэлеевского замирания как ξ_n и $\xi_{n'}$ имеет вид

$$f_{\xi_n, \xi_{n'}}(\xi_n, \xi_{n'}) = \frac{\xi_n \xi_{n'}}{\mu^2(1-\nu^2)} \exp\left\{-\frac{\xi_n^2 + \xi_{n'}^2}{2\mu(1-\nu^2)}\right\} I_0\left(\frac{\nu \xi_n \xi_{n'}}{\mu(1-\nu^2)}\right) \quad (59)$$

с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией

$$E[\zeta_n^2] = E[\xi_n^2] = 1, \mu = 0.5 \quad (60)$$

и

$$v^2 = \frac{1}{1 + [(\omega_{n'} - \omega_n)T_d]^2} \quad (61)$$

Поскольку (58) при условии $m = 1$ превращается в (59), соблюдается соотношение

$$\rho = v^2 \quad (62)$$

Другой параметр, интересующий нас, представляет собой ковариационную функцию случайных переменных β_n и $\beta_{n'}$, которая имеет вид [47]:

$$\text{Cov}[\beta_n, \beta_{n'}] \equiv E[\beta_n^2, \beta_{n'}^2] - E[\beta_n^2]E[\beta_{n'}^2] = \rho/m \quad (63)$$

Полагая $\gamma_m = \beta_n^2$, можно определить элементы ковариационной матрицы $\mathbf{R} = \{R_{mn'}\}$ размером $M \times M$ следующим образом

$$R_{mn'} = E[\gamma_n \gamma_{n'}] - E[\gamma_n]E[\gamma_{n'}] = \frac{1}{1 + [(\omega_{n'} - \omega_n)T_d]^2} \quad (64)$$

Минимальный уровень ошибки. Рассмотрим минимальный уровень вероятности ошибки на бит при передаче информационных сигналов по нисходящему каналу системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, когда приемное устройство базовой станции использует для многоканальной обработки сигналов метод суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала. Рассмотрим нисходящий канал при наличии коррелированных замираний. Очень часто весьма сложно использовать метод суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала на основе определения производящей функции моментов для определения вероятности ошибок на бит в системе с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. Основная проблема заключается в том, что производящую функцию моментов MGF параметра принятия решений Δ очень трудно получить, т.к. необходимо анализировать совместно все поднесущие частоты, в то время как при независимых замираниях в нисходящем канале системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот каждая поднесущая частота может управляться независимо. Тем не менее, в особом случае, при рассмотрении нисходящего канала системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот, когда приемное устройство базовой станции использует для многоканальной обработки сигналов метод суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала, производящая функция моментов MGF параметра принятия решений Δ может быть получена вследствие достаточно хорошо определенного многопараметрического Гамма-распределения плотности вероятностей.

Действительно, разнесенный прием сигналов при использовании метода суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала при коррелированных замираниях, подчиняющихся Накагами- m распределению плотности вероятностей, хорошо изучен в [48] и [49]. Расширим эти результаты для системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, что вызывает определенные сложности из-за присутствия мешающих сигналов MAI , генерируемых посторонними источниками излучения, спектр которых перекрывается со спектром передаваемых информационных сигналов. Для упрощения анализа, пренебрежем аддитивным гауссовским шумом, поскольку мы заинтересованы в анализе асимптотической вероятности ошибок, также известной как минимальный уровень ошибок, который имеет большое значение для мешающих сигналов

MAI , генерируемых посторонними источниками излучения, спектр которых перекрывается со спектром передаваемых информационных сигналов, непосредственно в системах с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот.

При когерентном обнаружении и суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала параметр принятия решений Δ может быть представлен в следующем виде:

$$\Delta = \sum_{n=1}^N A_n \gamma_n, \quad \gamma_n = \beta_n^2 \quad (65)$$

где A_n определен в (31). Параметр принятия решений Δ состоит из двух типов случайных величин: $\{\gamma_n\}$ и $\{b_k(0)\}$. На основе результатов, представленных в [49] и [50], мы можем определить производящую функцию моментов MGF параметра принятия решений Δ в зависимости от $\{b_k(0)\}$ (Приложение 2) следующим образом:

$$\Phi_{\Delta}(s | \{b_k(0)\}) = \prod_{n=1}^N (1 + s \lambda_n)^{-m} \quad (66)$$

где $\{\lambda_n\}$ – собственные числа матрицы $\mathbf{A}\mathbf{H}$, \mathbf{A} – диагональная матрица, определяемая как

$$\mathbf{A} = \text{diag}\{A_1, A_2, \dots, A_N\} \quad (67)$$

Согласно [51], матрица \mathbf{H} связана с матрицей \mathbf{R} следующим образом:

$$H_{mn'} = \sqrt{R_{mn'}/m}, \quad n, n' = 1, 2, \dots, N \quad (68)$$

Предполагая независимость замираний на поднесущих частотах, ковариационная матрица \mathbf{R} , также как и матрица \mathbf{H} , сводится к \mathbf{I}/m , считаем, что T_d достаточно большое по величине, где \mathbf{I} – единичная матрица размером $M \times M$. Собственные числа $\{\lambda_n\}$ матрицы $\mathbf{A}\mathbf{H}$ определяются как $\{\lambda_n = A_n/m\}$. Подстановка этих собственных чисел в (66) приводит к (45), если предположить, что $E_b/N_0 \rightarrow \infty$. Этот результат ожидаем, поскольку модель нисходящего канала с независимыми замираниями системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот является специфическим случаем модели нисходящего ка-

нала с коррелированными замираниями. При заданной условной происходящей функции моментов $\Phi_{\Delta}(s|\{b_k(0)\})$ мы можем определить численные значения вероятности ошибки на бит в зависимости от $\{b_k(0)\}$, применяя два метода.

Первый метод – решение в закрытой форме, m – целое число. Когда параметр замираний m является целым числом, мы всегда можем получить выражение для вероятности ошибки на бит BER в закрытой форме. Как и в [52], выражение (66) может быть представлено в виде следующей суммы:

$$\Phi_{\Delta}(s|\{b_k(0)\}) = \sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^m \frac{a_{nr}}{(1+s\lambda_n)^r}, \quad (69)$$

где коэффициент a_{nr} определяется как

$$a_{nr} = \frac{1}{(m-r)! \lambda_n^{m-r}} \frac{d^{m-r}}{ds^{m-r}} \left[\prod_{n'=1, n' \neq n}^N (1+s\lambda_{n'})^{-m} \right]_{s=-\lambda_n^{-1}}. \quad (70)$$

Для строгого вывода коэффициента a_{nr} необходимо определить численно порядок дифференцирования функции произведения, что может быть выполнено, используя рекурсивный алгоритм, представленный в [52].

Заметим, что (66) содержит N полюсов порядка m при $\{s = -\lambda_n^{-1}\}$. После некоторых преобразований (Приложение 3), получаем следующую формулу вычетов:

$$\text{Остаток} \left[\frac{\Phi_{\Delta}(s|\{b_k(0)\})}{s} \right]_{s=-\lambda_n^{-1}} = - \sum_{r=1}^m a_{nr}. \quad (71)$$

В соответствии с (27), условная вероятность ошибки на бит при многоканальной обработке информационных сигналов приемным устройством i -го БПЛА определяется как

$$BER_{i|\{b_k(0)\}} = \sum_{n=1, \lambda_n < 0}^N \sum_{r=1}^m a_{nr}. \quad (72)$$

Решение численным интегрированием $\forall m \geq 1/2$. С этой целью необходимо применять квадратурную формулу Гаусса-Чебышева, представленную в (28) и (29) для численного расчета вероятности ошибки на бит $BER_{i|\{b_k(0)\}}$. Поскольку собственные числа $\{\lambda_n\}$ зависят от $\{b_k(0)\}$ посредством матрицы \mathbf{A} , определенной в (31) и (67), безусловная вероятность ошибки на бит при многоканальной обработке информационных сигналов приемным устройством i -го БПЛА может быть определена численно, усредняя $BER_{i|\{b_k(0)\}}$ относительно $\{b_k(0)\}$, как это представлено в (38).

Видно, что симметричная Теплицева ковариационная матрица \mathbf{R} описывает коррелированные замирания, подчиняющиеся Накагами- m распределению плотности вероятностей, в каналах связи системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, в то время как диагональная матрица \mathbf{A} и ковариационная матрица \mathbf{R} характеризуют мешающие сигналы МАИ, генерируемые посторонними источниками излучения, спектр которых перекрывается со спектром передаваемых информационных сигналов. Подобное упрощение позволяет довольно-таки строго рассматривать мешающие сигналы МАИ и Накагами- m замирания. Ограничения предлагаемого метода заключаются в том, что этот метод приемлем для систем, обслуживающих относительно малое количество БПЛА, т.к. вычислительные затраты экспоненциально возрастают с увеличением количества БПЛА. Применение этого метода позволяет понизить вероятность ошибки на бит при передаче информационных сигналов по нисходящему каналу системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот при многоканальной обработке сигналов приемным устройством базовой станции, используя суммирование дифференциально взвешенных сигналов каждого канала

в том случае, когда рассматриваются различные расширяющие кодовые последовательности, а также при различных значениях коэффициентов корреляции между поднесущими частотами, и замирания обладают различной интенсивностью. Более того, при незначительном количестве БПЛА, гауссовская аппроксимация приемлемой точности. В этом случае процесс моделирования является просто потерей времени.

5. Численное моделирование

В этом разделе представлены результаты численного моделирования. Рассматриваем три семейства расширяющих кодовых последовательностей информационных сигналов, а именно: коды Уолша-Адамара, золотой код и ортогональный золотой код. Коды Уолша-Адамара генерируются матрицей Адамара. Золотой код длиной 31 байт генерируется с помощью двух предпочтительных последовательностей максимальной длины 45 и 67 восьмеричных байтов. Ортогональные золотые коды [53] длиной 32 байта получаются из соответствующих золотых кодов, для которых используются 32 поднесущих частоты до тех пор, пока не будут специфицированы другие поднесущие частоты. Для определения вероятности ошибки на бит при наличии замираний Накагами- m как в синхронизированном восходящем канале, так и в нисходящем канале системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, рассматриваются следующие значения параметра замираний: $m=0.5$ – наиболее неблагоприятные замирания, характеризующиеся очень высокой интенсивностью; $m=1.0$ – рэлеевские замирания; $m=1.5$ – наиболее благоприятные замирания, характеризующиеся низкой интенсивностью. В случае независимых замираний можно сослаться на результаты, полученные в [2], при рассмотрении гауссовской аппроксимации. В частности, при анализе нисходящего канала системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, т.е. при передаче информационных сигналов от

БПЛА к базовой станции, можно воспользоваться выражением из [2, Eq.(19)], если приемное устройство базовой станции при многоканальной обработке принимаемых сигналов использует метод линейного суммирования сигналов равной мощности, или выражением из [2, Eq.(20)], в случае использования метода суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала. Для синхронизированного восходящего канала системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, т.е. при передаче информационных сигналов от базовой станции к БПЛА, можно воспользоваться выражением из [2, Eq.(16)], если приемное устройство базовой станции при многоканальной обработке принимаемых сигналов использует метод линейного суммирования сигналов равной мощности, или из [2, Eq.(18)], в случае использования метода суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала.

Прежде всего, рассмотрим модель независимых замираний в нисходящем и синхронизированном восходящем каналах системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот. Для нисходящего канала, т.е. при передаче информационных сигналов от БПЛА к базовой станции, коды Уолша-Адамара используются для разделения и различения БПЛА. При рассмотрении синхронизированного восходящего канала, т.е. при передаче информационных сигналов от базовой станции к БПЛА, бинарные расширяющие кодовые последовательности информационных сигналов обеспечивают одинаковую вероятность ошибки на бит. На рис. 3 и 4 представлен сравнительный анализ вероятности ошибки на бит при использовании численного интегрирования методом Монте-Карло, производящей функции моментов и гауссовской аппроксимации. На рис. 3 демонстрируется вероятность ошибки на бит для нисходящего канала системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, когда приемное устрой-

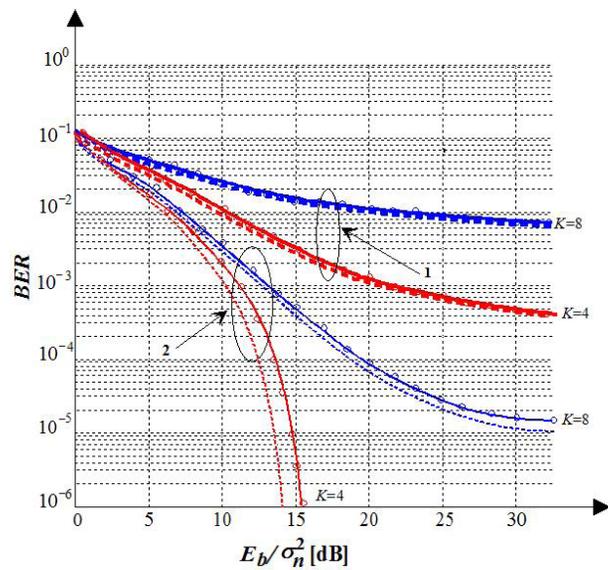


Рис. 3. Вероятность ошибок в нисходящем канале, оцениваемая моделированием Монте-Карло ($^{\circ}$), при использовании производящей функции моментов (сплошная линия) и гауссовской аппроксимации (пунктир), в зависимости от отношения сигнал/помеха для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот при наличии рэлеевских замираний ($m=1$). Используется кодирование Уолша-Адамара ($N=32$): 1- метод суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала; 2 – метод линейного суммирования сигналов равной мощности

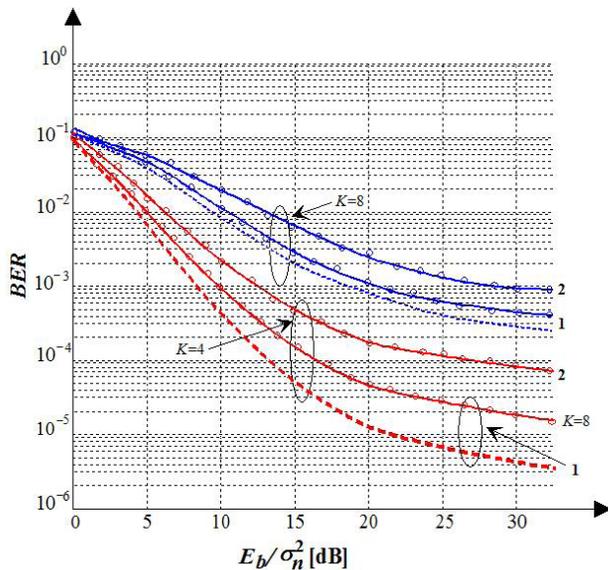


Рис. 4. Вероятность ошибок в восходящем канале, при использовании производящей функции моментов (сплошная линия) и гауссовской аппроксимации (пунктир), в зависимости от отношения сигнал/помеха для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот при наличии рэлеевских замираний ($m=1$). Используется кодирование Уолша-Адамара ($N=32$): 1- метод суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала; 2 – метод линейного суммирования сигналов равной мощности.

вой станции использует несколько методов многоканальной обработки сигналов. Так, при использовании метода линейного суммирования сигналов равной мощности

наблюдается лучшая характеристика вероятности ошибки на бит по сравнению с методом суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала.

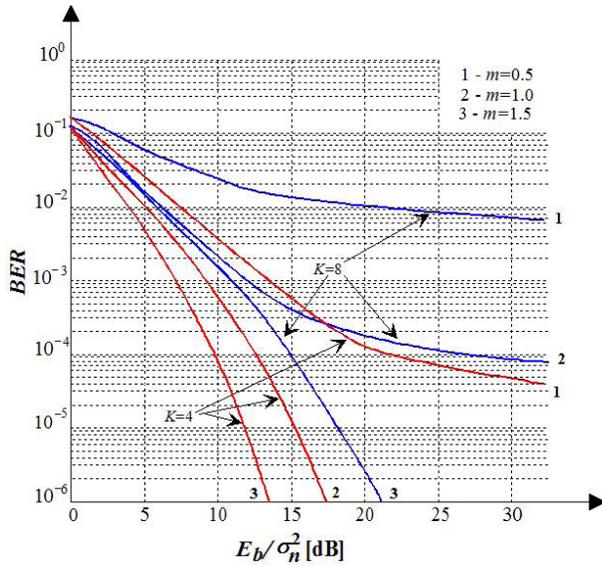


Рис. 5. Вероятность ошибок в нисходящем канале в зависимости от отношения сигнал/помеха для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот при линейном суммировании сигналов равной мощности и наличии Накагами- m замираний. Используется кодирование Уолша-Адамара ($N=32$).

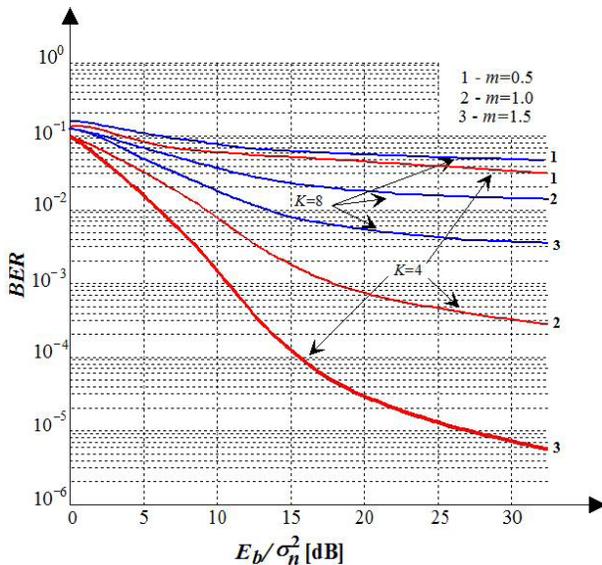


Рис. 6. Вероятность ошибок в нисходящем канале в зависимости от отношения сигнал/помеха для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала и наличии Накагами- m замираний. Используется кодирование Уолша-Адамара ($N=32$).

Также наблюдается значительное отличие в значениях вероятности ошибок на бит при использовании гауссовской аппроксимации.

Из рис. 4 следует, что для синхронизированного восходящего канала системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот использова-

ние приемным устройством БПЛА при многоканальной обработке принимаемых сигналов метода суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала позволяет получить лучшие характеристики вероятности ошибки на бит по сравнению с использованием метода линейного суммирования сигналов равной

мощности. Гауссовская аппроксимация не позволяет получать достаточно точные значения вероятности ошибки на бит при использовании в приемном устройстве БПЛА при многоканальной обработке принимаемых сигналов метода суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала, но позволяет получать более высокую точность при использовании метода линейного суммирования сигналов равной мощности. На рис. 3 и 4 продемонстрировано хорошее совпадение результатов при использовании численного интегрирования методом Монте-Карло и квадратурной формулы Гаусса-Чебышева, основанных на определении производящей функции моментов, в то время как гауссовская аппроксимация не дает такого точного совпадения, а порождает существенный разброс между результатами моделирования. Результаты, представленные на рис. 4, демонстрируют превосходную степень точности при определении значений вероятности ошибок на бит с помощью квадратурной функции Гаусса-Чебышева, полученной на основе определения производящей функции моментов.

На рис. 5 и 6 представлена вероятность ошибок на бит для нисходящего канала системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот при использовании приемным устройством базовой станции методов линейного суммирования сигналов равной мощности и методов суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала для многоканальной обработки информационных сигналов, принимаемых от БПЛА при наличии замираний, подчиняющихся Накагами- m распределению плотности вероятностей. Представлены соответствующие результаты, демонстрирующие влияние значений параметра замираний m на вероятность ошибки на бит. Очевидно, что значения вероятности ошибок на бит значительно изменяются в зависимости от параметра замираний m , характеризующего степень воздействия замираний. Сравнительный анализ показывает, что метод линейного суммирования сигналов равной мощности, используемый прием-

ным устройством базовой станции при многоканальной обработке информационных сигналов, принимаемых от БПЛА, более чувствителен к изменению значений параметра m по сравнению с методом суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала.

На рис. 7 и 8 представлены результаты численного моделирования для вероятности ошибок на бит при передаче информационных сигналов от базовой станции к БПЛА по синхронизированному восходящему каналу системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот. Предполагается, что восходящий канал подвергается воздействию замираний, подчиняющихся Накагами- m распределению плотности вероятностей. Приемные устройства БПЛА при многоканальной обработке информационных сигналов, передаваемых базовой станцией, используют методы линейного суммирования сигналов равной мощности и суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала. Аналогично, как и для нисходящего канала системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот, параметр замираний m оказывает существенное воздействие на значения вероятности ошибок на бит, особенно, при малом количестве БПЛА. Можно отметить, что параметр замираний m воздействует на вероятность ошибки на бит в более ярко выраженной форме, если приемное устройство БПЛА при многоканальной обработке информационных сигналов использует метод линейного суммирования сигналов равной мощности, чем при использовании метода суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала.

Далее, рассмотрим модель нисходящего канала связи системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот при коррелированных замираниях. На рис. 9 мы сравниваем полученные численные значения вероятности ошибки на бит, полученные с помощью вычисления вычетов и квадратурной формулы Гаусса-Чебышева. Наблюда-

ется очень хорошее совпадение результатов при использовании указанных выше методов при многоканальной обработке информационных сигналов, передаваемых от БПЛА к базовой станции. Этот факт подтверждает высокую точность определения вероятности ошибок на бит при использовании приемным устройством ба-

зовой станции метода квадратурной формулы Гаусса-Чебышева при многоканальной обработке информационных сигналов, основанном на определении производящей функции моментов. Из результатов, представленных на рис. 9, четко видно, что с увеличением значения параметра замирания m , что означает уменьшение небла-

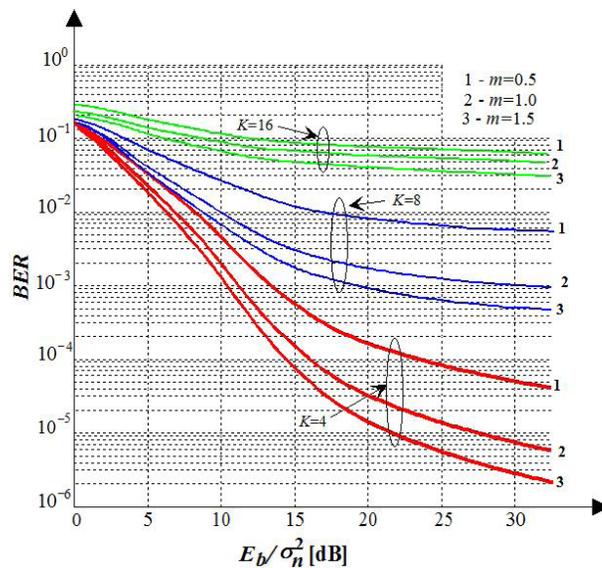


Рис. 7. Вероятность ошибок в восходящем канале в зависимости от отношения сигнал/помеха для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот при линейном суммировании сигналов равной мощности и наличии Накагами- m замираний. Используется кодирование Уолша-Адамара ($N=32$).

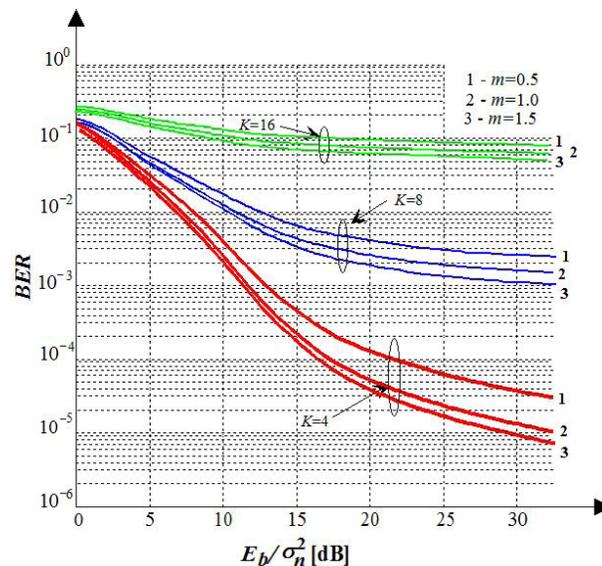


Рис. 8. Вероятность ошибок в восходящем канале в зависимости от отношения сигнал/помеха для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот при суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала и наличии Накагами- m замираний. Используется кодирование Уолша-Адамара ($N=32$).

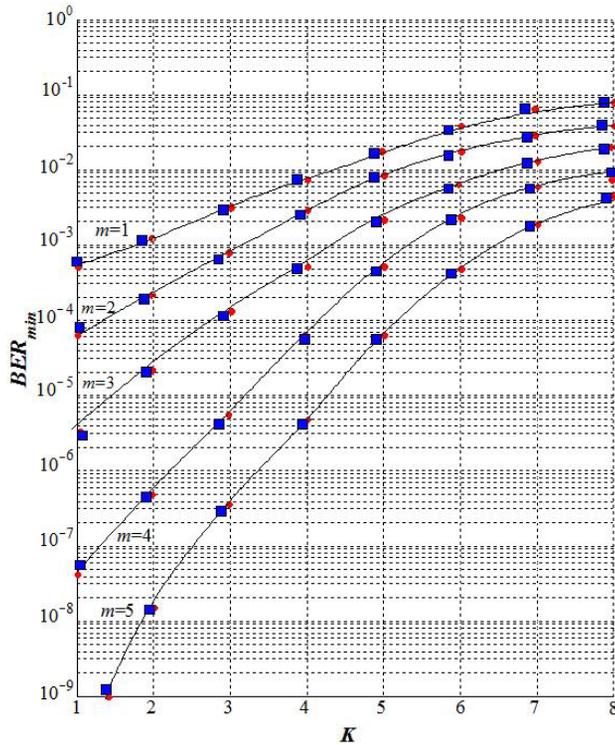


Рис. 9. Вероятность ошибок в нисходящем канале, оцениваемая методом вычетов (●) и вычислением квадратурной формулы Гаусса-Чебышева (■), в зависимости от количества БПЛА для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот при суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала и наличии Накагами-*m* замираний. Используется кодирование Уолша-Адамара ($N=32$); количество поднесущих частот равно 8 и $T_d=0.1T_b$.

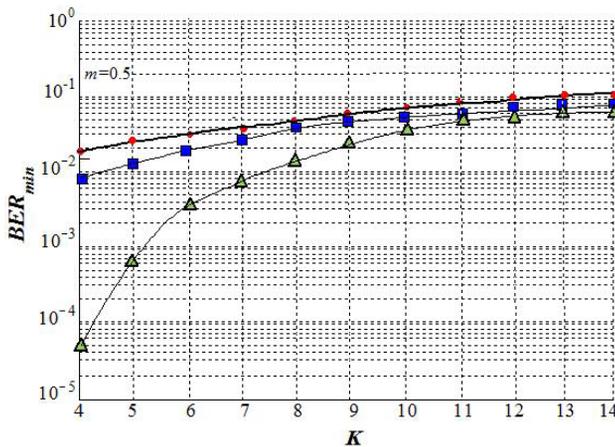


Рис. 10. Вероятность ошибок в нисходящем канале в зависимости от количества БПЛА для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот при суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала и наличии коррелированных Накагами-*m* замираний при использовании различных видов расширяющих кодовых последовательностей:
 ● – золотой код ($N=32$); ■ – ортогональный золотой код ($N=32$);
 ▲ – код Уолша-Адамара ($N=32$), и $T_d = 0.1T_b$, $m = 0.5$.

гоприятного воздействия замираний на определение параметров передаваемых информационных сигналов, как и ожидалось, улуч-

шаются характеристики системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих

частот, и, в частности, уменьшается вероятность ошибок на бит.

На рис. 10-12 представлен минимальный уровень ошибок при многоканальной обработке информационных сигналов, передаваемых по нисходящему каналу системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот от БПЛА к приемному устройству базовой станции. Приемное устройство базовой станции при многоканальной обработке сигналов использует метод, основанный на суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала при наличии коррелированных замираний, подчиняющихся Накагами-*m* распределению плотности вероятностей, когда применяются различные виды расширяющих кодовых последовательностей информационных сигналов. Очевидно, что при различных условиях для замираний, использование ортогональных кодовых последовательностей информационных сигналов, т.е. используется как ортогональный золотой код, так и код Уолша-Адамара, всегда обеспечивают лучшие характеристики системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии множества поднесущих частот по сравнению с неортогональными кодовыми последовательностями информационных сигналов, передаваемых от БПЛА к базовой станции. Использование кода Уолша-Адамара является наилучшим решением для расширяющих кодовых последовательностей информационных сигналов. Различия между характеристиками вероятности ошибок на бит при использовании золотого кода и кода Уолша-Адамара становятся значительным, если количество БПЛА достаточно мало или замирания не являются интенсивными. Эти различия уменьшаются по мере возрастания количества БПЛА или замирания в нисходящем канале становятся интенсивными. Кроме того, можно заметить, что использование кодов Уолша-Адамара для расширяющих кодовых последовательностей информационных сигналов позволяют получать лучшие характеристики

вероятности ошибки на бит по сравнению с использованием ортогональных кодовых последовательностей информационных сигналов, использующих золотой код, при возрастании интенсивности замираний. На основании результатов, представленных на рис. 10-12, можно предположить, что при передаче информационных сигналов по нисходящему каналу от БПЛА к базовой станции системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот и наличии замираний использование кода Уолша-Адамара может обеспечить большую ортогональность, т.е. меньшее воздействие мешающих сигналов МАИ, генерируемых другими БПЛА, спектр которых перекрывает спектр передаваемых информационных сигналов, по сравнению с использованием ортогонального золотого кода.

На рис. 13-15 представлен эффект воздействия корреляции между поднесущими частотами на минимальный уровень ошибок при передаче информационных сигналов по нисходящему каналу от БПЛА к базовой станции системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот, причем, приемное устройство базовой станции при многоканальной обработке информационных сигналов использует метод, основанный на суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала при наличии замираний, подчиняющихся Накагами- m распределению плотности вероятностей. На рис. 13-15 представлен усредненный минимальный уровень ошибок как функция от количества БПЛА при различных значениях разброса времени задержки. Разброс по времени задержки в нисходящем канале рассматривается как мера корреляции между поднесущими частотами. Можно заметить, что характеристика минимального уровня ошибок улучшается с уменьшением величины разброса по времени задержки, что эквивалентно увеличению степени корреляции между поднесущими частотами, независимо от значений параметра замираний m . Этот факт говорит о том, что

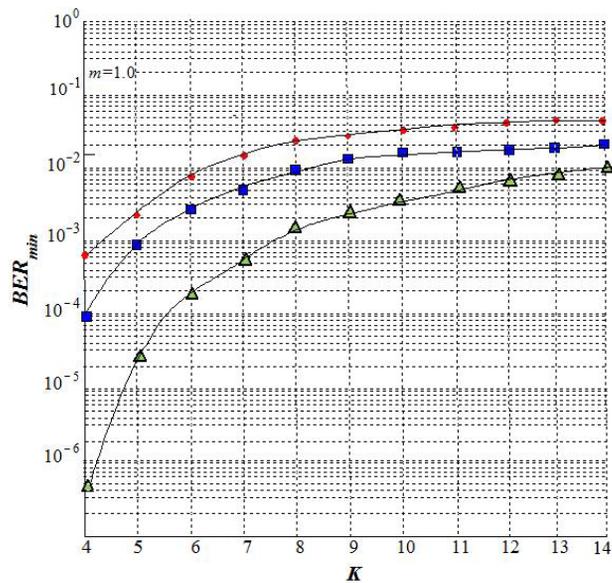


Рис. 11. Вероятность ошибок в нисходящем канале в зависимости от количества БПЛА для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала и наличии коррелированных Накагами- m замираний при использовании различных видов расширяющих кодовых последовательностей: ● – золотой код ($N=31$); ■ – ортогональный золотой код ($N=32$); ▲ – код Уолша-Адамара ($N=32$), и $T_d = 0.1T_p$, $m = 1.0$.

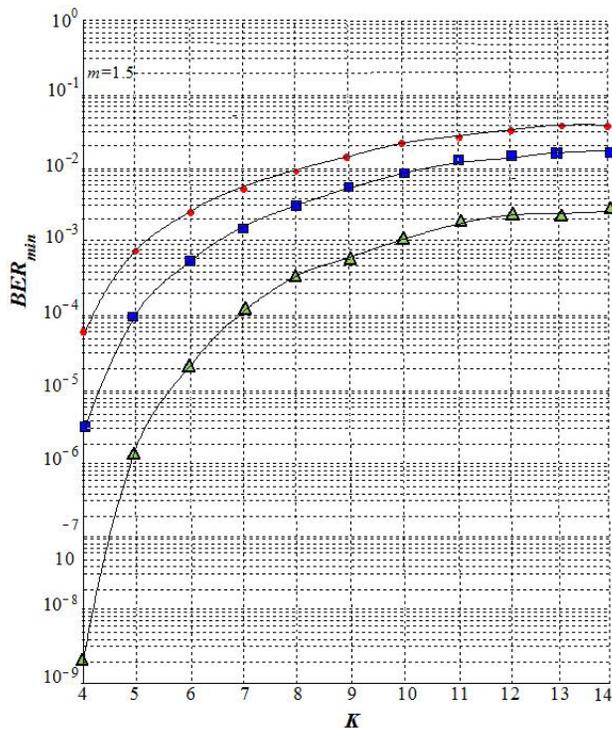


Рис. 12. Вероятность ошибок в нисходящем канале в зависимости от количества БПЛА для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала и наличии коррелированных Накагами- m замираний при использовании различных видов расширяющих кодовых последовательностей: ● – золотой код ($N=31$); ■ – ортогональный золотой код ($N=32$); ▲ – код Уолша-Адамара ($N=32$), и $T_d = 0.1T_p$, $m = 1.5$.

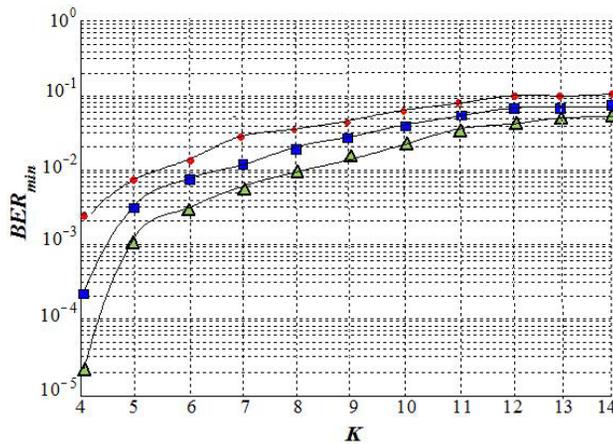


Рис. 13. Вероятность ошибок в нисходящем канале в зависимости от количества БПЛА для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот при суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала и наличии коррелированных Накагами- m замираний при различных значениях разброса времени задержки
 ● - $T_d=0.2T_b$; ■ - $T_d=0.1T_b$; ▲ - $T_d=0.05T_b$.
 Используется кодирование Уолша-Адамара ($N=32$) и 32 поднесущие частоты, $m = 0.5$.

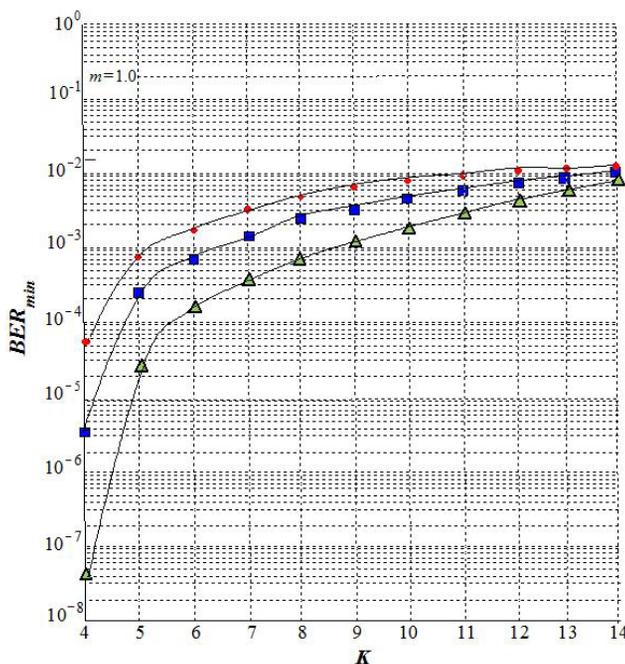


Рис. 14. Вероятность ошибок в нисходящем канале в зависимости от количества БПЛА для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот при суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала и наличии коррелированных Накагами- m замираний при различных значениях разброса времени задержки
 ● - $T_d=0.2T_b$; ■ - $T_d=0.1T_b$; ▲ - $T_d=0.05T_b$.
 Используется кодирование Уолша-Адамара ($N=32$) и 32 поднесущие частоты, $m = 1.0$.

корреляция между поднесущими частотами способствует уменьшению степени воздействия мешающих сигналов МАИ, генерируемых другими БПЛА, спектр которых перекрывает спектр передаваемых информационных сигналов, на

характеристики системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при множестве поднесущих частот в целом при передаче информационных сигналов по нисходящему каналу от БПЛА к базовой станции.

6. Заключение

В настоящей работе при использовании квадратурной формулы Гаусса-Чебышева, полученной на основе применения производящей функции моментов, была проанализирована вероятность ошибок на бит синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот при многоканальной обработке информационных кодированных сигналов приемными устройствами базовой станции и БПЛА, используя, как метод линейного суммирования сигналов равной мощности, так и метод суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала при наличии замираний в канале связи, подчиняющихся Накагами- m распределению плотности вероятностей, без какой-либо аппроксимации помеховых сигналов МАИ, генерируемых другими БПЛА, спектр которых перекрывает спектр информационных сигналов, передаваемых как по нисходящему каналу, так и по синхронизированному восходящему каналу системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот. Были рассмотрены независимые и коррелированные замирания, присутствующие как в нисходящем канале, так и в синхронизированном восходящем канале системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот. Результаты численного моделирования показывают, что квадратурная формула Гаусса-Чебышева, полученная на основе использования производящей функции моментов, обеспечивает удовлетворительную точность, и параметр замирания m может оказывать существенное влияние на численные значения вероятности ошибок на бит.

Было определено, что в случае независимых замираний для различных поднесущих частот использование приемным устройством метода линейного суммирования сигналов равной мощности при многоканальной обработке информационных сигналов, обеспечивает более низкую вероят-

ность ошибок на бит по сравнению с использованием метода суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала при передаче информационных сигналов по нисходящему каналу системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот. Однако в случае синхронизированного восходящего канала системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот возникает абсолютно противоположная ситуация, т.е. использование приемным устройством метода суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала при многоканальной обработке информационных сигналов обеспечивает более низкое значение вероятности ошибки на бит по сравнению с использованием метода линейного суммирования сигналов равной мощности. Как и ожидалось, гауссовская аппроксимация, в основном, не позволяет получить точную оценку вероятности ошибки на бит, особенно в случае незначительного количества БПЛА. Тем не менее, для системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот гауссовская аппроксимация дает хорошую точность при оценивании вероятности ошибок на бит при многоканальной обработке сигналов приемным устройством в случае передачи информационных сигналов по синхронизированному восходящему каналу системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот, используя метод линейного суммирования сигналов равной мощности. Сравнительный анализ показывает, что при многоканальной обработке сигналов приемными устройствами, как в нисходящем канале, так и в синхронизированном восходящем канале системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот, использование приемным устройством при многоканальной обработке информационных сигналов

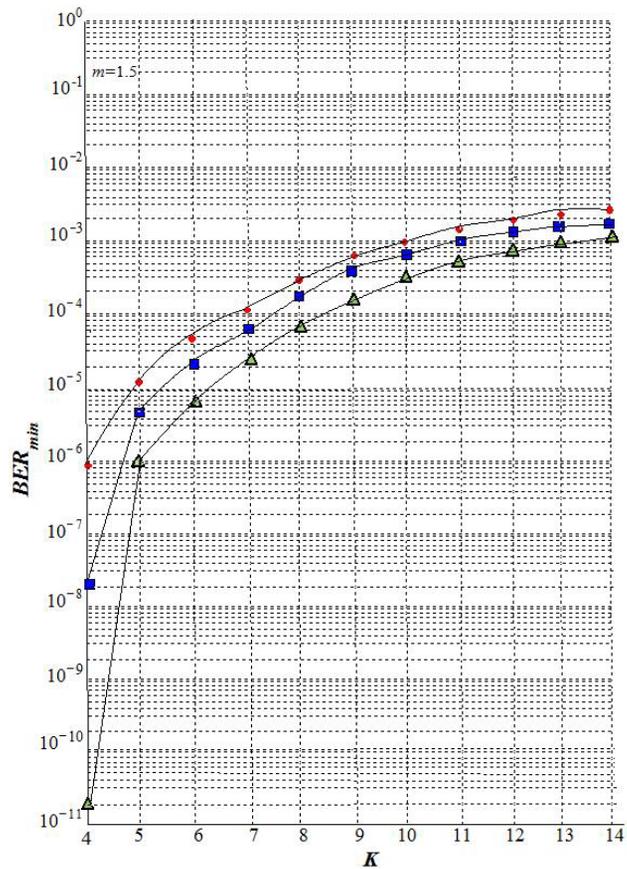


Рис. 15. Вероятность ошибок в нисходящем канале в зависимости от количества БПЛА для синхронизированной системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при множестве поднесущих частот при суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала и наличии коррелированных Накагами- m замираний при различных значениях разброса времени задержки:
 ● — $T_d=0.2T_b$; ■ — $T_d=0.1T_b$; ▲ — $T_d=0.05T_b$.
 Используется кодирование Уолша-Адамара ($N=32$) и 32 поднесущие частоты, $m = 1.5$.

метода линейного суммирования сигналов равной мощности более чувствительно к изменению параметра замираний m по сравнению с использованием метода дифференциально взвешенных сигналов каждого канала.

Был также проанализирован минимальный уровень ошибок при трансляции информационных сигналов по нисходящему каналу системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот для случая, когда приемное устройство при многоканальной обработке информационных сигналов использует метод суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала при наличии замираний в канале связи, подчиняющихся Накагами- m распределению плотности вероятности.

Было получено, что независимо от интенсивности замираний в канале связи, использование кода Уолша-Адамара при кодировании расширяющих последовательностей информационных сигналов позволяет обеспечивать меньшую вероятность ошибок на бит по сравнению с использованием как золотого кода, так и ортогонального золотого кода. Также корреляция между поднесущими частотами оказывает благоприятное воздействие на вероятность ошибок на бит при многоканальной обработке информационных сигналов приемным устройством, использующим метод дифференциально взвешенных сигналов каждого канала, в нисходящем канале системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов по частоте при наличии множества поднесущих частот.

Приложение 1: Характеристическая функция для $z \cos\theta$

Получим характеристическую функцию для $z \cos\theta$, где z представляет собой случайную величину, распределенную в соответствии с Накагами- m распределением плотности вероятностей при $E[z^2] = 1$, и фаза θ равномерно распределена в пределах интервала $[-\pi, \pi]$. Из (25) следует, что условная характеристическая функция для $z \cos\theta$ при заданном z и $\cos\theta$ может быть определена в следующем виде:

$$\Psi_{z \cos\theta}(j\omega|z, \theta) = \exp\{j\omega z \cos\theta\}, \tag{73}$$

Усредняя (73) по θ , получаем

$$\Psi_{z \cos\theta}(j\omega|z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\{j\omega z \cos\theta\} d\theta = I_0(j\omega z), \tag{74}$$

где мы используем интегральное представление модифицированной функции Бесселя первого рода нулевого порядка $I_0(\cdot)$ [26]. Следовательно,

$$\Psi_{z \cos\theta}(j\omega|z) = J_0(-\omega z), \tag{75}$$

где $J_0(\cdot)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка [25]. Усредняя (75) относительно z и используя интегральную форму [50], получаем

$$\Psi_{z \cos\theta}(j\omega) = {}_1F_1(m; 1; -\omega^2/4m). \tag{76}$$

При $m = 1$, т.е. z представляет собой рэлеевскую случайную величину, (76) сводится к выражение

$$\Psi_{z \cos\theta}(j\omega) = \exp\{-\omega^2/4\} \tag{77}$$

которое представляет собой характеристическую функцию гауссовской случайной величины с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной 0.5 [51]. В соответствии с [14] уравнение (76) выражается через вырожденную гипергеометрическую функцию в более компактной форме. Очень важно отметить, что (16) в [14] действительно только для целых m , в то время как (76) имеет смысл для любых действительных $m \geq 0.5$. Для удобства, внесем в таблицу [54, с. 1735] характеристическую функцию для переменной z

$$\Psi_z(j\omega) = {}_1F_1\left[m; 0.5; -\frac{\omega^2}{4m}\right] + j\omega \frac{\Gamma(m+0.5)}{\Gamma(m)\sqrt{m}} {}_1F_1\left[m+0.5; 1.5; -\frac{\omega^2}{4m}\right]. \tag{78}$$

Приложение 2: Производящая функция моментов параметра принятия решений

Хорошо известно, что случайные величины $\{\gamma_n = \beta_n^2\}$ подчиняются Гамма-распределению, а случайная величина $\{\beta_n\}$ подчиняется Накагами- m распределению плотности вероятностей [53], [54]. Множество коррелированных случайных величин $\{\gamma_n\}$ могут быть представлены их совместной характеристической функцией в виде [55], [56]:

$$\Psi_{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N}(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_N) \equiv E\left\{\exp\left[j\sum_{n=1}^N \omega_n \gamma_n\right]\right\} = \det(\mathbf{I} - j\Omega\mathbf{H})^{-m}, \tag{79}$$

где $\det(\cdot)$ – определитель матрицы; \mathbf{I} – единичная матрица;

$$\Omega = \text{diag}\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N\} \tag{80}$$

– диагональная матрица; матрица \mathbf{H} связана с ковариационной матрицей \mathbf{R} уравнением (68). Отсюда следует, что

$$\Psi_{A_1\gamma_1, A_2\gamma_2, \dots, A_N\gamma_N}(j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_N) \equiv E\left\{\exp\left[j\sum_{n=1}^N \omega'_n \gamma_n\right]\right\} = \det(\mathbf{I} - j\Omega'\mathbf{H})^{-m}, \tag{81}$$

где

$$\omega'_1 = A_1\omega_1, \omega'_2 = A_2\omega_2, \dots, \omega'_N = A_N\omega_N \tag{82}$$

и

$$\Omega' = \text{diag}\{\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_N\} = \Omega\mathbf{A}, \tag{83}$$

матрица \mathbf{A} определяется (31) и (67). Пусть

$$j\omega_1 = j\omega_2 = \dots = j\omega_N = -s. \quad (84)$$

Заменяя $j\Omega$ в (81) на $-sI$, производящая функция моментов параметра принятия решений Δ , зависящая от $\{b_k(0)\}$, может быть представлена в следующем виде:

$$\Phi_{\Delta}(s|\{b_k(0)\}) = \det(\mathbf{I} + s\mathbf{A}\mathbf{H})^{-m}. \quad (85)$$

Полагаем, что $\{\lambda_n\}$ являются собственными числами матрицы $\mathbf{A}\mathbf{H}$, тогда $\{1 + s\lambda_n\}$ являются собственными числами матрицы $\mathbf{I} + s\mathbf{A}\mathbf{H}$. Таким образом, мы получаем (66).

Приложение 3: Вычисление вычетов

Остаток производящей функции моментов $\Phi_{\Delta}(s|\{b_k(0)\})/s$ в полюсе порядка m , $s = -\lambda_n^{-1}$, может быть определен следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Остаток}[\Phi_{\Delta}(s|\{b_k(0)\})/s]_{s=-\lambda_n^{-1}} &= \frac{1}{(m-1)!} \left\{ \frac{d^{m-1}}{ds^{m-1}} \left[\frac{\Phi_{\Delta}(s|\{b_k(0)\})}{s} (s + \lambda_n^{-1})^m \right] \right\}_{s=-\lambda_n^{-1}} \\ &= \frac{1}{(m-1)!} \sum_{n'=1}^N \sum_{r=1}^m \left[\frac{d^{m-1} \Lambda_{n'r}(s)}{ds^{m-1}} \right]_{s=-\lambda_n^{-1}}, \end{aligned} \quad (86)$$

где, используя (69), получаем

$$\Lambda_{n'r}(s) \equiv \frac{a_{n'r}(s + \lambda_n^{-1})^m}{s(1 + s\lambda_{n'})^r}. \quad (87)$$

Заметим, что нам необходимо определить только члены с $n'=n$

$$\sum_{r=1}^m \Lambda_{nr}(s) = \sum_{r=1}^m a_{nr} \lambda_n^{-r} s^{-1} (s + \lambda_n^{-1})^{m-r} \quad (88)$$

в (86), т.к. другие члены стремятся к нулю при подстановке $s = -\lambda_n^{-1}$ в (86). Следовательно,

$$\text{Остаток}[\Phi_{\Delta}(s|\{b_k(0)\})/s]_{s=-\lambda_n^{-1}} = \frac{1}{(m-1)!} \sum_{k=0}^{m-1} \binom{m-1}{k} \frac{d^{m-1-k} s^{-1}}{ds^{m-1-k}} \frac{d^k (s + \lambda_n^{-1})^{m-r}}{ds^k}. \quad (89)$$

Легко проверить, что члены с $k > m-r$ в (89) стремятся к нулю. С другой стороны, члены $k < m-r$ с также стремятся к нулю при подстановке $s = -\lambda_n^{-1}$ в (89). Следовательно, необходимо рассмотреть только член с $k = m-r$ для вычисления вычетов. Отсюда получаем, что

$$\left[\frac{d^{m-1} \Lambda_{nr}(s)}{ds^{m-1}} \right]_{s=-\lambda_n^{-1}} = -a_{nr} (m-1)!. \quad (90)$$

Подставляя (90) в (89), получаем (71).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Bingham, J.A. Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come / J.A. Bingham // IEEE Communications Magazine. – 1990. – Vol. 28. – No. 5. – pp. 5–14.
- Yee, N. Multicarrier CDMA in indoor wireless radio networks / N. Yee, J.P. Linnartz, G. Fettweis // IEEE Transactions on Communications. – 1994. – Vol. E77–B. – No. 7. – pp. 900–904.
- Morinaga, N. New concepts and technologies for achieving highly reliable and high-capacity multimedia wireless communications systems / N. Morinaga, M. Nakagawa, R. Kohno // IEEE Communications Magazine. – 1997. – Vol. 35. – No. 1. – pp. 34–40.
- Slimane, S.B. Bandwidth efficiency of MC-CDMA signals / S.B. Slimane // Electronics Letters. – 1999. – Vol. 35. – October 14. – pp. 1797–1798.
- Chang, R.W. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission / R.W. Chang // Bell System Technology Journal. – 1996. – Vol. 45. – No. 12. – pp. 1775–1796.
- Weinstein, S.B. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform / S.B. Weinstein, P.M. Ebert // IEEE Transactions on Communication Technology. – 1971. – Vol. 19. – No. 5. – pp. 628–634.

7. Hara, S. Design and performance of multicarrier CDMA system in frequency-selective Rayleigh fading channels / S. Hara, R. Prasad // *IEEE Transactions on Vehicle Technology*. – 1999. – Vol. 48. – No. 5. – pp. 1584–1595.
8. Hara, S. Overview of multicarrier CDMA / S. Hara, R. Prasad // *IEEE Communication Magazine*. – 1997. – Vol. 35. – No.12. – pp. 126–133.
9. Gui, X. Performance of asynchronous orthogonal multicarrier CDMA system in frequency selective fading channel / X. Gui, T.S.Ng. // *IEEE Transactions on Communications*. – 1999. – Vol. 47. – No. 7. – pp. 1084–1091.
10. Sourour, E.A. Performance of orthogonal multicarrier CDMA in a multipath fading channel / E.A. Sourour, M. Nakagawa // *IEEE Transactions on Communications*. – 1996. – Vol. 44. – No. 3. – pp. 356–367.
11. Kondo, S. Performance of multicarrier DS CDMA systems / S. Kondo, L.B. Milstein // *IEEE Transactions on Communications*. – 1996. – Vol. 44. – No. 2. – pp. 238–246.
12. Vanderdorpe, L. Multitone spread spectrum multiple access communication system in a multipath Rician fading channel / L. Vanderdorpe // *IEEE Transactions on Vehicle Technology*. – 1995. – Vol. 44. – No. 2. – pp. 327–337.
13. Cheng, J. Accurate DS-CDMA bit-error probability calculation in Rayleigh fading / J. Cheng, N.C. Beaulieu // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2002. – Vol. 1. – No. 1. – pp. 3–15.
14. Helstrom, C.W. Calculating error probabilities for inter-symbol and co-channel interference / C.W. Helstrom // *IEEE Transactions on Communications*. – 1986. – Vol. 34. – No. 5. – pp. 430–435.
15. Liu, D. Low-complexity performance evaluation of binary and quaternary DS-SSMA over Rician fading channels via the characteristic function method / D. Liu, C.L. Despins, W.A. Krzymien // *Wireless Personal Communications*. 1998. – Vol. 7. – No. 8. – pp. 257–273.
16. Oh, S.W. Performance evaluation for forward-link cellular DS-CDMA over frequency-selective Nakagami multipath fading channels / S.W. Oh, K.H. Li // *Wireless Personal Communications*. – 2001. – Vol. 18. – No. 9. – pp. 275–287.
17. Smida, B. MC-CDMA performance evaluation over a multipath fading channel using the characteristic function method / B. Smida, C.L. Despins, G.Y. Delisle // *IEEE Transactions on Communications*. – 2001. – Vol. 49. – No. 8. – pp. 1325–1328.
18. Biglieri, E. Computing error probabilities over fading channels: A unified approach / E. Biglieri // *European Transactions on Telecommunications*. – 1998. – Vol. 9. – No. 1–2. – pp. 15–25.
19. Biglieri, E. Simple method for evaluating error probabilities / E. Biglieri // *Electronics Letters*. – 1996. – Vol. 32. – No. 2. – pp. 191–192.
20. Ziemer, R.E. Effects of carrier tracking in RAKE reception of wide-band DSSS in Rician fading / R.E. Ziemer // *IEEE Transaction on Microwave Theory Techniques*. – 1999. – Vol. 47. – No. 6. – pp. 681–686.
21. Ziemer, R.E. Equal-gain combining of multichannel DPSK in Doppler-spread Rician fading / R.E. Ziemer, T.B. Welch // *IEEE Transactions on Vehicle Technology*. – 2000. – Vol. 49. – No. 5. – pp. 1846–1855.
22. Taricco, G. Exact pairwise error probability of space-time codes / G. Taricco, E. Biglieri // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 2002. – Vol. 48. – No. 2. – pp. 510–513.
23. Nakagami, M. The m-distribution – A general formula of intensity distribution of rapid fading. In *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*. W.C. Hoffman / M. Nakagami. – New York : Pergamon, 1960. – 540 p.
24. Braun, W.R. A physical mobile radio channel model / W.R. Braun, U. Dersch // *IEEE Transactions on Vehicle Technology*. – 1991. – Vol. 40. – No. 2. – pp. 472–482.
25. Abramowitz, M. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables* / M. Abramowitz, I.A. Stegun. – 4th Edition. – New York : Dover, 1970. – 285 p.
26. Park, J. Performance of MC-CDMA systems in non-independent Rayleigh fading. / J. Park // *IEEE Proceedings of International Conference on Communications*. Vancouver, June 6–10, 1999. – Canada, 1999. – pp. 506–510.
27. Kim, T. Performance of an MC-CDMA system with frequency offsets in correlated fading. / T. Kim // *IEEE Proceedings of International Conference on Communications*. Vancouver, June 16–20, 2000. – Canada, 2000. – pp. 1095–1099.
28. Tuzlukov, V. A new approach to signal detection theory / V. Tuzlukov // *Digital Signal Processing*. – 1998. – Vol. 8. – No. 3. – pp. 166–184.
29. Tuzlukov, V. *Signal Detection Theory* / V. Tuzlukov. – New York: Springer-Verlag, 2001. – 746 p.
30. Tuzlukov, V. *Signal Processing Noise* / V. Tuzlukov. – Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, USA, 2002. – 692 p.
31. Maximov, M. Joint correlation of fluctuating noise at outputs of frequency filters / M. Maximov // *Radio Engineering*. – 1956. – No. 3. – pp. 166–184.
32. Chernyak, Y. Joint correlation of noise voltage at outputs of amplifiers with nonoverlapping responses / Y. Chernyak // *Radio Physics and Electronics*. – 1960. – No. 4. – pp. 551–561.
33. Tuzlukov, V.P. DS-CDMA downlink systems with fading channel employing the generalized / V.P. Tuzlukov // *Digital Signal Processing*. – 2011. – Vol. 21. – No. 6. – pp. 725–733.
34. Tuzlukov, V.P. Signal processing by generalized detector in DS-CDMA wireless communication systems with frequency selective channels / V.P. Tuzlukov // *Circuits, Systems, and Signal Processing*. – 2011. – Vol. 30. – No. 6. – pp. 1197–1230.
35. Shbat, M. Primary signal detection algorithms for spectrum sensing at low SNR over fading channels in cognitive radio / M. Shbat, V.P. Tuzlukov // *Digital Signal Processing*. – 2019. – Vol. 93. – No. 5. – pp. 187–207.
36. Shbat, M. Evaluation of detection performance under employment of the generalized detector in radar sensor systems / M. Shbat, V.P. Tuzlukov // *Radioengineering*. – 2014. – Vol. 23. – No.1. – pp. 50–65.
37. Shbat, M. Definition of adaptive detection threshold under employment of the generalized detector in radar sensor systems / M. Shbat, V.P. Tuzlukov // *IET Signal Processing*. – 2014. – Vol. 8. – No. 6. – pp. 622–632.
38. Shbat, M. SNR wall effect alleviation by generalized detector employment in cognitive radio networks / M. Shbat, V.P. Tuzlukov // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15. – No. 7. – pp. 16105–16135.
39. Тузлуков, В. Сравнительный анализ отношения мощности несущей сигнала к уровню помехи плюс шум при оптимальном уплотнении каналов и суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала / В. Тузлуков // *Доклады БГУИР*. – 2017. – Vol. 103. – No. 1. – С. 26–33.
40. Tuzlukov, V.P. *Advances in Communications and Media Research. Chapter 6: Detection of Spatially Distributed Signals by Generalized Receiver Using Radar Sensor Array in Wireless Communication* / V.P. Tuzlukov. – New York : NOVA Science Publishers, Inc., USA, 2015. – pp. 143–173.
41. Тузлуков, В. Линейное суммирование сигналов равной мощности, передаваемых посредством обобщенного канала связи с замираниями // *Известия НАН Беларуси. Серия: физико-технических наук*. – 2017. – No.4. – С. 74–87.
42. Тузлуков, В. Пространственно-временное разнесение сигналов в системах с широкополосным множественным доступом и кодовым разделением каналов / В. Тузлуков // *Известия НАН Беларуси. Серия: физико-технических наук*. – 2019. – № 3. – С. 332–346.
43. Tuzlukov, V.P. Quaternary DS-SSMA Communications Employing Generalized Detector over Rayleigh Fading Channels / V.P. Tuzlukov // *WSEAS Transactions on Signal Processing*. – 2020. – Vol.16. – Paper 6. – pp. 43–58. DOI: 10.37394/232014.2020.16.6

44. Tuzlukov, V.P. Signal Processing by Generalized Receiver Using DS-CDMA with STBC Technology in Multidimensional Systems over Fading Channels: Capacity and Error Probability / V.P. Tuzlukov // WSEAS Transactions on Communications. – 2020. – Vol. 19. – Paper 15. – pp. 124–141. DOI:10.37394/23204.2020.19.15
45. Lukacs, E. Characteristic Functions / E. Lukacs. – 2nd Edition. – London, U.K.: Griffin, 1970. – 380 p.
46. Shi, Q. Exact bit error rate calculations for synchronous MC-CDMA over a Rayleigh fading channel / Q. Shi, M. Latvaaho // IEEE Transactions on Communications Letters. – 2002. – Vol. 6. – No. 7. – pp. 276–278.
47. Krylov, V.I. Approximate Calculation of Integrals / V.I. Krylov. – New York: Macmillan, 1962. – 420 p.
48. Tan, C.C. Infinite series representations of the bivariate Rayleigh and Nakagami-m distributions / C.C. Tan, N.C. Beaulieu // IEEE Transactions on Communications. – 1997. – Vol. 45. – No. 10. – pp. 1159–1161.
49. Jakes, Jr. Microwave Mobile Communications. – New York: Wiley, 1974.
50. Lombardo, P. MRC performance for binary signals in Nakagami fading with general branch correlation / P. Lombardo, G. Fedele, M.M. Rao // IEEE Transactions on Communications. – 1999. – Vol. 40. – No. 2. – pp. 472–482.
51. Zhang, Q.T. Maximal-ratio combining over Nakagami fading with an arbitrary branch covariance matrix / Q.T. Zhang // IEEE Transactions on Vehicle Technology. – 1991. – Vol. 40. – No. 2. – pp. 472–482.
52. Zhang, Q.T. Exact analysis of postdetection combining for DPSK and NFSK systems over arbitrary correlated Nakagami Channels / Q.T. Zhang // IEEE Transactions on Communications. – 1998. – Vol. 46. – No. 11. – pp. 1459–1467.
53. Popovic, B.M. Efficient despanders for multicode CDMA systems. in Proceedings of International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC). – October 12–16, 1997. San Diego, California, USA. – pp. 516–520.
54. Gradshteyn, I.S. Tables of Integrals, Series, and Products / I.S. Gradshteyn, I.M. Ryzhik. – 7th Edition. Amsterdam, Boston, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: Academic Press, 2007. – 350 p.
55. Proakis, J.G. Digital Communications / J.G. Proakis, M. Saleh. – New York: McGraw-Hill, 2015. – 751 p.
56. Annamalai, A. Equal-gain diversity receiver performance in wireless channels / A. Annamalai, C. Tellambura, V.K. Bhargava // IEEE Transactions on Communications. – 2000. – Vol. 48. – No. 10. – pp. 1732–1745.

*Статья поступила в редакцию
16.11.2020*

ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА ПРИ РАБОТЕ ДИСПЕТЧЕРА ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ ПОЛЕТОВ

Захар Владимирович Машарский – кандидат психологических наук, начальник отдела стратегических исследований в области гражданской авиации учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
aviabsaanir@gmail.com

Дмитрий Леонидович Умнов – старший Полетный диспетчер в авиакомпании ООО «Северный Ветер», Российская Федерация
Dmitriyumnov@yandex.ru

Аннотация: в любой человеческой деятельности ошибка человека имеет определенные последствия. В гражданской авиации попытки учитывать человеческий фактор традиционно относились к работе летного экипажа, а также в ряде случаев – к работе диспетчеров управления воздушным движением. Реже рассматриваются те аспекты человеческого фактора, которые могли бы влиять на персонал, осуществляющий техническое обслуживание воздушного судна и подготовку к полетам. Введение понятия «человеческий фактор» и раскрытие его содержания, прежде всего, связано с успехами, достигнутыми в инженерной и социальной психологии. Все это происходит благодаря исследованиям характера взаимодействия оператора с окружающей средой, техническими устройствами, и с другими специалистами по совместной деятельности.

Ключевые слова: диспетчер по обслуживанию полетов, человеческий фактор, план полетов, командир воздушного судна, автоматизация.

Abstract: In any human activity, a human error has certain consequences. In civil aviation, attempts to take into account the human factor have traditionally been attributed to the work of the flight crew, as well as in some cases to the work of air traffic controllers. Less frequently, aspects of the human factor that could affect personnel performing aircraft maintenance and flight preparation are considered.

The introduction of the concept of "human factor" and the disclosure of its content is primarily related to the success achieved in engineering and social psychology. All this is due to research on the nature of the operator's interaction with the environment, technical devices, and other specialists in joint activities.

Keywords: Flight service dispatcher, human factor, flight plan, aircraft commander, automation.

В 1955 году Аэронавигационная комиссия ИКАО отметила, что от авиационных эксплуатантов поступили запросы, непосредственно связанные с осуществлением эксплуатационного контроля. В то время отсутствовало единообразие разработанных принципов, относящихся к осуществлению такого контроля со стороны эксплуатантов, хотя в некоторых регионах мира такие принципы и практика применялись в течение длительного времени. В связи с этим был опу-

бликован циркуляр, в котором разъяснялась концепция проведения совместных консультаций и разделения ответственности между командиром корабля и наземным персоналом, степень такого сотрудничества, зависящего от многих факторов, например, от объема осуществляемых полетов, предоставляемых средств и системы осуществления полетов, созданной эксплуатантом. Эта концепция варьировалась от простого диспетчерского обслуживания, когда основная функция наземно-

го персонала заключалась в оказании помощи командиру корабля в предполетном планировании, в оказании помощи командиру корабля на маршруте и после полета, когда многие функции по производству полетов разделялись с наземным персоналом. Основное внимание уделялось ответственности за получение и предоставление информации, представляющей интерес для воздушного судна в полете [1].

В течение последующих лет многие государства пришли к

выводу о том, что для обеспечения эффективного и безопасного осуществления воздушного движения необходимо осуществлять контроль за производством полетов. Поэтому в целях обеспечения такого контроля и для осуществления тесного взаимодействия между воздушным судном в полете и наземным обслуживанием, а также между членами экипажа и наземным персоналом эксплуатанта были введены должности «сотрудник по обеспечению полетов», также известный как «диспетчер по обеспечению полетов» или «авиационный диспетчер» [2].

Полетное диспетчерское обслуживание экипажей воздушных судов заключается в подготовке и предоставлении экипажу аэронавигационной и другой информации, включая ее анализ и выводы, необходимой для предполетной подготовки, принятия решения на вылет и выполнения полета [3].

Полетное диспетчерское обслуживание экипажей воздушных судов выполняется диспетчером по обеспечению полетов.

Диспетчер по обеспечению полетов выполняет следующие обязанности:

- оказывает помощь командиру воздушного судна в подготовке к полету и обеспечивает соответствующей информацией, включая диспетчерское решение на выполнение полета;
- оказывает помощь командиру воздушного судна в подготовке рабочего плана полета и плана полета для ОВД, подписывает и представляет план полета соответствующему органу ОВД;
- с помощью соответствующих средств обеспечивает команду воздушного судна в полете информацией, которая может быть необходимой для безопасного выполнения полета;
- в случае аварийной обстановки приступает к выполнению процедур, предусмотренных руководством по производству полетов эксплуатанта.

Одной из главных функций диспетчера по обеспечению полетов является планирование полетов.

Цель надлежащего планирования полетов состоит в подготовке плана полета, который предусматривает минимальное время полета в сочетании с минимальным расходом топлива по наилучшим возможным маршрутам с избеганием плохих метеорологических

условий и с соблюдением всех процедур обеспечения безопасности, а также требований воздушного права и организации воздушного движения [2].

Для выполнения функций, связанных с планированием полетов, диспетчер по обеспечению полетов должен использовать все полученные знания и опыт, приобретенные на основе других частей данного курса, включая аэронавигацию, характеристики воздушных судов, метеорологию, авиационное законодательство, массу, центровку и организацию воздушного движения (обслуживание). Также важным элементом является контроль за полетами.

Хотя диспетчер по обеспечению полетов будет проводить большую часть своего времени на составление планов, которые будут безопасными, юридически обоснованными и экономически целесообразными, его более важная задача будет заключаться в контроле за полетами. Диспетчер по обеспечению полетов является единственным лицом на земле, обладающим знаниями и ресурсами, предназначенными для предоставления необходимой информации для безопасного завершения полета [4].

В обязанности диспетчера по обеспечению полетов входит: искать проблемы, тщательно изучать информацию, находить решения и возможности передавать всю эту информацию командиру воздушного судна как при выполнении обычного, так и нерегулярного полета. Диспетчер по обеспечению полетов всегда знает, где находится воздушное судно и сколько топлива остается, ему известны условия на маршруте и на аэродроме, и он готов вмешаться, когда становится очевидным, что полет нельзя продолжать в соответствии с условиями его первоначальной выдачи разрешения. Для того чтобы диспетчер по обеспечению полетов мог соблюдать требования, необходимо, чтобы командир воздушного судна консультировался с ним в любое время, когда служба воздушного движения предлагает или пытается внести значительные изменения в маршрут полета.

Основной целью данной работы является определение особенности учета человеческого фактора (ЧФ) при работе диспетчера по обслуживанию полетов. В целях обеспечения общей платформы учета человеческого фактора

ИКАО определила 3 концепции, следование которым должно повысить надежность, безаварийности и эффективность деятельности диспетчера по обеспечению полетов. Указанные концепции ЧФ включают: ориентированную на человека автоматизацию; ситуативную осведомленность и контроль ошибок [5].

Ориентированная на человека автоматизация

В качестве основы для обеспечения удобства в использовании, эксплуатационной пригодности и приемлемости конструкции для Диспетчера по обеспечению полетов целесообразно называть цели учета аспектов ЧФ при разработке новых автоматизированных средств и их эксплуатации. Ниже приводится перечень целей автоматизации, которые следует учитывать при определении требований и в процессе проектирования:

- *транспарентность базовых программных операций, с тем чтобы диспетчеру по обеспечению полетов не пришлось вникать в процесс работы ЭВМ, но, чтобы он распознавал ее стабильное, надежное функционирование;*
- *толерантность к ошибкам и возможность возврата в исходное положение;*
- *соответствие ожиданиям диспетчеров по обеспечению полетов;*
- *совместимость с возможностями и ограничениями человека;*
- *простота перехода на более низкие уровни автоматизации и возврата к более высоким уровням автоматизации;*
- *простота включения в процесс разрешения нестандартных и аварийных ситуаций;*
- *простота в использовании и освоении системы.*

Для каждой конкретной конструкции эти цели необходимо дополнительно уточнить с учетом индивидуальных функций системы и эксплуатационных задач.

Наиболее важным аспектом ЧФ в контексте интерфейса «человек-машина» является способность человека-оператора постоянно поддерживать ситуативную осведомленность и следить за функционированием автоматических систем (АС). Особенно важно поддержание мысленной картины всего полета воздушного судна (ВС) от взлета до посадки [6].

Ситуативная осведомленность

Ситуативную осведомленность можно рассматривать с учетом трех уровней процесса познания [7]:

- *восприятие ситуации (восприятие элементов окружающей обстановки, процесса воздушного движения, в определенных временных и пространственных рамках);*
- *определение важности ситуации (понимание значения, ответственности, опасностей, приоритизация внимания и др.);*
- *прогнозирование развития ситуации в ближайшем будущем в целях подготовки эффективных планов разрешения ситуации, предотвращения конфликтов, ошибок, нежелательных состояний и т. д.*

Для поддержания действительной мысленной картины от взлета до посадки диспетчер по обеспечению полетов должен постоянно интегрировать следующий ряд факторов-элементов ситуативной осведомленности: личные факторы; метеоусловия (текущая погода и прогноз погоды, включая местные явления); инфраструктура аэродрома, аэропорта: предоставляемые экипажам ВС услуги; индивидуальные различия; эксплуатанты и пилоты; окружающая среда; наличие, возможности и ограничения навигационных средств; технические характеристики ВС различных типов; характеристики, параметры полетов ВС; действующие эксплуатационные процедуры, ограничения и приемлемая практика; оборудование, характеристики оборудования организации воздушного движения.

Физическое и психологическое состояние человека-оператора во многом предопределяет его взаимодействие с другими лицами, субъектами и компонентами человеко-машинных систем, детерминирует его надежность и, соответственно, влияет на качество выполнения им задач. Применительно к диспетчеру по обеспечению полетов факторы физического комфорта, влияющие на индивидуальные характеристики работоспособности, включают температуру окружающей среды, освещение, влажность, уровень шума на рабочем месте. Информация о наличии одного из этих факторов или возможности его появления в процессе работы способствует

формированию ситуативной осведомленности диспетчера [8].

Другим важным личным фактором является знание своего собственного уровня стрессового состояния. Каждый диспетчер по обеспечению полетов должен уметь контролировать, управлять своим состоянием и погашать, чувствовать, когда стресс (обычно вызванный внешними факторами) подорвал его работоспособность; должен понимать, оценивать опасность дестабилизации собственной надежности и принимать меры по профилактике своей ошибочности в зависимости от сложности обстановки [9].

Важным личным фактором является также утомление (*нервное, эмоциональное, умственное, физическое, переутомление*).

Контроль ошибок

Ошибок человека невозможно полностью избежать путем совершенствования конструкции АС, повышения дисциплинированности и ответственности операторов, повышения уровня взыскания за ошибки.

Ошибка представляет собой нормальный компонент характеристик работоспособности человека. Поэтому данный факт должен учитываться на всех этапах проектирования, внедрения и эксплуатации сложных АС, где ожидаемым результатом является безопасность.

Для контроля ошибок диспетчера по обеспечению полетов применяются два различных подхода. Первый подход заключается в минимизации вероятности ошибок путем обеспечения высокой квалификации персонала и конструирования всех используемых органов управления с учетом характеристик работоспособности человека. Сюда же относятся подготовка надлежащих контрольных перечней, процедур, руководств, карт, схем и стандартных эксплуатационных процедур, а также снижение уровней шумов и вибраций, экстремальных температур, других вызывающих стресс условий среды и т. д.

Второй подход заключается в смягчении последствий, минимизации негативного результата любых ошибок посредством перекрестного мониторинга и путем улучшения взаимодействия диспетчера по обеспечению полетов и контроля, со стороны руководства. Свой вклад в устранение ошибок и их послед-

ствий также вносят конструкции оборудования, обеспечивающие обратимость ошибок, и оборудование, которое отслеживает или дополняет и поддерживает эффективность деятельности диспетчера.

Под надежностью профессиональной деятельности принято понимать безошибочное выполнение человеком возложенных на него профессиональных обязанностей (функций) в течение требуемого времени и при заданных условиях деятельности. Безошибочное и своевременное выполнения действий и деятельности в целом авиадиспетчера может быть достигнуто в первую очередь при условии надежного функционирования различных подсистем его организма и психики.

Для профессий, связанных с нештатными ситуациями, надежность — это способность человека сохранить заданные качества деятельности при усложнении условий труда [1].

Надежность работы диспетчера по обеспечению полетов находится в прямой зависимости от качества его профессиональной подготовки, опыта, натренированности, индивидуальных характеристик, качеств, особенностей, в том числе свойств нервной системы и личностных факторов, а также от условий среды его труда и жизнедеятельности в целом, качества нормативно-правового обеспечения, предписанных процедур деятельности.

В свою очередь профессионально-психологическая надежность диспетчера по обеспечению полетов формируется следующими условиями: мотивацией и профотбором молодежи для обучения профессии; качеством образования (как общеобразовательной школьной подготовкой, так и главным образом — специальной профессиональной подготовкой в высших или средних специальных учебных заведениях); постоянным поддержанием профессиональной подготовки, в том числе периодическим систематическим повышением квалификации; опытом деятельности; эффективной мотивацией авиаперсонала к постоянному самосовершенствованию, стимулированием надежного планирования полетов качественным метеорологическим, радиосветотехническим, связным и другими видами обеспечения, поддержанием высоких работоспособности и морально-психологического состояния.

Очень важное место среди аргументов, детерминирующих профессионально-психологическую надежность диспетчер по обеспечению полетов занимают работоспособность и морально-психологическое состояние, которые в свою очередь зависят от следующих факторов-условий среды и личностных характеристик, особенностей, качеств диспетчеров [10]:

а) физические факторы (характеризующие физические возможности диспетчера по обеспечению полетов выполнять требуемые задачи):

- *рост, длина рук и ног (обеспечивающие способность дотянуться до всего оборудования на рабочем месте и др.);*
- *координация движений рук и ног;*
- *острота зрения, способность физически видеть развитие событий;*
- *глазомер линейный, угловой, объёмный, динамический;*
- *выносливость, координированность, быстрота оценки ситуации, принятия и реализации решения;*
- *острота слуха, способность правильно воспринимать разнотканальную речевую информацию в шумной среде;*
- *слуховая дифференциальная чувствительность (способность различать тембр, длительность, высоту, силу звука, ритм, фоновые или разнообразные шумы);*

б) физиологические факторы включают в себя факторы, которые влияют на внутренние физические процессы в человеке и могут оказать неблагоприятное влияние на его физические и когнитивные характеристики, подорвать работоспособность, снизить надежность деятельности:

- *общее состояние здоровья и физическое состояние;*
- *болезнь или заболевание;*
- *возрастные изменения в организме;*
- *зависимость от табака, наркотиков или алкоголя;*
- *длительность активной работоспособности, устойчивость к рабочим перегрузкам, реакция на утомление и беременность, на накопление утомления и переутомление;*

в) психологические факторы (факторы, влияющие на психологическую готовность и способность диспетчера по обеспечению

полетов поддерживать высокую работоспособность и надежность деятельности в любых условиях, ситуациях среды, справиться со всеми обстоятельствами, опасными факторами, угрозами, нежелательными состояниями, которые могут возникнуть при выполнении возложенных задач):

- *адекватность профессионально-психологической подготовки, знаний и опыта, а также рабочей нагрузки;*
- *бдительность: противовес отвлекающим моментам и скуке;*
- *факторы давления на рабочем месте (со стороны начальников или коллег);*
- *мотивация и состояние психики (под возможным влиянием домашних или других внешних проблем);*
- *эмоциональная устойчивость, стрессоустойчивость, психологическая надежность деятельности в нестандартных, форс-мажорных ситуациях;*
- *логическое мышление;*
- *характер привычек (например, сознательное упрощение операций);*

г) психосоциальные факторы (факторы, особенности, характеристики социальной системы, среды (в смене, коллективе, в семье, в обществе и др.), действующие как в рабочей, так и в нерабочей среде, которые могут вызывать дополнительную психическую нагрузку и влиять на морально-психологическое состояние, работоспособность и надежность деятельности диспетчеров):

- *социальная атмосфера в коллективе (комфорт или дискомфорт);*
- *взаимоотношения диспетчер по обеспечению полетов с руководящим составом и межличностные отношения (принципиальные, здоровые или конфликтные, напряженные);*
- *уровень притязаний, удовлетворенности профессией, самооценки;*
- *наличие или отсутствие чувства местного патриотизма, гордости за принадлежность к профессии, за свой коллектив; статус в семье, среди родных;*
- *законность, принципиальность и справедливость руководства, в т.ч. в кадровой политике, в применении дисциплинарной практики, системы поощрений;*
- *наличие психотравмирующих опасных факторов, угроз (болезни родных, близких, пробле-*

мы у детей в школе, отсутствие благоприятного жилья, личные финансовые проблемы, домашние неурядицы, трения, конфликты, социально-политическая и экономическая нестабильность в обществе, государственстве;

е) коммуникативные факторы:

- *коммуникабельность диспетчера по обеспечению полетов;*
- *наличие (отсутствие) проблем обмена информацией (перегрузка радиосвязи, путаница с позывными, понимание языка и акцент, стандартность фразеологии);*
- *уверенность (неуверенность) диспетчера при выполнении своих функций*
- з) организационные факторы:
- *уровень организации и дисциплины деятельности авиационных организаций;*
- *благоприятность (неудовлетворительность) графиков дежурств;*
- *оптимальность режима труда и отдыха;*
- *организационная (корпоративная) культура безопасности;*
- *сформированное и поддерживаемое нетерпимое или попустительское отношение диспетчера по обеспечению полетов к нарушениям порядка, правил, дисциплины;*
- *уровень применения и эффективность использования методов оптимизации работы в команде;*
- *уровень принципиальности, требовательности, справедливости руководящего состава в отношении к подчиненным диспетчерам, в т.ч. к их ошибкам и нарушениям;*
- *эффективность контроля повседневной деятельности;*
- *взаимоотношения между диспетчерами и руководящим составом;*
- *эффективность работы профсоюзов по защите интересов диспетчеров;*
- *эффективность функционирования системы добровольных сообщений;*
- *надежность и эффективность взаимодействия [4, 7].*

Важнейшая задача руководства авиационных организаций в целях обеспечения профессионально-психологической надежности диспетчеров по обеспечению полетов и надежности их работы состоит в поддержании высокой работоспособности и морально-пси-

хологического состояния диспетчеров по обеспечению полетов. Эта задача достигается путем учета в своей работе вышеприведенных факторов-условий среды и личностных характеристик, особенностей, качеств диспетчеров, созданием наиболее благоприятных вышеприведенных условий-факторов среды, путем активизации человеческого фактора, профилактикой проявления факторов,

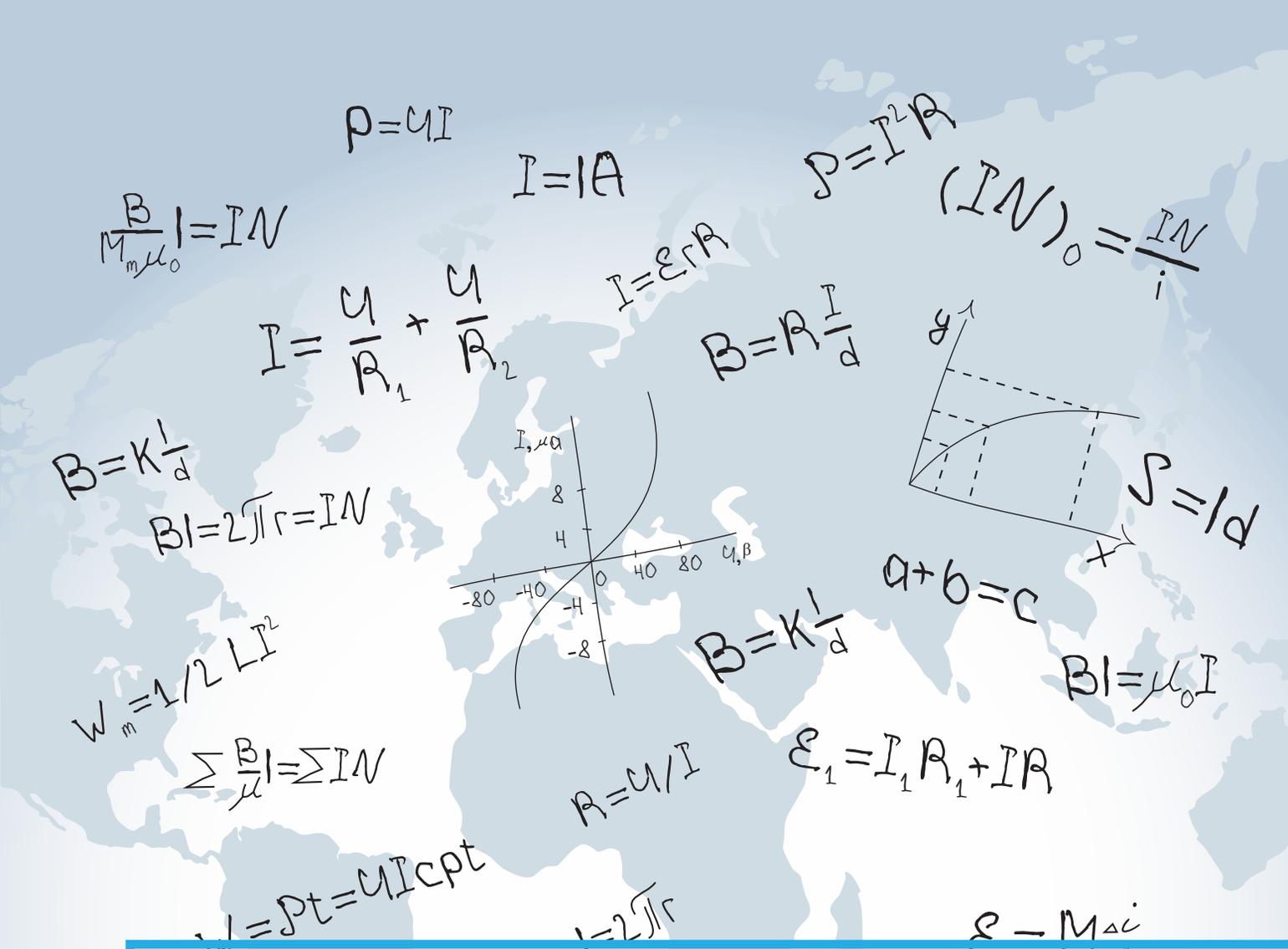
снижающих работоспособность диспетчеров по обеспечению полетов. По результатам работы можно сделать вывод, что основными особенностями учета человеческого фактора при работе диспетчера по обеспечению полетов являются ориентированная на человека автоматизация, ситуативная осведомленность и контроль ошибок. Надежность работы диспетчера по обеспечению полетов находится в

прямой зависимости от качества его профессиональной подготовки, опыта, натренированности, индивидуальных характеристик, качеств, особенностей. Учитывая все эти факторы при работе с диспетчером по обеспечению полетов можно сделать более эффективной его деятельность и повысить уровень авиационной безопасности в авиационной организации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Козлов, В.В. Человеческий фактор: история, теория и практика в авиации / В.В. Козлов. – М. : Полиграф, 2018. – 280 с.
2. Авиационная психология и человеческий фактор: учеб. – метод. пособие / сост. Д.А. Евстигнеев. – Ульяновск : УВАУ ГА, 2005. – 103 с.
3. Doc 7192 / AN 857. Руководство по обучению. Часть D–3: Сотрудник по обеспечению полетов/диспетчер. – Монреаль, 1998.
4. Гандер, Д.В. Авиационная психология: учеб. пособие / Д.В. Гандер. – М. : Воентехиниздат, 2010. – 207 с.
5. Пономаренко В.А. Деятельность летных экипажей и безопасность полетов / В.А. Пономаренко, В.В. Лапа, А.В. Чунлул. – М., 2014. – 202 с.
6. Doc 9683 / AN 950. Руководство по обучению в области человеческого фактора. – Монреаль, 1998.
7. Алякринский, Б.С. Основы авиационной психологии / Б.С. Алякринский. – М. : Воздушный транспорт, 1985. – 315 с.
8. Макаров, Р.Н. Психологические основы методики летного обучения: учебник / Р.Н. Макаров, Н.А. Нидзий, Ж.К. Шишкин. – М. : МАК–ЧАК, 2000. – 534 с.
9. Овчаров, В.Е. Человеческий фактор в авиационных происшествиях / В.Е. Овчаров. – М. : Авиакос, 2005. – 78 с.
10. Степанов, С.М. Анализ возможных ошибок при управлении воздушным движением / С.М. Степанов, А.И. Степнова // Научный вестник УВАУ ГА (И). – 2015. – № 7. – С. 48–51.

*Статья поступила в редакцию
16.11.2020*



ПЕДАГОГИ- ЧЕСКИЕ НАУКИ



ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ — ОРИЕНТИРЫ РАЗВИТИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНО- ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Елена Ивановна Снопкова – кандидат педагогических наук, доцент, ведущий кафедрой педагогики Могилевского государственного университета имени А. А. Кулешова, Республика Беларусь
elenasnopkova@mail.ru

Аннотация: в статье обсуждается связь педагогических инноваций и современных трансформаций педагогической деятельности преподавателя высшей школы. Актуализируется роль педагогической деятельности и методологической культуры педагога в непрерывном развитии профессионально-личностных компетенций будущих специалистов в современном образовательном процессе высшей школы. Обосновывается идея о том, что педагогические инновации выступают «культурными» нормами, подлежащими освоению в процессе развития педагогической деятельности и повышению педагогической квалификации. Педагогические инновации рассматриваются фактором усложнения педагогической деятельности и приобретением новых профессиональных компетенций педагога.

Ключевые слова: инновационная педагогическая деятельность, методологическая культура педагога, педагогическая инновация, перевернутое обучение, технологии обучения, «цифровизация» образования.

Abstract: The article discusses the relationship between pedagogical innovations and modern transformations of the pedagogical activity of a higher school teacher. The role of pedagogical activity and methodological culture of a teacher in the continuous development of professional and personal competencies of future specialists in the modern educational process of higher education is actualized. The idea is substantiated that pedagogical innovations act as "cultural" norms to be mastered in the process of developing pedagogical activity and improving pedagogical qualifications. Pedagogical innovations are considered as a factor of complication of pedagogical activity and the acquisition of new professional competencies of a teacher.

Keywords: Innovative pedagogical activity, methodological culture of a teacher, pedagogical innovation, inverted learning, teaching technologies, "digitalization" of education.

В настоящее время развитие инновационной педагогической деятельности выступает стратегическим направлением образовательной политики. Педагогическая инновация — это «целостный проблемно-ориентированный процесс прогрессивных сопряженных изменений нормативов педагогической деятельности и образовательной среды, приводя-

щий к повышению эффективности педагогической деятельности; изменения в содержании и технологии обучения и воспитания для повышения эффективности и качества образования, улучшения условий педагогического труда и учебной деятельности учащихся, оптимизации и интенсификации педагогического процесса» [1]. Педагогические инновации можно

определить, как инновации педагогической деятельности, которые изменяют привычные содержание и технологии обучения. Они имеют системный характер, так как влияют на разные компоненты педагогической системы. Внедрение педагогических инноваций призвано сделать процесс обучения более эффективным, привести к устойчивым положительным эффектам

и изменениям образовательных результатов, процессов, педагогических средств, среды обучения и т.д.

Педагогические инновации «напрямую связаны с ориентацией на запрос извне, на изменения, происходящие вне системы и стимулирующие ее целиком или составляющие ее институты к модернизации» [2]. Важнейшими факторами внедрения педагогических инноваций и трансформации деятельности преподавателя высшей школы выступает смена поколений, а также процессы «цифровизации» социально-экономической жизни и образования. Современный студент значительно отличается от студентов прошлых поколений. Согласно теории поколений, разработанной У. Штраусом и Н. Хоувом, современные студенты относятся к поколению Z. Данный термин употребляется для характеристики поколения людей, родившихся с середины 90-х годов XX века. Это поколение развивается в условиях обилия информации, неограниченного присутствия в социальных сетях и потребности постоянного доступа к интернет-ресурсам [3]. Поколение Z имеет свои образовательные потребности и формулирует новые образовательные запросы, а также предъявляет свои требования к образовательному процессу. Это приводит к изменению традиционных дидактических моделей с целью развития познавательных интересов студентов и их мотивации на высокие академические результаты.

Современная социокультурная ситуация возможностей глобального информационного общества находит отражение в динамике подходов и принципов организации университетского образования в направлении активного продвижения «цифровизации» процесса обучения. «Цифровизация» образования выступает механизмом, условием и ресурсом повышения эффективности получения знаний и развития актуальных компетенций студентов. Внедрение современных информационно-коммуникационных технологий позволяет осуществлять адресное целеполагание, конструировать образовательную среду как социокультурное пространство опережающего развития и саморазвития личности будуще-

го специалиста, реализовать идею индивидуальных образовательных траекторий профессиональной подготовки. ИКТ способны обеспечить самостоятельную познавательную деятельность студентов разнообразными ресурсами и электронным образовательным контентом, гарантировать развитие не только углубленных профессиональных, но и социально-личностных, а также академических компетенций будущего специалиста. Достижения в области электронного обучения и разработки электронных образовательных ресурсов выступают базой для дальнейшей трансформации высшего образования в сторону «смарт-процессов» и «смарт-ресурсов». Современная дистанционная поддержка образовательной практики создает предпосылки и обеспечивает возможностями для менторского сопровождения профессиональной подготовки, привлечения удаленных экспертов, сетевого взаимодействия, что соответствует современным подходам smart-обучения.

Коммуникативно-сетевые механизмы обеспечивают ситуацию развития, в которой будущие специалисты с помощью педагогов-менторов проблематизируют свой профессиональный опыт, рефлексируют затруднения при выполнении практико-ориентированных кейсов, корректируют продукты своей учебной работы. Такие механизмы, подкрепленные рефлексивно-деятельностным трансфером компетенций и продуктов, созданных в процессе изучения учебных дисциплин, обеспечивают качество высшего образования и профессионализацию личности будущего специалиста. Использование сетевых сообществ в профессиональном образовании рассматривается актуальной педагогической инновацией XXI века [4]. Создание сетевых сообществ в профессиональном образовании обеспечивает: постоянный обмен данными, информацией, знаниями, продуктами учебной деятельности; интеграцию вузов и профессиональных структур в наращивании электронного образовательного контента, доступного всем участникам взаимодействия; формирование экспертных сообществ; использование Web 2.0 сервисов в процессе подготовки будущих

специалистов с целью формирования открытых информационно-образовательных ресурсов и др.

Выделяются два направления внедрения инноваций в систему высшего образования: макроуровень связан с реализацией инноваций в сфере менеджмента образовательного процесса на уровне учреждения высшего образования или его структурного подразделения; микроуровень охватывает инновации в педагогической практике. Внедрение педагогических инноваций микроуровня тесным образом связано с трансформациями педагогической деятельности преподавателя высшей школы под влиянием современных вызовов системе высшего образования. Высокое качество высшего образования может быть достигнуто, если педагог ясно осознает значение своей педагогической деятельности, трансформируя ее в соответствии с теми изменениями, которые происходят в отечественном и мировом образовательном пространстве, а также понимает важность организации самостоятельной познавательной деятельности и способен управлять самоизменениями личности студента – будущего профессионала в процессе обучения.

Современные международные документы в области качества образования и образовательные стандарты также обозначают значимость педагогической деятельности. Например, в материалах Европейской ассоциации обеспечения качества высшего образования подчеркивается, что преподаватели – это самый важный образовательный ресурс, доступный большинству учащихся, поэтому очень важно чтобы те, кто преподают, обладали необходимыми навыками и опытом эффективного преподавания в различных условиях обучения, а также имели доступ к отзывам о своей собственной производительности [5].

Таким образом, можно констатировать, что ключевая роль в принятии инновационной идеи и ее реализации в педагогической практике принадлежит ее субъектам – преподавателям высшей школы. От преподавателя требуется готовность и способность к реализации педагогических инноваций, высокий уровень развития инноваци-

онной компетентности в составе педагогической деятельности. В научной литературе в последнее двадцатилетие появился термин «инноватор в образовании». Например, Д.О. Королева и Т.Е. Хавенсон трактуют его следующим образом: «актор, генерирующий и продвигающий собственные идеи или принимающий нововведения, открытый новому опыту, готовый идти на риск, инициативный, обладающий воображением и креативностью» [2, с. 187]. Вышеуказанное определение центрируется на перечислении личностных качеств и ценностей, которыми обладают преподаватели, внедряющие педагогические инновации. Результаты исследования Д.О. Королевой и Т.Е. Хавенсон свидетельствуют, что для инноваторов в области образования наиболее значимы ценности самостоятельности, универсализма и благожелательности [2].

С нашей точки зрения в контексте проблемы педагогических инноваций важную роль играет методологическая культура педагога, выступающая внутренним механизмом развития инновационной педагогической деятельности [6]. Аксиологический компонент методологической культуры включает ценности критериально-организованной деятельности, например, потребность в культурном преобразовании деятельности; осознание «культурных норм» и требований деятельности, восприятие норм педагогической деятельности в качестве важнейших ценностей, способность декларировать ценностные основания педагогической деятельности. В этом контексте педагогические инновации выступают новыми «культурными» нормами деятельности преподавателя вуза, которые осваиваются и транслируются благодаря возможностям непрерывно развивающейся педагогической деятельности. Методологическая культура как педагогический феномен рассматривается в единстве культуры педагогического мышления, деятельности и рефлексии современного преподавателя высшей школы. Разработанный нами компетентный профиль методологической культуры педагога включает пять кластеров компетенций в составе пяти позиций педагогической деятельности: диагностико-исследовательской,

проектно-программной, конструктивно-технической, оргуправленческой и экспертной [7]. Компетентный профиль выступает средством совершенствования педагогической деятельности, служит ориентиром системного внедрения педагогических инноваций в процессы диагностики, проектирования, конструирования, организации, руководства, управления и экспертизы внутри системы педагогической деятельности, является инструментом описания эффективности освоения и реализации конкретного типа педагогической инновации, а также авторизации и распространения современных инновационных практик.

Важное значение для понимания связи педагогических инноваций и системного изменения педагогической деятельности имеет исследование И.И. Цыркуна в области инновационной подготовки специалистов гуманитарной сферы. Ориентируясь на результаты идеальной инновационной деятельности, автором был сделан вывод о том, что активность «инноватора» реализуется посредством сменяющихся и дополняющих друг друга позиций инновационного цикла: исследователь, проблематизатор, проектировщик, конструктор, программист, управленец, экспериментатор, методолог, писатель [8].

Представим небольшой обзор педагогических инноваций, востребованных в образовательной практике высшей школы, которые приводят к современным трансформациям педагогической деятельности. В качестве успешно применяемой в учреждениях высшего образования дидактической инновации выступает смешанное обучение (Blended learning), объединяющее аудиторное и онлайн обучение. Технология смешанного обучения может быть интегрирована во множество образовательных моделей и служит средством для обеспечения инновационного обучения. Для технической поддержки смешанного обучения достаточно распространенной в вузах Республики Беларусь является система MOODLE. Разработка дидактических моделей смешанного обучения на базе системы MOODLE соответствует приоритетным направлениям информатизации системы образования и потреб-

ностям учреждений образования. Модульная объектно ориентированная динамическая обучающая среда MOODLE является наиболее востребованной, так как распространяется и обновляется бесплатно, а также обладает большими потенциальными возможностями для создания разнообразных электронных образовательных ресурсов, доступна любому преподавателю-разработчику учебного курса.

Образовательная платформа MOODLE гарантирует соорганизацию трех составляющих электронного обучения: инфраструктура, электронный образовательный контент и коммуникация, а также использование возможности Smart-образования: Self-Directed (самоуправляемое, самонаправляемое и самоконтролируемое); M – Motivatat (мотивированное); A – Adaptive (адаптивное, гибкое); R – Resource-enriched (обогащенное различными вариативными ресурсами); T – Technological (технологичное) [9]. Электронные учебные курсы выступают важнейшим инструментом систематизации, расширения и закрепления системы знаний студентов и формирования углубленных профессиональных компетенций, развития и поддержания устойчивого интереса к научно-исследовательской деятельности, формирования ценностей научного поиска, стремления к истине и саморазвития, формирования системы научно-исследовательских компетенций, позволяющих решать конкретные учебные и научно-практические задачи и др.

Формой смешанного обучения выступает перевернутое обучение (Flipped learning) [10], приобретающее все большую популярность в условиях снижения аудиторной нагрузки. Такая модель обучения предусматривает первоначальное самостоятельное знакомство студентов с новым учебным материалом (видеокурс, видеолекция, тексты установочных докладов, лекций, видеопрезентации учебного материала и др.), выполнение заданий для осмысления учебной проблемы, в том числе подготовка конспекта с возможностью его публикации в образовательной среде, и ее обсуждение на практическом занятии. Технология перевернутого обучения создает дополнительные возможности согласо-

ния доаудиторного и аудиторного форматов с целью реального формирования системы соответствующих компетенций и повышения качества высшего образования. К достоинствам перевернутого обучения относятся независимость от месторасположения; самостоятельность в планировании и осуществлении; бесплатность; контроль информации; управление содержанием обучения; гибкая образовательная среда и реализация идей опережающего обучения; персонализация обучения и др. [11, 12].

Интерактивные стратегии и технологии обучения также выступают в качестве важной дидактической инновации, трансформирующей педагогическую деятельность преподавателя высшей школы. Методы активного обучения (МАО), включающиеся в их структуру, позволяют решать задачи профессионального обучения, личностного самоопределения, а также задачи, способствующие развитию партнерских взаимоотношений (формирование умений решать профессиональные задачи, ставить цели, программировать результаты деятельности, генерировать новые идеи, развивать навыки коммуникации и объективной самооценки и взаимооценки, развивать рефлексивную активность, повышать степень мотивации, создавать деловую атмосферу и др.) [13]. Методы интерактивного обучения можно классифицировать, вслед за С.С. Кашлевым, на следующие группы: методы создания благоприятной атмосферы, организации коммуникации («прогноз погоды», «заверши фразу», «комплимент» и др.), методы обмена деятельностью («метаплан», «мастерская будущего», «перекрестные группы» и др.), методы исследовательности («четыре угла», «что это?» и др.), методы смыслов творчества («алфавит», «работа с понятиями», «интеллектуальные качели» и др.), методы рефлексивной деятельности («рефлексивный круг», «рефлексивная мишень», «анкета – газета» и др.), интерактивные игры [14].

Традиционные интерактивные стратегии обучения интегрируются с информационно-коммуникационными технологиями. Важными направлениями работы преподавателя выступает обеспе-

чение интерактивных лекций, совместное составление глоссария изучаемой темы или целостного учебного курса, решение студентами практико-ориентированных кейсов с большой степенью свободы в использовании интернет-ресурсов и возможных результатов, экспертиза этих результатов профессионалами, совместная разработка системы квестов, мотивирующих студентов на освоение предметных знаний и др. Реализация интерактивных технологий подталкивает преподавателей высшей школы осваивать сервисы Web 2.0, например, LearningApps.org для поддержки обучения с помощью интерактивных модулей, позволяющих совместно создавать и использовать различные интерактивные задания (викторины, кроссворды, пазлы и др.) в процессе преподавания.

Современные педагогические инновации требуют от преподавателя адекватных психолого-педагогических компетенций, относящихся к процедурам управления учебной деятельностью на разных этапах образовательного процесса. На этапе целеполагания и мотивации деятельности студентов применяются технологии совместного целеполагания, например, отбор целей из предложенного преподавателем набора, их дополнение; афиширование своих целей, знакомство с целями других; введение контекстных учебных проблем и задач, использование различных стратегий прогнозирования, возможных затруднений в обучении, имеющих возможность для успешного выполнения учебной задачи, например, стратегии «план действий», «SWOT», «анализ силовых полей» и др., технология творческого проектирования, технологии мотивации и проблематизации (brainstorming или мозговой штурм, ТРИЗ-технологии, синектика, контрольные списки, стратегия IDEAL) и др.

Для развития академических компетенций студентов также используются различные педагогические инновации, например, технологии проблематизации, визуализации мышления, рефлексивной деятельности студентов, интеллект-карты и др. Ю.В. Громыко определяет инструментальную систему мышле-

ния как согласованную взаимосвязь всего набора мыслительных средств, которые реализуются при решении различных мыслительных задач. К мыслительным средствам он относит множество различных образований: знаки, схемы, идеализацию, понятийные различия и т.п. Ю.В. Громыко раскрывает особенности технологии процесса проблематизации посредством ряда следующих воспроизводимых этапов: понимание чужой точки зрения, восстановление стоящей за ней позиции; построение оппозиции к предъявленной точке зрения; выявление оснований коммуникативного конфликта, определение сущности сталкивающихся в процессе коммуникации разных точек зрения на основе категориального анализа, определение предмета столкновения; построение идеализации предмета спора; рефлексия и схематизация новой формы полученного проблемного знания. Вышеперечисленные этапы проблематизации обеспечивают организацию разных мыслительных процессов, а именно действия, коммуникации, мышления, рефлексии и понимания в образовательном процессе [15].

Важное значение для анализа затруднений, выявления непонимания, личностных смыслов учения играет рефлексия, которая обеспечивается своими технологиями в соответствии с тем или иным видом рефлексивных процедур. Выделяются различные типы рефлексии, которые используются в образовательном процессе: интеллектуальная – анализ знаний об объекте изучения и способов действия с этими знаниями; личностная – постижение своей «Я – концепции», образов собственного «Я», исследование собственного отношения к поступкам, событиям, явлениям; коммуникативная – изучение особенностей группового общения; кооперативная – анализ успешности/неуспешности совместных действий в процессе обучения и др. Методическое обеспечение рефлексивных процедур в процессе обучения рассматривается важным направлением инновационно-педагогической деятельности преподавателя высшей школы.

Проблема педагогических инноваций в системе высшего образования актуализируется задачей

профессиональной подготовки специалистов, способных осуществлять инновационные действия во всех сферах социально-экономического развития страны и обеспечивать технологические прорывы и безопасность государства. Педагогический обзор инноваций образовательного процесса показывает тенденции развития педагогики высшей школы. Важнейшей из которых выступает отказ от односторонних, однозначных и одномерных процессов, в связи с чем, современная университетская дидактика приобретает ди-

версифицированный характер. Педагогические инновации задают ориентиры развития педагогической деятельности и трансформируют все деятельностные позиции педагога высшей школы (диагностико-исследовательскую, проектно-программную, конструктивно-техническую, организационно-управленческую и экспертную), составляющие основу его методологической культуры. В контексте внедрения педагогических инноваций с целью обеспечения современной продуктивной образовательной практики, методологическая культура педа-

гога выступает гарантом сознательно направляемой и постоянно совершенствующейся инновационно-педагогической деятельности вузовского преподавателя. Инновационно-педагогическая деятельность является особой формой активности педагога, направленной на повышение эффективности профессиональной подготовки посредством трансформации традиционных педагогических средств, выступает фундаментом многообразных видов педагогического творчества и профессионально-личностного развития педагога.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Цыркун, И.И. Инновация педагогическая / И.И. Цыркун // Белорусская педагогическая энциклопедия : в 2 т. – Минск, 2015. – Т. 1 / науч. ред. : С. П. Самуэль, З. И. Малейко, А. П. Чернякова. – С. 470.
2. Королева, О.Д. Портрет инноватора образования XXI века / О.Д. Королева, Т.Е. Хавенсон // Вопросы образования. – 2015. – №1. – С. 182 – 200.
3. Strauss, W. Generations: the history of America's future, 1584 to 2069 / W. Strauss, N. Howe. – New York : William Morrow and company Inc., 1991. – 538 p.
4. Bridwell–Mitchell, E.N. Them that's got: how tie formation in partnership networks gives high schools differential access to social capital / E.N. Bridwell–Mitchell // Amer. Educational Research J. – 2017. – Vol. 54, № 6. – P. 1221–1255.
5. ENQA report on Standards and Guidelines for Quality Assurance in the European Higher Education Area [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://enqa.eu/index.php/home/esg/>. – Дата доступа: 28.01.2020.
6. Снопкова, Е.И. Методологическая культура педагога: научно-методические основы развития: монография / Е.И. Снопкова. – Могилев : МГУ имени А. А. Кулешова, 2019. – 256 с.
7. Снопкова, Е.И. Методологическая культура педагога: междисциплинарные основы и теоретическое содержание : монография / Е.И. Снопкова. – Могилев : МГУ имени А.А. Кулешова, 2017. – 188 с.
8. Цыркун, И.И. Система инновационной подготовки специалистов гуманитарной сферы / И.И. Цыркун. – Минск : Тэхналогія, 2000. – 326 с.
9. Ломаско, П.С. Основополагающие принципы формирования профессиональной ИКТ-компетентности педагогических кадров в условиях smart-образования / П.С. Ломаско, А.Л. Симонова // Вестник ТГПУ. – 2015. – №7(160). – С. 78 – 84.
10. O'Flaherty, J. The use of flipped classrooms in higher education: A scoping review / J. O'Flaherty, C. Phillips // The Internet and Higher Education. – 2015. – Vol. 25. – pp. 85–95.
11. Чернявская, А.П. Самонаправляемое обучение студентов в «перевернутом» классе / А.П. Чернявская, Н.П. Ванчакова, Е.А. Вацкель, А.А. Барабошина // Ярославский педагогический вестник. – 2019. – № 2 (107). – С. 60 – 66.
12. Манакова, Л.М. Интеграция форм представления учебного материала в модели «перевернутое обучение» / Л.М. Манакова // Высшее образование в России. – 2020. – Т. 29. – № 5. – С. 85 – 94.
13. Жук, А.И. Активные методы обучения в системе повышения квалификации педагогов / А.И. Жук, Н.Н. Кошель. – Минск : Аверсэв, 2004. – 336 с.
14. Кашлев, С.С. Современные технологии педагогического процесса : пособие для педагогов / С.С. Кашлев. – 2-е изд. – Минск : Университетское, 2001. – 95 с.
15. Громыко, Ю.В. Мыследеятельностная педагогика (теоретико-практическое руководство по освоению высших образцов педагогического искусства). – Минск : Технопринт, 2000. – 376 с.

*Статья поступила в редакцию
22.11.2020*

AVIATION PERSONNEL TRAINING CONCERNING MEDICAL ASPECTS OF FLIGHT SAFETY AND FIRST-AID ADMINISTRATION ON BOARD THE AIRCRAFT: INTERNATIONAL PRACTICE; TRAINING PECULIARITIES IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Yuriy Anatol'evich Sokolov – Candidate of Sciences in Medicine, Associate Professor The Chief of Military Medical Assistants' Training Cycle of the Department of Military Health Maintenance Organization and Emergency Medicine, Faculty of Military Medicine, Belarussian State Medical University, Republic of Belarus
yu.sokoloff1@gmail.com

Rotgon Ilona Feliksovna – Head of the Department of English and Aircraft Operation of The Institute for Retraining and Professional Development of Belarussian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
aviationminsk@gmail.com

Zavaley Maria Konstantinovna – Master of Science in Management of Educational Institution, Director of The Institute for Retraining and Professional Development of Belarussian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
mzavaley@mail.ru

Zhadan Alexander Alexandrovich – Director of Minskintercaps, Republic of Belarus
zhadanalexandr@gmail.com

Abstract: Improving the reliability of the medical component of flight safety is priority line for airlines and aviation authorities and is aimed to reduce life-threatening risk on board the aircraft and minimization of the negative effects. High-quality training and preparation of aviation personnel on health issues and first-aid accommodation on board the aircraft taking into account wide-world practice and specificity of national legislation..

Keywords: Cabin crew, emergency medical care, first-aid accommodation on board, qualification skills, training programmes.

At present time the flight safety and service quality are in great demand in the sphere of air passenger transportation [1]. At the same time the top priority of the medical component of flight safety is administration of first aid on board the aircraft in case of life-threatening situation [2].

According to ICAO forecasts for the next 15 years the number of flights and passenger traffic volume

will be twice as much [3]. As a result, the increasing number of passengers can lead to large number of medical events which may take place during the flight [4].

It should be marked that there are two principal factors and they can influence the outcome of marginal passenger condition on board the aircraft. Firstly, we can take into consideration any changes in the functional body state in the

atmosphere, corresponding to the height of 1.8 – 2.2 km above sea level.

For example, common blood oxygen saturation at "zero" height is 99 – 100% but when being on board the aircraft, it is reduced up to 92 – 95% [4, 5].

Secondly, if it is impossible to administer urgent first aid on board the aircraft and medical personnel is not on board, competent first aid actions by cabin crew members are

required.

First aid on board the aircraft all over the world is provided by cabin crew in accordance with the health legislation of the country where the airline is registered.

If there are medical volunteers, they are attracted to provide urgent medical help if necessary [6].

According to statistics there are 40 – 50% cases when doctors are ready to help cabin crew in case of medical emergencies, while only 5 – 25% cases of other medical staff and nurses (help and assist) respond to request. As we can see almost half of all cases of medical emergencies (45%) on board is in cabin crew hands.

As literary data says the most common life threatening conditions among passengers are: dizziness or loss of consciousness (37,4%), respiratory symptoms (12,1%), nausea or vomiting (9,5%), cardiac symptoms (7,7%) and convulsions (5,8%) [4].

Currently due to the lack of standardized methods of identification of medical emergencies on board the aircraft there is no conclusive data on the epidemiology of medical events during the flight.

Some people propose to develop and adopt an international standardized system to record medical episodes in flight but a lot of aviation authorities have different opinion [7, 8, 9]. It is logically difficult task, rather expensive and will not be able to provide financial benefits.

In available literary sources the above parameter varies in a wide range of statistical accounting units: from one medical emergency per 604 flights to one per 7,700 passengers [4].

Thus, the cabin crew preparation and readiness to provide first – aid on board is the key to successful response in case of medical life – threatening situation among passengers and the crew.

The main national legal acts defining the requirements for organization and supporting the education of the population in order to provide first – aid in Belarus are:

- *Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated 22.12.2014 No.1221* [10];
- *Resolution of the Ministry of Health of the Republic of Belarus dated 07.08.2018 No.63* [11];
- *The order of the Ministry of Health*

of the Republic of Belarus from 28.12.2018 No.1440 [12].

The state first – aid training system is aimed to create unified approaches and proper conditions for education and provides availability [11]. One of the important print is to increase the number of people who is ready to administer first – aid and to develop their psychological readiness and skills to provide life – saving and health activities directly before the provision of medical care.

In order to harmonize first – aid methods training the Ministry of Health of the Republic of Belarus has approved training course programme named "First Aid" which includes theoretical and practical training on personal safety while providing first aid, primary examination of the patient, first – aid actions in some medical emergency situations – cardiac arrest, stroke, convulsive affect, different injures, bleeding, asphyxia, including snake's, insect's and animal's bites [12].

Despite the wide – range of emergency and urgent conditions which are included in the above – mentioned training programme, differentiated approach is obligatory to the aircraft crew members training to exclude medical life – threatening situations on board the aircraft in flight.

The International Civil Aviation Organization (ICAO) has developed an instructional material that unifies the qualifications of certain categories of aviation specialists, including cabin crew. Training programmes must include first aid on board the aircraft.

The competent approach opens a number of benefits:

- a. *training is aimed at efficiency and adults;*
- b. *acquired skills are controlled and measurable;*
- c. *training provides the possibility of adaptation;*
- d. *it helps to organize and train cabin crew much better in order to perform special tasks;*
- e. *the competent approach can be used as training quality improvement tool;*
- f. *acquired skills can be overlapped.*

In order to transform training material into a qualifying system ICAO determined qualification skills necessary for a cabin crew in case of predictable, unpredictable and

emergency situations on board [2].

In accordance with ICAO Standards and Recommended Practice (SARPS ICAO) the operator is obliged to draw up and approve the training programme in the Civil Aviation Department which is obligatory for all persons before being assigned to cabin crew members and further annual training.

Such programme can guarantee the following aspects:

- a. *The cabin crew member will be able to perform required safety duties and functions in case of emergency or emergency evacuation and to use emergency equipment on board (life jackets, life rafts, escape slides, emergency exits, portable fire extinguishers, oxygen equipment, universal preventive kits, first-aid kits and automatic external defibrillators);*
- b. *When flying at altitude 3000 m (10 000ft) or more, the cabin crew member will be familiar with the effect of oxygen lack and physiological phenomena caused by depressurization and will know the responsibilities and functions of other cabin crew members in any emergency situation and be on the alert;*
- c. *the cabin crew member will know all types of dangerous goods carried in passenger cabin and will be aware of Crew resource management (CRM) including coordination between flight crew and cabin crew* [12, 14, 15].

During aviation familiarization training cabin crew members must study high – altitude physiology and have additional knowledge in the following areas:

- a. *atmosphere and atmospheric pressure;*
- b. *sealed and not sealed aircraft cabins;*
- c. *breathing physiology and circulation, as well as body's oxygen demands;*
- d. *physiological effects of pressure changes on the body (gases, cavities, sinuses, ears, etc.);*
- e. *hypoxia – identification of those most exposed to hypoxia; physiological effects on passengers with medical problems of normal absolute pressure in the cockpit on the crew/passengers with a significant reduction in oxygen content in the event of cabin pressure loss;*

- f. *crew member incapacitation;*
- g. *use of oxygen and oxygen masks.*

The cabin crew members must remember the time of active consciousness at an altitude, protection method (additional oxygen) and the importance of necessary procedures in case of pressure loss in the cockpit. Recognition of necessity and assistance to passenger or crew member in case of hyperventilation, carbon monoxide threat and intoxication (poisoning). Do not forget about ways to detect and minimize the effects of poisoning [2].

Apart from official duties, connected with providing safety on board, cabin crew members must be ready to administer first – aid for passengers or other crew members. They can deal with holiday – makers who are contagious infections diseases carrier and must be able to protect themselves using protective equipment and measures and cope with any real situation [16].

The cabin crew is fully responsible for appropriate action in any situation, even if there is medical professional on board and he/she is ready to help (volunteer).

Cabin crew members should have a general understanding of human anatomy and physiology, and first aid training should include appropriate actions in the most common medical cases, including cardio pulmonary resuscitation [17].

Cabin crew members should be able to identify passenger conditions requiring urgent medical care and first – aid as soon as possible and administer first – aid and primary health care until professional medical services arrive. They should know the contents and the order of using first – aid kits on board, universal preventive kits and medical kits and equipment contained (e.g., thermometer [18], generic kit, mask and Ambo bag) and help passenger in the absence of doctor on board.

Because of meal and drinks service on board, cabin crew must know and understand the importance of sanitary culture on board [19]. While performing their duties, cabin crew members must take into consideration such factors as: stressful situations and health risks, associated with external environmental factors during the

flight (altitude influence, hypoxia, fatigue, contact with contagious infections diseases carriers [2].

There are 14 performances criteria which are included into training preparation in case of medical accidents on board and can be achieved at classes and self – training hours in order to use first – aid kit (FAK), emergency medical kit (EMK), universal protective kit (UPK), automatic external defibrillator (AED), telemedicine equipment, as well as recognition and response to the emergency situation and resuscitation actions [2].

Since 2019 thanks to the combined efforts of Belarussian State Academy of Aviation and Belavia – Belarussian Airlines the full initial training circle of cabin crew is carried out in the Republic of Belarus. Initial training of cabin crew includes 5 main modules:

Theoretical training, training on aircraft type, CRM with elements of human factor, transportation of dangerous goods and professionally oriented English (The Institute for Retraining and Professional Development of Belarussian State Academy of Aviation); emergency rescue training (The International Rescuers Training Centre at the branch of the University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus branch «The Institute for Retraining and Professional Development»); aviation security (the ICAO Aviation Security Training Centre (RUE National Airport). All educational programmes are in accordance with The Cabin Crew Safety Training Manual (Doc 10002 AN/502), Annex 6 — Operation of Aircraft, Part I — International Commercial Air Transport — Aeroplanes, aircraft operators requirements and adopted by national aviation authority.

One of the main component of theoretical training is Cabin health and first – aid training (course duration is 16 hours) which covers the following contents of cabin health and first – aid training, hands – on exercises and real simulated exercises.

During lecture hours the students are given medical information on the following topics: management of on – board medical events (including human physiology at

high altitudes, health requirements for crew members; proper regulations in case of special body condition, personal hygiene of the cabin crew member; crew's actions when passengers health or condition becomes worse, cardiac pulmonary resuscitation (CPR) actions, first aid in case of injuries and certain syndromes, contents first aid kits on board the aircraft), food safety, cabin disinsection, altitude physiology.

To sum up the information above a cabin crew member has to identify and manage on-board medical events and cabin health issues, including the following performance criteria:

1. *Monitor the cabin to identify ill passengers;*
2. *Recognize an on-board medical events;*
3. *Determine if the event is life-threatening;*
4. *Respond immediately to a life-threatening on-board medical events;*
5. *Respond to other non-life-threatening on-board events using appropriate first-aid techniques;*
6. *Assess and manage suspected cases of communicable disease;*
7. *Apply communication procedures;*
8. *Apply procedures for seeking ground-based medical and/or on-board volunteer health professional assistance;*
9. *Use first-aid and medical equipment, as appropriate;*
10. *Manage assistance from an on-board volunteer health professional, if available;*
11. *Support the on-board volunteer health professional, as appropriate;*
12. *Apply operator policy on "Do Not Resuscitate" (DNR), if appropriate;*
13. *Manage a death or presumed death on board;*
14. *Complete the applicable documentation;*
15. *Minimize or prevent the contamination of food and related service items;*
16. *Ensure safe practices for food safety;*
17. *Manage suspected food poisoning;*
18. *Advise passengers on disinsection procedures, if applicable;*
19. *Carry out disinsection, as per operator procedures.*

Training of cabin crew on medical aspects is carried out by experienced and authorized staff of the State

Institution "Medical Civil Aviation Service".

Thus, we can conclude the following:

1. *Improving the reliability of the medical component of flight safety is priority line for airlines and aviation authorities.*
2. *The problem of first-aid administration on board is vulnerable point of the medical*

component of flight safety. The problem is relevant not only for Belarus but for many countries in the world.

3. *Promising directions to reduce life-threatening risk on board the aircraft and minimization of the negative effects (if they occur) include: creating the conditions for the development and implementation of a pre-*

consultation mechanism for passengers with chronic diseases to assess the risk of a sharp health deterioration during flight;

4. *High-quality training and preparation of aviation personnel on health issues and first-aid accommodation on board the aircraft taking into account wide-world practice and specificity of national legislation.*

REFERENCES

1. The official website of the national airline Belavia. Access mode: <https://belavia.by/o-kompanii/politika-kachestva/> – Access date: 13.05.2020.
2. ICAO Doc 10002 «Cabin Crew Safety Training Manual», pp. 3–2; 4–6; 9–1.
3. The official website of the International Civil Aviation Organization. Access mode: https://www.icao.int/annual-report-2018/Documents/Annual_Report.2018_Air%20Transport%20Statistics.pdf – Access date : 01.06.2020.
4. Kodama, D. «Is there a doctor on board?»: Practical recommendations for managing in-flight medical emergencies / D. Kodama [et al.] // CMAJ. – 2018. – Vol.190; Issue 8. – P. 217–222.
5. ICAO Doc 8984 «Manual of Civil Aviation Medicine»
6. Medical Manual, IATA, 11 th Edition, June 2018, pp. 30–31, 62–64.
7. Ruskin, K.J. In-flight medical emergencies: time for a registry // K.J. Ruskin [et al.]. – Crit. Care 2009; 13(1), P. 121.
8. Kevin, K.C. Predictors of Flight Diversions and Deaths for In-flight Medical Emergencies in Commercial Aviation / K.C. Kevin [et al.] // JAMA Internal Medicine. – 2010. – August 9/23. – P. 1401–1402.
9. Mahony, P.H. Symptom-based categorization of in-flight passenger medical incidents / P.H. Mahony, J.A. Myers, P.D Larsen, D.M.C. Powell, R.F. Griffiths // Aviat. Space Environ Med. – 2011. – 82(12). – P. 1131–1137.
10. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 22.12.2014 No.1221 "On the creation and functioning of a single state system of training the population in the methods of first aid in conditions that pose a threat to human life and/or health."
11. Resolution of the Ministry of Health of the Republic of Belarus 07.08.2018 No. 63 "On the approval of the Instructions on how to create and operate a single state system of education of the population in the methods of first aid in conditions that pose a threat to human life and/or health."
12. The order of the Ministry of Health of the Republic of Belarus dated 28.12.2018 No. 1440 "On some issues of the creation and functioning of the state system of training the population in the methods of first aid."
13. Annex 6 to the International Civil Aviation Convention "Aircraft Exploitation", Part 1 "International Commercial Transport. Planes," p. 6–2; DOP B–1 – B–4; 12–1, 12–2.
14. ICAO Doc 8335 «Manual of Procedures for Operations Inspection, Certification and Continued Surveillance, p. III–5–22.
15. ICAO Doc 9683 «Human Factors Training Manual».
16. Guide to hygiene and sanitation in aviation. Third edition. WHO, 2013.
17. The official website of the International Air Transport Association. Access Mode: <https://www.iata.org/whatwedo/safety/health/Documents/death-on-board-guidelines.pdf> – Access Date: 01.12.2018.
18. The official website of the International Air Transport Association. Access Mode: <https://www.iata.org/whatwedo/safety/health/Documents/guidelines-thermometers-onboard.pdf> – Access Date: 01.12.2018.
19. The official website of the International Air Transport Association. Access mode: <https://www.iata.org/whatwedo/safety/health/Documents/guidelines-food-poisoning.pdf> – Access date: 01.12.2018.

Статья поступила в редакцию
08.12.2020



ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

SL

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И СТРУКТУРА УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОЛЕТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ГОСУДАРСТВОМ, СОГЛАСНО ПРИЛОЖЕНИЮ 19 К ЧИКАГСКОЙ КОНВЕНЦИИ

*Артем Артурович Шегидевич – кандидат технических наук, ректор учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
sh.a.bgaa@tut.by*

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

*Ольга Геннадьевна Колошич – магистр юридических наук, ведущий юрист-консульт отдела аэронавигационной информации государственного предприятия «Белаэронавигация», Республика Беларусь
olga_k111@list.ru*

Аннотация: в статье содержатся основные теоретические аспекты и структура управления безопасностью полетов, требования к государственной программе по безопасности полетов, критические элементы государственной системы контроля за обеспечением безопасности полетов, обязательства государства по надзору, система управления безопасностью полетов, внедряемая поставщиком обслуживания, согласно Приложению 19 «Управление безопасностью полетов» к Чикагской конвенции. Освещены положения системы обеспечения безопасности полетов гражданской авиации Республики Беларусь.

Ключевые слова: управление безопасностью полетов (Safety Management), государственная программа по безопасности полетов (State Safety Programme), критические элементы государственной системы контроля за обеспечением безопасности полетов (State safety oversight system critical elements), обязательства государства по надзору (Surveillance obligations), система управления безопасностью полетов (Safety management system).

Abstract: This article contains the main theoretical aspects and structure of safety management, requirements for the state program for flight safety, critical elements of the state safety oversight system, the state's oversight obligations, the safety management system implemented by the service provider, in accordance with Annex 19 Safety Management to the Chicago Convention. The provisions of the civil aviation safety system of the Republic of Belarus are briefly highlighted.

Keywords: Safety Management, State Safety Program, State safety oversight system critical elements, Surveillance obligations, Safety management system.

Рассмотрение структуры управления безопасностью полетов является актуальной для всех Договаривающихся государств, являющихся участниками Чикагской конвенции.

Основным документом, регулирующим безопасность полетов в

области международной гражданской авиации, является Приложение 19 «Управление безопасностью полетов» к Чикагской конвенции (далее – Приложение 19) [1]. Работа над подготовкой Приложения 19 была вызвана реализацией инициатив в сфере управления безопас-

ности полетов, а именно рекомендаций Конференции генеральных директоров гражданской авиации по глобальной стратегии в сфере безопасности полетов (Монреаль, 20 – 22 марта 2006 года) (DGCA/06) и Конференции высокого уровня по безопасности полетов (Монре-

аль, 29 марта – 1 апреля 2010 года) (HLSC/2010).

Приложение 19 было издано относительно недавно в июле 2013 года и являлось комплексным документом, содержащим положения других приложений к Чикагской конвенции. В июле 2016 года вышло новое издание Приложения 19, которое внесло изменения в части объединения и реорганизации действующих Стандартов и Рекомендуемой практики. В Приложение 19 вошли положения Стандартов и Рекомендуемой практики об управлении безопасностью полетов, содержащиеся в приложениях 1, 6 (части I, II и III), 8, 11, 13 и 14 (том I).

Теоретические аспекты и структура управления безопасностью полетов

В новой редакции Приложение 19 устанавливает взаимосвязь между восемью критическими элементами государственной системы контроля за обеспечением безопасности полетов (далее – ГКБП) и элементами концептуальных рамок Государственной программы по безопасности полетов (далее – ГосПБП); Стандартами и Рекомендуемой практикой становятся положения о защите данных и информации о безопасности полетов; определяется, что система управления безопасностью полетов (далее – СУБП) должна применяться и в организациях, ответственных за конструкцию типа и изготовление двигателей и воздушных винтов.

Согласно Приложению 19 «*безопасность полетов*» – это состояние, при котором риски, связанные с авиационной деятельностью, относящиеся к эксплуатации воздушных судов или непосредственно обеспечивающей такую эксплуатацию, снижены до приемлемого уровня и контролируются [1].

Целью Приложения 19 является *создание единой системы управления безопасностью полетов*, повышение эффективности ее функционирования, управление рисками для безопасности полетов, возникающими у государства в обеспечении безопасности полетов, контроль за обеспечением безопасности полетов.

Для раскрытия теоретических аспектов приложения 19 необходи-

мо рассмотреть сферу его применения. Стандарты Приложения 19 распространяют свое действие на *государство* в рамках Чикагской конвенции и *на поставщиков обслуживания и эксплуатантов*, которые внедряют СУБП, разделяют обязанности государства и поставщиков обслуживания и эксплуатантов в отношении управления безопасностью полетов.

Предлагается структура управления безопасностью полетов раскрыть через выделение ее составных частей

I. Государство. Обязательства государства по управлению безопасностью полетов.

Государственная программа по безопасности полетов (ГосПБП).

II. Критические элементы государственной системы контроля за обеспечением безопасности полетов.

КЭ – 1 «Основное авиационное законодательство» (1 компонент ГосПБП),

КЭ – 3 «Государственная система и функции» (1 компонент ГосПБП),

КЭ – 7 «Обязательства по надзору» (3 компонент ГосПБП).

III. Поставщики обслуживания. Система управления безопасностью полетов (СУБП).

I. Государство. Обязательства государства по управлению безопасностью полетов

Государство несет ответственность за обеспечение безопасности полетов в своей стране. Государство обязано в рамках управления безопасностью полетов соблюдать принятые для нее Стандарты и Рекомендуемую практику Международной организации гражданской авиации (далее – ИКАО), выполнять собственные функции государства по управлению безопасностью полетов, осуществлять надзор за системой управления безопасностью полетов, внедренных эксплуатантами.

Государство, выполняя свои обязанности по обеспечению безопасности полетов, осуществляет *контроль (State Safety Oversight)* за обеспечением безопасности полетов и *надзор (Surveillance*

obligations) за авиационной деятельностью в целях обеспечения безопасности, эффективности и регулярности воздушных перевозок. Контроль и надзор являются на первый взгляд понятиями с одинаковой правовой сущностью, однако согласно Приложению 19 имеют разное значение при формировании единой системы управления безопасностью полетов в государстве.

В Приложении 19 в редакции 2013 года обязанности государства были разделены на две составляющих: государственную программу по обеспечению безопасности полетов и государственный контроль за обеспечением безопасности полетов. Действующее Приложение 19 в редакции 2016 г. устанавливает обязанности государства по управлению безопасностью полетов, которые включают в себя ГосПБП, основу которой составляют критические элементы ГКБП.

Содержание, функции и виды деятельности по управлению безопасностью полетов содержатся в Руководстве по управлению безопасностью полетов Doc 9859 [2]. Контрольные функции подробно раскрыты в Части А «Создание государственной системы контроля за обеспечением безопасности полетов и управление этой системой» Руководства по организации контроля за обеспечением безопасности полетов Doc 9734 [3], функции надзора – в Руководстве по процедурам эксплуатационной инспекции, сертификации и постоянного надзора Doc 8335 [4].

Государство принимает и осуществляет *Государственную программу по безопасности полетов (ГосПБП)* как комплекс правил и мероприятий, направленных на повышение уровня безопасности полетов, соответствующую масштабам и сложности системы гражданской авиации своего государства.

ГосПБП представляет собой административную систему управления безопасностью полетов в государстве, координацию деятельности полномочных органов, ответственных за выполнение функций в области гражданской авиации в государстве, объединение их в один общий механизм для обеспечения безопасности полетов.

Целью ГосПБП является дости-

жение, поддержание и (или) постоянного улучшения приемлемого уровня эффективности обеспечения безопасности полетов гражданской авиации с учетом оценки факторов риска для безопасности полетов. Приемлемый уровень эффективности обеспечения безопасности полетов устанавливается государством. Государство способствует и поддерживает эффективную реализацию СУБП авиационной отрасли государства, обеспечивает мониторинг и оценку показателей эффективности обеспечения полетов в государстве.

Государственная программа по безопасности полетов (ГосПБП) состоит из четырех компонентов:

1. Государственная политика, цели и ресурсы обеспечения безопасности полетов.
2. Управление рисками для безопасности полетов на государственном уровне.
3. Обеспечение безопасности полетов на государственном уровне.
4. Популяризация вопросов безопасности полетов на государственном уровне.

В Республике Беларусь принята Национальная программа по безопасности полетов гражданской авиации Республики Беларусь, утвержденная постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 22 августа 2019 г. № 563 (далее – Национальная программа).

В Национальной программе сформулированы основные принципы управления безопасностью полетов, определена основа для создания эффективной системы безопасности гражданской авиации Республики Беларусь. Национальная программа закрепляет основные положения национальной политики по управлению безопасностью полетов, эффективному внедрению системы управления безопасностью полетов у поставщика обслуживания.

Компонент 1 ГосПБП «Государственная политика, цели и ресурсы обеспечения безопасности полетов» определяет, как государство должно управлять безопасностью полетов в рамках своей авиационной системы. Оно включает требования к государственным авиационным ведомствам, их функции, цели в области безопасности полетов,

которые предполагается достичь.

Компонент 1 включает в себя:

- 1.1. Основное авиационное законодательство (критический элемент (далее – КЭ) КЭ–1);
- 1.2. Конкретные правила эксплуатации (КЭ–2);
- 1.3. Государственную систему и функции (КЭ–3);
- 1.4. Квалифицированный технический персонал (КЭ–4);
- 1.5. Технический инструктивный материал, средства и представление важной с точки зрения безопасности полетов информации (КЭ–5).

Таким образом, пять критических элементов ГКБП формируют первый компонент ГосПБП.

Компонент 2. «Управление факторами риска для безопасности полетов на государственном уровне» включает в себя:

- 2.1. Обязательства по выдаче свидетельств, сертификации, выдаче разрешений и или утверждению (КЭ–6);
- 2.2. Обязательства в отношении СУБП;
- 2.3. Расследование авиационных происшествий и инцидентов;
- 2.4. Выявление опасных факторов и оценка риска для безопасности полетов;
- 2.5. Управление факторами риска для безопасности полетов;
- 2.6. Разрешение проблем безопасности полетов (КЭ–8).

Данный компонент определяет элементы системы обеспечения безопасности полетов, которые наиболее подвержены риску и влияют на возможность осуществления государством безопасности полетов.

Компонент 3. «Обеспечение безопасности полетов на государственном уровне» включает в себя:

- 3.1. Обязательства по надзору (КЭ–7);
- 3.2. Эффективность обеспечения безопасности полетов на государственном уровне.

Государство устанавливает, поддерживает и постоянно повышает приемлемый уровень эффективности обеспечения безопасности полетов в государстве с помощью ГосПБП.

Компонент 4. «Популяризация вопросов безопасности полетов на государственном уровне» включает в себя:

- 4.1. Внутренний обмен информа-

цией о безопасности полетов и ее распространение;

- 4.2. Внешний обмен информацией о безопасности полетов и ее распространение.

Сущность этого компонента состоит в повышение осведомленности авиационных организаций страны и всего мирового авиационного сообщества про информацию о безопасности полетов, обмена ею для формирования позитивной культуры в области безопасности полетов, которая содействуют функционированию эффективной ГосПБП.

II. Критические элементы государственной системы контроля за обеспечением безопасности полетов

В соответствии с Приложением 19 «контроль за обеспечением безопасности полетов» понимается как «функция, осуществляемая государством для обеспечения соблюдения лицами и организациями, осуществляющими авиационную деятельность, национальных законодательных актов и нормативных положений в области безопасности полетов» [1].

Каждое государство создает и вводит государственную систему контроля за обеспечением безопасности полетов, которая включает восемь критических элементов. Критические элементы необходимы для эффективного и устойчивого осуществления политики в области безопасности полетов и связанных с ней процедур. Эффективное внедрение критических элементов является показателем способности государства осуществлять контроль за обеспечением безопасности полетов.

ИКАО разработала и на регулярной основе реализует Универсальную программу по проведению проверок организации контроля за обеспечением безопасности полетов (Universal Safety Oversight Audit Programme), предусматривающую проведение во всех Договаривающихся государствах регулярных, обязательных, систематических и согласованных проверок состояния безопасности полетов. Восемь критических элементов системы ГКБП используются для оценки способности государства осуществлять контроль за обеспечением

безопасности полетов, а также для расследования авиационных происшествий и инцидентов.

Восемь КЭ системы ГКБП являются взаимосвязанными и дополняют друг друга:

- КЭ—1. Основное авиационное законодательство;
- КЭ—2. Конкретные правила эксплуатации;
- КЭ—3. Государственная система и функции;
- КЭ—4. Квалифицированный технический персонал;
- КЭ—5. Технический инструктивный материал, средства и предоставление важной для безопасности полетов информации;
- КЭ—6. Обязательства по выдаче свидетельств, сертификации, выдаче разрешений и (или) утверждению;
- КЭ—7. Обязательства по надзору;
- КЭ—8. Разрешение проблем в сфере безопасности полетов.

Далее предлагается рассмотреть основные критические элементы ГКБП, с которых государство начинает работу по анализу, созданию и внедрению ГосПБП. Это КЭ—1 «Основное авиационное законодательство» (1 компонент ГосПБП), КЭ—3 «Государственная система и функции» (1 компонент ГосПБП), КЭ—7 «Обязательства по надзору» (3 компонент ГосПБП).

КЭ—1 «Основное авиационное законодательство» (компонент 1 ГосПБП) (часть А Дос 9734).

Рассмотрим один из первых и важных элементов государственной системы контроля за обеспечением безопасности полетов — это основное авиационное законодательство. Согласно этому критическому элементу государство принимает всеобъемлющий и эффективный *Закон об авиации*. Он может быть принят в виде кодекса, закона или иного вида законодательного акта. Объем законодательного акта должен соответствовать масштабам и сложности авиационной деятельности государства и требованиям, содержащимся в Чикагской конвенции.

Закон об авиации должен пре-

- *государственные авиационные органы (ведомство гражданской авиации, полномочные*

органы по расследованию авиационных происшествий);

- *доступ персонала, осуществляющего функции контроля за обеспечением безопасности полетов, к воздушным судам, производственной деятельности, средствам и службам, персоналу и соответствующим документам поставщиков обслуживания;*
- *возможность выполнения обязанностей по контролю за безопасностью полетов.*

Закон об авиации должен быть *мобильным, «рабочим»* и его принятие и реализация должна позволять государству регулировать деятельность в области гражданской авиации и обеспечивать соблюдение правил посредством соответствующих полномочных органов или ведомств, созданных для этих целей. Для реализации положений закона об авиации государство принимает конкретные правила эксплуатации.

Основное авиационное законодательство устанавливает сбалансированную систему контроля за обеспечением безопасности полетов, при которой как государство, так и авиационная отрасль, совместно несут ответственность за безопасность, регулярность и эффективность деятельности гражданской авиации. Такая взаимосвязь реализуется на практике в рамках политики и методологии ведомства гражданской авиации.

Согласно главе 8 Национальной программы основным законом, определяющим деятельность гражданской авиации в Республике Беларусь, является Воздушный кодекс Республики Беларусь [7].

Политика Республики Беларусь по управлению безопасностью полетов содержится в Национальной программе. Хотелось отметить многовекторность Национальной программы и учет международных тенденций в области установления контроля и надзора за безопасностью полетов, которые нашли свое закрепление в правовых нормах Национальной программы. Так, для достижения высокого уровня безопасности полетов Республика Беларусь взаимодействует с ИКАО, EASA (European Union Aviation Safety Agency), Eurocontrol, Межгосударственным авиационным комитетом, взаимодействует со всеми постав-

щиками обслуживания, эксплуатантами, иными участниками процесса обеспечения безопасности полетов в отрасли гражданской авиации. При принятии национального законодательства применяет Стандарты и Рекомендуемую практику ИКАО, учитывает правовые подходы и установленные правовые нормы законодательства Европейского Союза.

Таким образом, принятие государством авиационного законодательства зависит от масштаба и особенностей отрасли гражданской авиации с учетом правовой системы государства. Закон об авиации служит законодательной основой деятельности государства по контролю за обеспечением безопасности полетов. Национальная программа призвана обеспечить требования ИКАО по созданию эффективной системы обеспечения безопасности полетов в гражданской авиации Республики Беларусь.

КЭ—3 «Государственная система и функции» (компонент 1 ГосПБП) (часть А Дос 9734).

Данный критический элемент реализуется путем создания государством системы обеспечения безопасности полетов, полномочных органов или ведомств, которые располагают достаточным квалифицированным персоналом и адекватными финансовыми ресурсами. Наличие квалифицированного персонала предполагается как в органах и организациях ведомства гражданской авиации, так и у поставщика обслуживания и эксплуатанта. Государство формирует инспекторские органы, которые имеют соответствующую подготовку, проходят переподготовку и повышение квалификации. Поставщик обслуживания утверждает программу подготовки персонала, обеспечивает надлежащую подготовку и квалификацию сотрудников для выполнения ими своих обязанностей в рамках СУБП [1].

Каждый государственный полномочный орган или ведомство обладает функциями и целями в области безопасности полетов для выполнения своих обязанностей по управлению безопасностью полетов.

В Республике Беларусь государственным полномочным органом, наделенным государственно-властными полномочиями и функция-

ми по обеспечению безопасности полетов, является Департамент по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь.

Государство утверждает ГосПБП и устанавливает политику и цели в области безопасности полетов, которые отражают обязательства в области безопасности полетов и «способствуют формированию позитивной культуры безопасности полетов в авиационном сообществе».

В ГосПБП документально оформляются обязанности и функции каждого авиационного полномочного органа в отношении внедрения ГосПБП. Государственная политика и цели в области безопасности полетов представляют собой общие заявления, подтвержденные авиационными полномочными органами государства.

Государственная политика в области обеспечения безопасности полетов представляет собой официальный документ, в котором описаны направления деятельности государства в области безопасности полетов. Концепция в области безопасности полетов содержит информацию о том, как планируется выполнять свои обязанности по обеспечению безопасности полетов. Принципы, отраженные в политике в области безопасности полетов, оформляются в письменном виде, должны быть понятны и единообразно применяться.

Цели государства представляют собой желаемые результаты в области безопасности полетов, к достижению которых стремится государство. Цели в области безопасности полетов представляют собой приоритеты государства в области управления безопасностью полетов и создают план распределения и направления государственных ресурсов.

Цели в области безопасности полетов способствуют определению *государственных показателей эффективности обеспечения безопасности полетов (SPI)* и *целевого уровня эффективности обеспечения безопасности полетов (SPT)* и последующему установлению приемлемого уровня *обеспечения эффективности безопасности полетов (ALoSP)*. Цели в области безопасности полетов в сочетании с SPI и SPT позволя-

ют государству вести мониторинг своих показателей обеспечения эффективности безопасности полетов и изменять их.

После внедрения ГосПБП государство проводит периодическую переоценку факторов риска для безопасности полетов, следит за их постоянной актуальностью с учетом результатов переоценки имеющихся факторов риска. На все эти мероприятия выделяются государственные ресурсы для обеспечения реализации ГосПБП.

Также государство создает *Национальный план обеспечения безопасности полетов (NASP)* в соответствии с целями Глобального плана обеспечения безопасности полетов (Doc 10004) [6]. NASP указывает стратегическое направление деятельности по управлению безопасностью полетов на национальном уровне на определенный период (например, на следующие пять лет).

КЭ-7 «Обязательства по надзору» (компонент 3 ГосПБП)

Государством в лице полномочных органов осуществляется надзор за эффективностью обеспечения безопасности полетов за поставщиком обслуживания и эксплуатантом, с учетом масштабов деятельности поставщика обслуживания, сложности предоставляемых им авиационных продуктов и услуг.

Обязательства по надзору выполняются путем утверждения государством процедур проведения надзорных мероприятий: проверок, инспекций, обследований областей деятельности поставщика обслуживания и эксплуатанта.

Государство вводит документально оформленные процессы путем подготовки и планирования инспекций, проверок и мер непрерывного мониторинга, позволяющих убедиться в том, что обладатели авиационных свидетельств, сертификатов, разрешений продолжают отвечать установленным правовыми актами требованиям. Сюда входит надзор за назначенным полномочным органом персоналом, осуществляющим от его имени функции контроля за обеспечением безопасности полетов.

В Республике Беларусь Указом Президента Республики Беларусь от 4 сентября 2019 г. № 328 «О создании учреждения» созда-

но государственное предприятие «Авиационная инспекция Республики Беларусь». Авиационная инспекция является инспекторским органом в области гражданской авиации и осуществляет в рамках обязательств, принятых в соответствии с международными договорами Республики Беларусь, контроль за безопасностью полетов воздушных судов и авиационной безопасностью в области гражданской авиации.

Авиационная инспекция выполняет обязательства по контролю за безопасностью полетов, а также обязательства по надзору для выполнения критического элемента 7 ГПБП. В практической деятельности Авиационная инспекция применяет Руководство по процедурам эксплуатационной инспекции, сертификации и постоянного надзора (Doc 8335) [4].

Государства могут составить организационные профили риска, единообразные для каждого сектора авиационной деятельности с тем, чтобы упростить процесс изменения масштаба и частоты проведения своих надзорных мероприятий. Такие инструменты должны выполнять задачу сбора и агрегирования информации, которая уже должна быть доступна в отношении поставщиков обслуживания, и могут учитывать такие факторы, как:

- a. финансовое положение организации;
- b. продолжительность деятельности (количество лет);
- c. текучесть кадров среди ключевых сотрудников, таких как, ответственные руководители и руководители, ответственные за безопасность полетов;
- d. компетентность ответственного руководителя и эффективность его деятельности;
- e. компетентность руководителя, ответственного за безопасность полетов, и эффективность его деятельности;
- f. результаты предыдущих проверок;
- g. своевременное и эффективное устранение ранее выявленных недостатков;
- h. критерии относительного уровня деятельности (подверженности риску для безопасности полетов);
- i. показатели соответствующе-

- го масштаба и сложности выполняемой деятельности;
- ж. степень развития процессов выявления опасных факторов и оценки риска для безопасности полетов;
 - к. показатели эффективности обеспечения безопасности полетов, полученные по результатам проведенного государством анализа данных о безопасности полетов и мероприятий по мониторингу эффективности обеспечения безопасности полетов [4].

III. Система управления безопасностью полетов (СУБП)

СУБП содержится в Руководстве по управлению безопасностью полетов (Doc 9859).

Каждое государство в рамках своей ГосПБП требует внедрения СУБП находящимися под его контролем поставщиками обслуживания и эксплуатантами, то есть поставщиками обслуживания и эксплуатантами обязаны внедрять СУБП в своей деятельности.

СУБП внедряется следующими поставщиками обслуживания и эксплуатантами:

- а. утвержденными, согласно Приложению 1, учебными организациями которые подвержены воздействию рисков для безопасности полетов, связанных с выполнением полетов воздушных судов в ходе предоставления ими своих услуг (Приложение 1);
- б. эксплуатантами самолетов или вертолетов, имеющими разрешение на выполнение международных коммерческих авиаперевозок (часть I или раздел II части III Приложения 6).
- в. утвержденными организациями по техническому обслуживанию, предоставляющими услуги эксплуатантам самолетов или вертолетов, выполняющим международные коммерческие авиаперевозки (часть I или раздел II части III Приложения 6);
- г. организациями, ответственными за конструкцию типа или изготовление воздушных судов, двигателей или воздушных винтов (Приложение 8);
- е. поставщиками обслуживания воздушного движения (Приложению 11).

- ф. эксплуатантами сертифицированных аэродромов (Приложение 14).

Вопрос рассмотрения внедрения СУБП в каждый вид авиационной организации широк, имеет свои особенности в зависимости от вида его деятельности.

СУБП состоит из четырех компонентов:

1. Политика и цели обеспечения безопасности полетов (обязательства и ответственность руководства; иерархия ответственности за безопасность полетов; назначение ведущих сотрудников, ответственных за безопасность полетов; координация планирования мероприятий на случай аварийной обстановки; документация по СУБП).

2. Управление рисками для безопасности полетов (выявление источников опасности; оценка и уменьшение рисков для безопасности полетов).

3. Обеспечение безопасности полетов (контроль и количественная оценка эффективности обеспечения безопасности полетов; осуществление изменений; постоянное совершенствование СУБП).

4. Популяризация вопросов безопасности полетов (подготовка кадров и обучение; обмен информацией о безопасности полетов) [1].

В политике и целях обеспечения безопасности полетов поставщик обслуживания определяет свою политику в области обеспечения безопасности полетов в соответствии с международными и национальными требованиями. Политика в области обеспечения безопасности полетов отражает обязательство организации по обеспечению безопасности полетов; содержит четкое заявление о предоставлении ресурсов, необходимых для ее реализации; включает процедуры отчетности в области безопасности полетов; четко указывает, какие виды поведения при осуществлении поставщиком обслуживания авиационной деятельности являются недопустимыми, и обстоятельства, при которых не будут приниматься дисциплинарные меры; подписывается ответственным руководителем организации; рассылается по всей организации с утверждающей надписью на видном месте; периодически пересматривается на предмет сохранения актуальности и соответствия дея-

тельности поставщика обслуживания.

Определяя иерархию ответственности за безопасность полетов поставщик обслуживания: определяет ответственного руководителя, который несет окончательную ответственность от имени организации за внедрение и поддержание функционирования СУБП; устанавливает четкую иерархию ответственности всех руководителей в организации за СУБП; документально оформляет и доводит до сведения всех сотрудников организации обязанности, ответственность и полномочия в области обеспечения безопасности полетов; определяет уровень руководителей, уполномоченных принимать решения относительно приемлемости рисков для безопасности полетов.

Поставщик обслуживания назначает руководителя, отвечающего за безопасность полетов и обеспечивающего внедрение и поддержание функционирования эффективной СУБП. Поставщик обслуживания обеспечивает надлежащую координацию плана мероприятий на случай аварийной обстановки с планами мероприятий на случай аварийной обстановки организаций, с которыми он взаимодействует при предоставлении своих продуктов и услуг.

Главным составляющим СУБП является документация по СУБП. Поставщик обслуживания разрабатывает и ведет документацию по СУБП, которая включает политику и цели в области обеспечения безопасности полетов; требования к СУБП; процессы и процедуры СУБП; иерархию ответственности, обязанности и полномочия в отношении процессов и процедур СУБП; результаты функционирования СУБП.

При управлении рисками для безопасности полетов поставщик обслуживания определяет и осуществляет процесс, обеспечивающий выявление источников опасности, связанных с авиационными продуктами или услугами, которые он предоставляет. Выявление источников опасности основывается на сочетании реагирующих, проактивных и прогностических методов сбора данных о безопасности полетов, анализа, оценки и контроля ри-

сков для безопасности полетов.

Поставщик обслуживания обеспечивает контроль и количественную оценку эффективности обеспечения безопасности полетов путем разработки и применения методов проверки эффективности обеспечения организацией безопасности полетов и подтверждения действенности средств контроля рисков для безопасности полетов; выработки процесса, направленного на выявление изменений, которые могут повлиять на уровень рисков для безопасности полетов, связанных с предоставляемыми им авиационными продуктами или услугами, определяет риски для безопасности полетов, и управляет такими рисками; проведения мониторинга и оценки эффективности процессов в рамках своей СУБП в целях дальнейшего повышения общей эффективности СУБП.

Популяризация вопросов безопасности полетов выражается в подготовке кадров и их обучении. Поставщик обслуживания разрабатывает и выполняет программу подготовки кадров в области безопасности полетов, которая соответствует степени участия каждого сотрудника в обеспечении функционирования СУБП; обеспечивает ознакомление сотрудников с СУБП в объеме, соразмерном занимаемым ими должностям; представляет важную с точки зрения безопасности полетов информацию; разъясняет причины принятия конкретных действий по обеспечению безопасности полетов; разъясняет причины введения или изменения процедур обеспечения безопасности полетов.

Заключение

С учетом изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Политика обеспечения безопасности полетов в рамках Приложения 19 к Чикагской конвенции должна способствовать тому, чтобы и государства, и поставщики обслуживания единообразно понимали и применяли сформированную в каждом государстве политику и цели, систему обеспечения безопасности полетов. Окончательной целью применения в государстве требований Приложения 19 является установление эффективного обеспечения безопасности полетов в рамках интеграции международного сообщества в авиационной сфере.
2. Приложение 19 к Чикагской конвенции является общим механизмом поведения на международной арене в рамках безопасности полетов, выражает интересы всего мирового сообщества.
3. Основу Государственной программы по безопасности полетов составляют критические элементы государственной системы контроля за обеспечением безопасности полетов. В государственную систему контроля за обеспечением безопасности полетов входит критический элемент «Обязательства по надзору», что позволяет сделать вывод о том, что контроль более широкое понятие, которое в документах ИКАО может пониматься как выполнение контроля и надзора.

4. Реализация Государственной программы по безопасности полетов требует постоянного изменения законодательства, принятия нормативных правовых актов и технических нормативных правовых актов, а также увеличения роли юристов, которые должны обладать достаточно высоким уровнем знаний международного воздушного права, национального законодательства, законодательства государств, с которым установлено воздушное сообщение.
5. Полагаем, что критические элементы «Основное авиационное законодательство», «Государственная система и функции» и «Обязательства по надзору» устанавливают основу формирования государственных подходов к политике, целям, функциям, механизму в обеспечении безопасности полетов в государстве, что отражается в Государственной программе по безопасности полетов.
6. СУБП поставщика обслуживания представляет собой системный подход, обеспечивающий управление безопасностью полетов в государстве, состоящий из взаимосвязанных компонентов. Внедрение поставщиками обслуживания СУБП в соответствии со Стандартами и Рекомендуемой практикой ИКАО будет способствовать созданию единого механизма по обеспечению государством приемлемого уровня эффективности безопасности полетов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Приложение 19. Управление безопасностью полетов: к Конвенции о международной гражданской авиации 1944 г. – Монреаль, 2016.
2. Дос 9859. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП) – Монреаль, 2018.
3. Дос 9734. Руководство по организации контроля за обеспечением безопасности полетов: Часть А: Создание государственной системы контроля за обеспечением безопасности полетов и управление этой системой. – Монреаль, 2017.
4. Дос 8335. Руководство по процедурам эксплуатационной инспекции, сертификации и постоянного надзора. – Монреаль, 2010.
5. Дос 9735. Руководство по непрерывному мониторингу в рамках Универсальной программы проверок организации контроля за обеспечением безопасности полетов. – Монреаль, 2014.
6. Дос 10004. Глобальный план обеспечения безопасности полетов, 2020–2022 гг. – Монреаль, 2019.
7. Об утверждении Национальной программы по безопасности полетов гражданской авиации Республики Беларусь [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 22 авг. 2019 г., № 563 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2020.
8. Международное воздушное право и ИКАО : [Текст] / под ред. О.И. Аксаментова; с пред. А.А. Баталова. – СПб. : Институт AERONHELP, 2017. – 451 с.
9. Елисеев, Б.П. Стратегия правовой политики применения приложения 19 «Управление безопасностью полетов» / Б.П. Елисеев, В.Д. Бордунов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 216. – с. 5–10.

Статья поступила в редакцию
14.10.2020

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 систему, улучшающую 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 систему, улучшающую 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.

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.

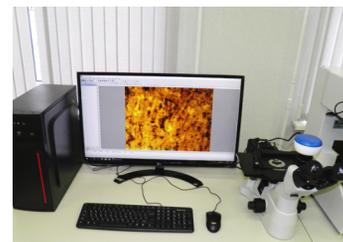


6. **Ультразвуковой дефектоскоп GE Phasor XS.** Предназначен для измерения толщины изделий, координат дефектов и амплитуд сигналов от них, оценки относительных размеров дефектов в сварных соединениях и основном материале, сосудов давления, котлов, транспортных и мостовых конструкций и других объектов. 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 Autoscan.** 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.



ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СТАТЬЯМ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ

К публикации в журнале принимаются оригинальные, достоверные и обоснованные материалы, которые имеют научное и практическое значение, отличающиеся актуальностью и новизной.

Объем текста статьи должен составлять не менее 14 тыс. печатных знаков, но не превышать 30 тыс. печатных знаков (8–14 стр.).

Статьи должны быть выполнены в текстовом редакторе MS Word и отредактированы 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, с. 25]).

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 русском/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).

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.

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. 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).
3. Анкету автора (форму можно посмотреть на сайте академии в разделе НАУКА → Журнал «Авиационный вестник»).
4. 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»:

www.bgaa.by

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

220096, г. Минск, ул. Уборевича, 77

Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации»

Телефон: +375 (17) 345-32-34

e-mail: avia.vestnik@bgaa.by

Подписано в печать 29.12.2020г. Формат 60X84/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 4,16. Тираж 120 экз. Заказ №427.

Отпечатано в типографии Республиканского унитарного предприятия «Научно-практический центр Национальной Академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства» г. Минск, ул. Кнорина,1, корпус 3. Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №3/1501 от 05.06.2017г.