

№ 14 ИЮНЬ 2026

ISSN 2707-6989

БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ

АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ

Авиационный вестник

*The aviation
herald*

Научно-практический журнал

Главный редактор:
И. Г. Яцкевич, к.и.н., доцент, ректор БГАА, Республика Беларусь.

Заместители главного редактора:
Л. И. Гречихин, д.ф.м-н., профессор, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин БГАА, Республика Беларусь;
А. А. Шегидевич, к.т.н., глава администрации Фрунзенского района города Минска, Республика Беларусь;
А. А. Жукова, к.т.н., Республика Беларусь.

Технический секретарь:
С. О. Стойко, начальник авиационного научно-технического центра БГАА, Республика Беларусь.

Редколлегия
Технические науки:
С. А. Чижик, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заведующий отделением теплообмена и механики микро- и наноразмерных систем Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Республика Беларусь;
А. П. Ласковнев, академик НАН Беларуси, д.т.н., главный научный сотрудник ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;
В. Г. Залесский, д.ф.м-н., директор ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;
А. Т. Волочко, д.т.н., профессор, начальник отдела материаловедения и литейно-деформационных технологий ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;
Ю. Ю. Михальчевский, к.т.н., д.э.н., доцент, ректор ФГБОУ ВО СПбГУ ГА, Российская Федерация;
М. М. Хакдод, д.т.н., профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Таджикистан, Республика Таджикистан;
А. Х. Гильмутдинов, помощник Президента Республики Татарстан, д.ф.м-н., профессор, заведующий кафедрой лазерных технологий ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Российская Федерация;
А. А. Рискулов, д.т.н., профессор, декан факультета международных образовательных программ Ташкентского государственного транспортного университета, Республика Узбекистан;
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;
Сунь Яньган, д.т.н., профессор, вице-президент по иностранным делам Шэньянского аэрокосмического университета;
Е. А. Шапорова, к.х.н., доцент кафедры технической эксплуатации воздушных судов и двигателей БГАА, Республика Беларусь;
А. В. Зырянов, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой авиационных двигателей факультета авиационных двигателей, энергетики и транспорта Уфимского университета науки и технологий, Республика Башкортостан.

Юридические науки:
Б. П. Елисеев, д.ю.н., профессор, ректор МГТУ ГА, Российская Федерация;
Б. А. Софарзод, д.ю.н., профессор, Чрезвычайный и Полномочный Посол Республики Таджикистан в Республике Беларусь, Республика Таджикистан;
В. С. Каменков, д.ю.н., профессор, профессор кафедры финансового права и правового регулирования хозяйственной деятельности юридического факультета БГУ, Республика Беларусь;
З. Э. Халилов, к.ю.н., доцент кафедры правоведения НАА, Республика Азербайджан.

Педагогические науки:
Г. М. Булдык, д.пед.н., профессор, профессор кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи, Республика Беларусь;
А. М. Волочко, к.фил.н., д.пед.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории гуманитарного образования НИО, Республика Беларусь.

Психологические науки:
Т. В. Казак, д.псих.н., профессор, член-корреспондент Международной академии психологических наук, заведующий кафедрой инженерной психологии и эргономики БГУИР, Республика Беларусь;
В. Г. Стуканов, к.псих.н., д.пед.н., профессор, заведующий лабораторией проблем воспитания личности НИО, Республика Беларусь;
З. В. Машарский, к.псих.н., декан факультета гражданской авиации БГАА, Республика Беларусь;
О. С. Машарская, к.псих.н., заведующий кафедрой андрагогики факультета дополнительного профессионального образования института повышения квалификации и переподготовки БГПУ, Республика Беларусь.

АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК

Научно-практический журнал

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИЯ В ЛИЦАХ

Феномен женского почерка в небе Великой Отечественной войны 2

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Л. И. Гречихин. Теплопроводность в газообразном, жидком и твердом состояниях 8

З. В. Машарский. Особенности функционирования и перспективы развития системы КОСПАС-SARSAT 15

О. Н. Скрыпник, Р. А. Вишневский. Проблемы правового регулирования использования беспилотных летательных аппаратов в Республике Беларусь: анализ и перспективы совершенствования 21

Ю. А. Шавель, А. И. Рипинский. Технологический процесс изготовления элементов конструкции летательного аппарата из углеволокна 26

А. Г. Капустин, Н. С. Карнаухов. Анализ эффективности аппаратов защиты от несимметрии и обрыва фаз в трехфазных системах электроснабжения воздушных судов. 31

Ю. А. Гурвич, А. С. Галанов, А. П. Акулик, В. В. Воронова, П. В. Тихонова. Выбор критериев колебательной устойчивости движения при проектировании шасси самолета 38

Ю. А. Гурвич, М. А. Сидоренко, О. О. Отчик, С. Н. Прокопович, А. С. Крупецкая, Т. С. Бирюков, В. В. Мазовка. Проектирование колесных транспортных средств на основе критериев колебательной и апериодической устойчивости движения 43

А. С. Маликов. Разработка наглядно-обучающей программы для изучения автоматического радиоконюсаса в составе контрольно-проверочной аппаратуры 50

З. В. Машарский, С. О. Стойко, Д. О. Шпилевский. Нормативно-технические особенности применения беспилотных авиационных систем для перевозки опасных грузов 55

А. А. Санько, В. А. Потапов, М. А. Басов. Построение сильносвязанной интегрированной навигационной системы для высокоманевренного объекта 59

А. Г. Капустин, М. Р. Соловьев. Распределенное динамическое переназначение целей для ускоренного построения трехмерной формации роя беспилотных воздушных судов 64

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

М. С. Ильясова. Психологические факторы мотивации операторов человеко-машинных систем при высокой зрительной нагрузке 72

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

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ»

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

CONTENTS

AVIATION IN PERSONS

The Phenomenon of Female Handwriting in the Skies of the Great Patriotic War 2

TECHNICAL SCIENCES

L. Gretchikhin. Thermal Conductivity in Gaseous, Liquid, and Solid States 8

Z. Masharsky. Operational Features and Development Prospects of the Cospas-Sarsat System 15

O. Skrypnik, R. Vishnevsky. Problems of Legal Regulation of the Operation of Unmanned Aerial Vehicles in the Republic of Belarus: Analysis and Prospects for Improvement 21

Yu. Shavel, A. Ripinsky. Technological Process for Manufacturing Carbon Fiber Aircraft Construction Elements 26

A. Kapustin, N. Karnaukhov. Analysis of the Effectiveness of Protective Devices Against Unsymmetry and Phase Loss in Three-Phase Power Supply Systems of Aircraft. 31

Yu. Gurvich, A. Galanov, A. Akulik, V. Voronova, P. Tikhonova. Selection of Oscillatory Stability Criteria in Aircraft Landing Gear Design 38

Yu. Gurvich, M. Sidorenko, O. Otchyk, S. Prokopovich, A. Krupetskaya, T. Biryukow, V. Mazovka. Design of Wheeled Vehicles Using Criteria of Oscillatory and Aperiodic Stability of Movement. . . 43

A. Malikov. Development of a Visual Training Program for Studying an Automatic Radio Compass as Part of Test and Check Equipment 50

Z. Masharsky, S. Stoiko, D. Shpileuski. Regulatory and Technical Specifics of Unmanned Aircraft Systems Utilization for the Transport of Dangerous Goods 55

A. Sanko, V. Potapov, M. Basov. Building a Strongly Connected Integrated Navigation System for a High-Maneuverability Object. 59

A. Kapustin, M. Solovyov. Distributed Dynamic Goal Reassignment for Fast 3D Formation Acquisition of UAV Swarms. 64

PSYCHOLOGICAL SCIENCES

M. Ilyasova. Psychological Factors Influencing Motivation in Human–Machine System Operators Under High Visual Load. . . . 72

Educational establishment
BELARUSIAN STATE ACADEMY OF AVIATION

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

Колонка главного редактора



**Яцкевич
Игорь Георгиевич**

Ректор
Белорусской
государственной
академии авиации

Каждый новый год приносит обществу особые смыслы и акценты, отражающие важнейшие направления развития государства. В Республике Беларусь 2026 год объявлен Годом белорусской женщины, что символизирует важный и значимый вклад женщин в укрепление семьи, воспитание подрастающего поколения, развитие экономики, науки, культуры и общественной жизни страны.

Не является исключением и отечественная авиация. На всех этапах ее истории женщины стремились покорять небо наравне с мужчинами, демонстрируя высокий профессионализм, целеустремленность и преданность избранному делу. Сегодня женщины успешно реализуют себя в качестве пилотов, диспетчеров управления воздушным движением, инженеров, преподавателей и научных сотрудников. Их знания, ответственность и инициативность вносят весомый вклад в обеспечение безопасности полетов, развитие авиационной науки и подготовку высококвалифицированных специалистов для отрасли.

Говоря о роли женщины в авиации, невозможно не обратиться к героическим страницам истории. Значимое место в ней занимает период Великой Отечественной войны, когда на хрупкие женские плечи легли тяжелейшие испытания военного времени. Среди женщин были летчицы, штурманы, связисты, механики и другие специалисты авиационных подразделений. В тяжелых условиях военного времени они проявляли исключительное мужество, выполняли сложнейшие боевые задачи и нередко совершали подвиги, ставшие частью общей истории Победы. Именно этим выдающимся страницам истории посвящен материал первого номера журнала – «Феномен женского почерка в небе Великой Отечественной войны», рассказывающий о белорусских летчицах, их судьбах и боевых подвигах.

Пусть четырнадцатый выпуск «Авиационного вестника» станет еще одним свидетельством преемственности поколений, уважения к историческому наследию и признания вклада белорусских женщин в развитие авиации. Достижения предшествующих поколений и наших современников являются важной частью истории Отечества и прочным фундаментом для дальнейшего развития Республики Беларусь.

ФЕНОМЕН ЖЕНСКОГО ПОЧЕРКА В НЕБЕ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ

История авиации пишется на языке летно-технических характеристик, схем и чертежей воздушных судов, навигации и локаций. Но есть в истории авиации и другой язык, язык храбрости и мужества, стойкости и строгости, красоты и легкости, вдохновения и дерзаний. Это язык людей: летчиков, конструкторов, инженеров, диспетчеров, бортпроводников и многих других авиаторов. У этого языка нет пола, нет расы и нет убеждений, этот язык объединяет весь мир под своим крылом.

Сегодня женщины в авиации — это не что-то новое или диковинное, это та реальность, к которой мы стремились на протяжении многих лет. Но каков был этот мир раньше? 20, 50, 80 лет назад? Он не так сильно отличался от нашей современности. Женщины в авиации были всегда. Их вклад переоценить или недооценить сложно, а скорее невозможно. В этой статье мы хотим вспомнить судьбы наших соотечественниц во время Великой Отечественной войны. Не бросаясь в крайности лирики и сухой статистики, без претензий на возвеличивание и идеализацию. Простые девушки с обычными жизнями, мечтами и целями. Они выбрали форму вместо платьев, казарму вместо мягкой постели, адские условия вместо семейной жизни и огромные стальные летающие машины вместо домашнего уюта.

20 февраля 1921 года в Гомеле родилась **Докутович Галина Ивановна**. Галя очень любила литературу, благодаря ей девочка с ранних лет начала вести свой дневник. По рассказам о ее жизни, наполненной трепетными, яркими и эмоциональными моментами, мы можем отследить не только ее судьбу, но и историю Великой Отечественной войны.

Вторым увлечением Галины стал спорт — художественная гимнастика. «Добиваться высоких целей и идти до конца» — вот ее девиз. Она стала луч-

шей в школе, лучшей в Гомеле, лучшей в Республике. И, наверное, могла бы получить еще более высокие регалии.

Случилась новая любовь — авиация. Гомельский аэроклуб стал для Галины взлетной полосой в новом этапе жизни: полет на планере, парашютный спорт, первый самостоятельный полет на самолете. В истории Гомельского аэроклуба Докутович Галина стала первой женщиной, которая совершила самостоятельный полет. Небо настолько привлекло девушку, что в 1938 году она поступает в Московский авиационный институт. Но какие бы планы на свою жизнь она не строила, все они перечеркнулись одним сообщением: «...Сегодня, в 4 часа утра, без предъявления претензий и объявления войны, германские войска напали на СССР...».

Спорт закалил Галю, аэроклуб дал все необходимые навыки и знания. Девушка думала недолго и ушла на фронт. Первые дни войны были тяжелыми для всех: никто не сталкивался с такой человеческой жестокостью и ужасом войны. Солдатам нужно было в кратчайшие сроки пройти обучение военному делу и пилотированию самолета, научиться обращаться с оружием. Сильное давление оказывала и обстановка вокруг: шум боев, крик людей, тишина сожженных деревень, вой самолетов и запах смерти в воздухе. Но солдаты женских авиационных полков рук не опускали, как бы тяжело им ни было. Человек — это не машина, и просто заменить детали и отправить его в бой не получится. Каждый день — день выживания, день выносливости, день борьбы с собой и с врагом. В один из таких обычных дней, после продолжительного полета, Галина легла отдохнуть в высокую траву на аэродроме. На спящую девушку наехал бензовоз, который торопился заправить новую боевую машину к заданию.

Болезненное лечение, долгая реабилитация и нет перспективы снова вернуться в небо. Галина снова проявляет мужество, храбрость и силу духа. Подделав медицинскую справку, возвращается в небо, с неопишуемой болью в спине и ногах. Ко всему этому, ей приходилось летать с постоянной головной болью и головокружением.

Рассказывая о мужестве и храбрости, хочется подчеркнуть женственность девушки на войне. В перерывах между боевыми вылетами Галина успевала редактировать литературный журнал полка, в котором печатались ее рассказы.

1 августа 1943 года в штаб пришло сообщение: «Было произведено по заданным целям 15 самолето-вылетов, сброшено на врага 140 бомб. С задания не вернулось 4 экипажа: Высоцкая, штурман Докутович...». 120 боевых вылетов, множество пораженных целей, отличная служба, красота и талант — все это можно сказать о ней, о Галине Ивановне Докутович. Она не вернулась с войны, она осталась там, в небе



Рисунок 1 — Докутович Галина Ивановна

сражений, а память о ней храним мы, люди, чтившие ее имя; улицы, названные ее именем; книги и фильмы про ее жизнь.

Говоря о летчиках и летчицах, не стоит забывать и о техническом составе, без которого ни один полет не осуществился бы. Как говорят авиаторы, только слаженная работа всех звеньев цепи позволит самолету подняться в небо и приземлиться на аэродром. **Фрума Лейбовна Певзнер** — инженер-авиамеханик и уроженка Могилева. Фрума Лейбовна стала механиком по собственному желанию, а не из-за военных обстоятельств. Отучившись в алматинском вузе и получив все необходимые навыки, на войне двадцатилетняя девушка показала себя грамотным и профессиональным специалистом, с холодным расчетом и трезвым взглядом на сложные ситуации.

Пройдя весь путь — от завода до перрона, Фрума хорошо разбиралась в системах самолета и знала двигатель как свои пять пальцев. Готовить к полетам и обслуживать штурмовик Ил-2 приходилось часто под открытым небом, в холод, снег и дождь. Не было времени на раздумье: часто ремонтировали воздушные суда тем, что попадет под руку, иногда тем, что смогли изобрести механики. А бывало и такое, что из-за нехватки людей одному инженеру надо было выполнять работу двух-трех человек, обслуживать сразу несколько самолетов. Адский труд, с которым девушка стойко справлялась, не жаловалась и не боялась трудностей, а гордилась и вдохновлялась своей работой.



Рисунок 2 — Фрума Лейбовна Певзнер

Самое трудное для Фрумы было ожидание самолета с задания и волнение за летчиков. Казалось бы, отправил самолет и иди к следующему, летчик со всем справится сам, но каждый вылет для девушки становился особенным. Ведь не всегда можно было починить технику качественно, во время боев ремонт авиационной техники проводили по всем регламентам. Быстрые руки и ясные умы техников творили невозможное. Двадцатилетняя девушка не отставала от старших наставников и смело брала ответственность на свои плечи. На счету Фрумы Лейбовны Певзнер — 103 самостоятельных боевых вылета самолета.

Весть о победе застала Фруму под Веной. В ночь дежурства 8—9 мая штаб сообщил о победе в Великой Отечественной войне. Раннее время не могло остановить девушку, поэтому она сразу разбудила всех однополчан и сообщила радостную новость.

Праздник победы прервало указание из штаба: «...на шоссе Вена — Линц были замечены немцы, обезвредить и не дать им вернуться...». Инженеры подготовили самолеты, летчики направились к цели. После выполнения задания наши солдаты еще никогда не возвращались домой так быстро и легко. Победа же!

За свою жизнь девушка побывала в самых разных и отдаленных уголках СССР, обслуживая и готовя самолеты к боевым заданиям. По окончании войны Фрума Лейбовна тоже готовила самолеты, но уже к мирным парадом. После демобилизации вернулась в родной Могилев и устроилась на работу в газету «За Радзіму». Продолжила жизнь под мирным небом, которое она подарила себе, своей семье, родному городу и всем нам!

Война по-разному оставила свой след в судьбах людей. Иногда не патриотизм, не желание закончить войну и не героизм побуждают тебя воевать. Таким случаем оказалась история **Ивановой Марии Наумовны**. Немцы сожгли родную деревню, расстреляли брата и отца, младшего брата и сестру забрали в плен, а жизнь матери оставалась под вопросом, пока была жива Мария. Желание отомстить — вот что, помимо любви к Родине, заставило Марию сделать свой выбор.

Мария Наумовна родилась в 1920 году в деревне Харпинчи, Витебской области. По образованию была медсестрой. Война застала ее в госпитале. Девушка осознавала важность медперсонала и его работы, но она не могла просто залечивать раны и слышать гул самолетов, она хотела идти в бой, защищать страну и людей, помочь в окончании войны другим путем — военным. В марте 1943 года желание девушки осуществилось, ее забрали на фронт и Мария стала пилотом самолета По-2.



Рисунок 3 — Иванова Мария Наумовна

Конструкция самолета не предусматривала места для штурмана ввиду неудобства для пилота во время пилотирования, проводку бомбометания провели для второго члена экипажа. Стоит еще отметить невероятное мужество всех пилотов, управляющих этими машинами, так как По-2 был не самым стойким самолетом в небе: низкая высота полета и деревянный каркас делали его беззащитным при боевых атаках противников.

Бесстрашие и организованность Маши помогли ей заработать большое уважение среди сослуживцев. Она всегда была готова к бою, складывалось ощущение, что усталость и отдых ей чужды. В полку рассказывали случай, как во время одного боя ей пробили маслбак. Масло хлынуло на Марию и сильно обожгло ее ноги. Сила девушки поразила командира: несмотря на боль, она успешно закончила миссию.

10 июня 1943 года Мария Наумовна вылетела по заданию: нанести удар по артиллерийским складам немцев в районе Старой Руссы. Первую волну вражеских истребителей Мария виртуозно обошла и осталась незамеченной. Вторую волну тоже прошла скрытно. И как только экипаж Ивановой нашел цель, небо подсветилось прожекторами, залп из всех орудий со стороны складов. И в этот раз Марии удалось прорваться сквозь море снарядов. Миссия была выполнена — бомбы сброшены. Немцы всей своей мощью атаковали самолет Марии. Бомбардировщик подбить удалось, пилот Иванова резко потеряла управление над машиной. За 300 метров до земли ситуацию удалось взять под контроль и довести самолет до аэродрома. Только подлетая к месту посадки, Мария поняла, что смертельно ранена. Из самолета выйти она уже не смогла, мертвое тело девушки вынес санинструктор. Последние слова Марии: «Это вам, гады, за отца, сестру, брата и за родную Беларусь».

У Маши не осталось родных, семью Ивановых целиком забрала война. После смерти веселой девушки осталась история героизма и самоотдачи, история бесстрашия и смелости. История Марии, которая отомстила за свою семью, стала примером для сослуживцев и гордостью семейства Ивановых.

Не забывать свою Родину, в каком уголке планеты ты бы ни был, вот это и есть настоящая любовь к Родине. Примером такой любви является история **Лисициной Валентины Михайловны**. Она родилась 16 февраля 1921 года в Минске. Через пару лет ее семья решила переехать в Москву, и всю свою сознательную жизнь девушка прожила там. Уже в Москве, будучи девятиклассницей, она познакомилась с авиацией и пошла в аэроклуб Пролетарского района Москвы. По завершении обучения девушка стала инструктором; все ученики и коллеги отзывались о ней как о хорошем специалисте и грамотном пилоте.

Наступила война, обучение молодых асов ушло на второй план: стране нужны были опытные и бесстрашные пилоты. Таким пилотом стала Валентина Михайловна. В звании младшего лейтенанта она стала командиром полка, защищала небо Саратова, дальше были Воронеж, Курск, Киев, Житомир и Будапешт. За время войны Валентина совершила 160 боевых вылетов, сбила один вражеский самолет. Летала на истребителях семейства Як.

Валентина Михайловна прошла войну, гордо неся звание пилота. Девушка показала отличные командирские навыки, стойкую выдержку, высокий уровень профессионализма и безграничный героизм.

История наполнена великими именами. Таким именем стала **Вера Федоровна Ломако**. Еще до войны девушка зарекомендовала себя как исключительного человека, с поражающим упорством и силой характера. Вера прошла большой путь и всю жизнь обучалась — в этом была ее сила и ее главный навик.



Рисунок 4 — Лисицина Валентина Михайловна

Вера Федоровна родилась 25 декабря 1913 года в Омске. Казалось бы, в этой статье должны быть женщины-авиаторы из Беларуси, но дело в том, что ее отца, белорусского железнодорожника, сослали в Сибирь за революционную деятельность, ее мать не бросила мужа и поехала за ним на суровую землю. Поехала не одна, а с маленькой Верой под сердцем. Уже в 1920-е семья Ломако вернулась обратно на Родину, в Гомель.

Вера была очень озорной и находчивой девчонкой. Сила ее ума, характера и духа поражала всех, кто с ней знакомился. Окончив семь классов школы, девушка решила помогать семье и устроилась на работу в «Гомсельмаш».

Работая в литейном цехе, девушка грезил о небе, и одновременно с работой проходила обучение в Гомельском аэроклубе. Просто быть летчиком и выполнять штатные задания не привлекало Веру. Летчик-испытатель — истинное призвание девушки: проверка самолета на прочность, проверка его летных характеристик, максимальные высоты и скорости, аварийные ситуации и выход из них. И вот первое препятствие на пути к мечте — отказ в обучении в Военно-летной академии: мол, не женское это дело.



Рисунок 5 — Ломако Вера Федоровна

Согласиться с таким ответом в планы Веры не входило, и девушка написала напрямую Ворошилову с просьбой взять ее на учебу. Такому напору Климент Ефремович был удивлен и допустил девушку

до службы. В свои неполные 17 лет Вера Федоровна начала путь летчика не как любитель, а как полноценный специалист.

После успешного окончания Ленинградской школы последовала Качинская школа. И в 1934 году ее направили проходить службу в истребительную авиационную бригаду Белорусского военного округа. Завоевать доверие у мужского состава получилось быстро: Вера уже в первых полетах показала свои уверенные навыки в пилотировании. Напомним, девушка всегда любила учиться и в части, увидев новые, еще неизученные ею самолеты И-3 и И-5, принялась за изучение их конструкции. Помогал ей в этом на тот момент опытный летчик Петр Башмаков, а в последующем — муж Веры Ломако.

Здесь же, в Беларуси, Вера познакомилась с Полиной Осипенко — боевым товарищем, верной подругой и опытной летчицей. Они вместе были отправлены в Севастопольский авиационно-морской отряд, где изучали гидросамолеты под руководством Чкалова и Коккинаки. 2 июня 1938 года Полина Осипенко, Вера Ломако и Марина Раскова совершили первый в истории авиации дальний беспосадочный перелет Севастополь — Архангельск. Время перелета — 10 часов 33 минуты. Совершенный ими рекорд не был так прост, как, возможно, показалось сразу: погодные условия, видимость и в целом конструкция самолета не давали девушкам расслабиться ни на минуту полета. Попеременно сменяя друг друга за штурвалом гидросамолета, девушки только сообщая смогли совершить такой перелет и войти в историю мировой авиации.

Великую Отечественную войну Вера Федоровна прошла до самой победы, выполняя боевые задания и командуя авиационными эскадрильями. На ее счету — 7 сбитых немецких самолетов, а после ранения и реабилитации она с истребителя пересела на бомбардировщик. Обороняя небо всего Советского Союза, девушка приложила свои силы и для освобождения родной Беларуси, став участницей операции «Багратион». За время войны Вера Федоровна проявила себя не только как профессиональный летчик-испытатель, но и как грамотный командир, бесстрашный солдат, летчик бомбардировщика и простая девушка с очень сильным характером.

Во время своего летного пути летчица получила множество наград и благодарностей за то, какая она есть и за то, каким она делает гордое звание женщины-летчика. Такая популярность не вскружила девушке голову, а наоборот дала мотивацию совершенствоваться с каждым днем и проявлять себя только в лучших действиях. После войны Вера вела тихую и спокойную жизнь, она отошла от дел, но всегда имела свою точку зрения на важные авиационные события, к ней прислушивались и с ее мнением считались.

История Великой Отечественной войны таит в себе тысячи женских судеб. Как бы грустно ни было это признавать, но у войны вынужденно стало и женское лицо тоже. Совмещать в себе нежность и силу, хрупкость и отвагу, ум и красоту, страх и героизм под силу не каждой. Но те девушки, которые сделали этот выбор, оставили неизгладимый след в истории авиации, в истории военного дела. Мы чтим и помним их, заботимся об их наследии, с уважением рассказываем о них следующим поколениям.

Эта работа представляет собой маленький кусочек исследования белорусских женщин в годы Великой Отечественной войны; о каждой сказать невозможно, но попытаться стоит. На примерах строится наш характер и закаляется разум, такими примерами сегодня стали: Галина Докутович, Фрума Певзнер, Мария Иванова, Валентина Лисицина и Вера Ломако. Пусть история этих девушек оставит свой след в сердце, а память о них пронесется с вами через целую жизнь сквозь страницы истории.

Материал подготовлен
лаборантом сектора научных исследований
авиационного научно-технического центра,
курсантом группы М121
Д. М. Кислюк



Учреждение образования
«Белорусская государственная
академия авиации»



Специальность
05.22.14
Эксплуатация
воздушного транспорта

Аспирантура Эксплуатация воздушного транспорта

Аспирантура академии авиации – это кузница научных кадров высшей квалификации: исследователей и преподавателей авиационной отрасли.

Научная квалификация «Исследователь»

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

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

Обучение в аспирантуре

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

Период обучения

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

Преимущества получения образования

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

Требования к кандидатам

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

**Приглашаем будущих
лидеров отрасли!**

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



ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ГАЗООБРАЗНОМ, ЖИДКОМ И ТВЕРДОМ СОСТОЯНИЯХ

THERMAL CONDUCTIVITY IN GASEOUS, LIQUID, AND SOLID STATES

Гречихин Леонид Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
gretchihin@yandex.ru.

Leonid Gretchikhin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Natural Science and General Professional Disciplines of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
gretchihin@yandex.ru

Аннотация: В статье рассматриваются ограничения классического подхода к описанию процессов теплопереноса, основанного на уравнении теплопроводности, и показана его несостоятельность при анализе комплексного распространения тепла в неоднородных и многокомпонентных средах. Отмечается, что традиционные модели не в полной мере учитывают особенности микроструктуры вещества и взаимодействие между его элементами, что снижает точность расчетов, особенно в условиях нестационарных и высокоградиентных процессов, характерных для авиационной техники.

В качестве альтернативного подхода предложено использование вектора Умова, позволяющего более универсально описывать перенос тепловой энергии. Данный метод обеспечивает возможность моделирования процессов теплопередачи в различных агрегатных состояниях вещества, включая газовые, жидкие и твердые среды, с учетом граничных условий и направлений потоков энергии. Это особенно важно при анализе тепловых режимов элементов авиационных конструкций, таких как силовые установки, обшивка летательных аппаратов и системы охлаждения.

В работе рассмотрены особенности распространения тепла в средах с кластерной структурой вещества. Получены аналитические зависимости, описывающие процессы теплопереноса и нагрева с учетом структурных характеристик среды. Предложенные расчетные формулы могут быть использованы при проектировании и оптимизации авиационных систем, повышая надежность и эффективность эксплуатации летательных аппаратов.

Ключевые слова: теплопроводность, уравнение теплопроводности, вектор Умова, агрегатные состояния, кластер.

Abstract: the paper examines the limitations of the classical approach to heat transfer based on the heat conduction equation and demonstrates its inadequacy for describing complex heat propagation in heterogeneous and multicomponent media. It is shown that conventional models do not fully account for the microstructural features of matter and interactions between its elements, which reduces the accuracy of calculations, especially under non-stationary and high-gradient conditions typical for aerospace applications.

As an alternative approach, the use of the Umov vector is proposed, providing a more universal framework for describing thermal energy transfer. This method enables the modeling of heat transfer processes in different states of matter, including gaseous, liquid, and solid media, taking into account boundary conditions and energy flux directions. This is particularly important for analyzing thermal regimes of aerospace components, such as propulsion systems, aircraft skin structures, and cooling systems.

The paper also considers the features of heat propagation in media with a clustered structure. Analytical relationships describing heat transfer and heating processes are obtained, taking into account the structural characteristics of the medium. The proposed calculation formulas can be applied in the design and optimization of aerospace systems, improving the reliability and operational efficiency of aircraft.

Keywords: thermal conductivity, heat conduction equation, Umov vector, aggregate states, cluster.

Введение

Классическая теория теплопроводности была разработана Фурье, который показал, что такое явление можно описать следующим уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где $\chi \cong \bar{l} / c, \rho$ – коэффициент температуропроводности, пропорциональный длине свободного пробега $\bar{l}$ и обратно пропорциональный удельной теплоемкости c_v и плотности среды ρ , т. е., зависящий от материала и его физического состояния, может быть определен в каждом конкретном случае опытным путем, поэтому не является универсальной постоянной величиной [1].

Решение дифференциального уравнения вида (1) возможно при наличии заданных граничных и начальных условий. Если для однородного и изотропного материала можно задать эти условия и их как-то проконтролировать, то для неоднородных, анизотропных, а тем более для многослойных сред разных структур и агрегатных состояний это практически осуществить невозможно. Причины здесь следующие.

При разогреве и остывании среды определенного агрегатного состояния вдоль выбранного направления распространяется тепло. Тепло — это внутренняя энергия, которая распределена по разным степеням свободы. В каждом агрегатном состоянии реализуются вполне конкретные степени свободы, которые реагируют на внешнее воздействие по-разному. В этой связи возникла цель: разработать модель распространения тепла в разных средах с учетом физических и химических свойств, присущих данной среде. Цель может быть достигнута путем решения следующих задач:

- при распространении тепла учитывать не только атомно-молекулярную структуру рассматриваемой среды, но и ее кластерную структуру;
- распространение тепла следует рассматривать с позиций распространения тепловой энергии по заданной среде;
- теплоемкость рассматривать с учетом вероятности возбуждения степеней свободы каждой частицы, формирующей среду;
- распространение тепла рассматривать с учетом изменения агрегатного состояния, структуры среды и ее теплоемкости от температуры;
- выяснить, какие процессы теплообмена происходят на границах раздела разных агрегатных сред.

Поставленная цель и задачи, которые необходимо решать при распространении тепла во всей их совокупности, представляют весьма сложную проблему. Очевидно, что для каждого агрегатного состояния следует учитывать свою специфику взаимодействия атомных, молекулярных и кластерных частиц. Ниже рассмотрим, как решаются задачи применительно к каждому агрегатному состоянию.

Газообразная среда

Применительно к газам уравнение теплопроводности (1) решается с учетом эмпирической формулы, предложенной Экеном:

$$\bar{l} = 10^2 \frac{\eta c_v}{M} \left(1 + \frac{9R}{4c_v} \right), \quad (2)$$

где η — динамическая вязкость, Па·с;

M — молярная масса, кг/моль;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

c_v — теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(кг·К) [1].

Как меняется динамическая вязкость газовой среды и удельная теплоемкость в зависимости от температуры, остается вне рассмотрения. Относиться к эмпирическим формулам при более глубоком рассмотрении процесса теплопередачи следует весьма осторожно.

Общая задача распространения тепла в газах с применением молекулярно-кинетической теории ре-

шена, и в результате получен закон распространения тепла в виде

$$Q = K \frac{dT}{dl} St, \quad (3)$$

где $K = \frac{1}{3} \rho c_v \bar{c} \bar{l}$ — коэффициент теплопроводности, зависящий от плотности газа ρ и удельной теплоемкости c_v , Вт/(м·К);

$\bar{c} = \sqrt{\frac{\gamma k_B T}{m_a}}$ — скорость распространения звука в газе, м/с;

$\bar{l} \approx \frac{1}{\sqrt{2} \pi D^2 n}$ — длина свободного пробега, которая обратно пропорциональна концентрации частиц в газе n и квадрату среднего диаметра частиц газа D^2 , м;

$\frac{dT}{dl}$ — градиент температуры, К/м;

S — площадь, по которой происходит перенос тепла, м²;

t — время, в течение которого происходит перенос тепла, с.

В уравнении теплопроводности коэффициент теплопроводности зависит от основных параметров, которые характеризуют газовое состояние. Все эти параметры при заданном градиенте температуры зависят от величины температуры, которая изменяется по мере распространения тепла вдоль выбранного направления. Получается, что уравнение теплопроводности (3) позволяет определять количество тепла только на начальном участке и в начальный момент при заданном градиенте температур. Однако внутри газовой среды ситуация весьма неоднозначная. Поэтому воспользуемся более общим подходом, предложенным Умовым. Вектор Умова позволяет получить величину потока энергии вдоль выбранного направления по следующей формуле:

$$\vec{P}_r = [\vec{w} \vec{v}], \text{ Вт/м}^2. \quad (4)$$

Для газовой среды плотность энергии определяется ее внутренней тепловой энергией:

$$w = \frac{i}{2} k_B T \cdot n, \quad (5)$$

а скорость распространения:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma k_B T}{m_a}}. \quad (6)$$

Для большинства практических задач давление полагается постоянным ($P = \text{const}$), и среднеэффективный вектор Умова приобретает вид в абсолютном значении

$$P_r = \frac{i}{2} P \sqrt{\frac{\gamma k_B T}{m_a}}, \quad (7)$$

где P — давление в газе, Па;

$\gamma = C_p/C_v$ — отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме;

i — число степеней свободы.

Изменением отношения теплоемкостей с температурой можно пренебречь, а изменение количества степеней свободы, вовлекаемых внутри газа при заданной температуре, будет существенным, т. к.

$$i = \sum_k i_k W_k, \quad (8)$$

где i_k — количество k -й степени свободы;

$$W_k = \int_{E_{св,k}}^{\infty} f(E, T) dE - \text{вероятность возбуждения } k\text{-й}$$

степени свободы;

$f(E, T)$ — функция распределения по энергиям Максвелла — Больцмана.

Все газы, и даже гелий, состоят из молекул. Внутренняя тепловая энергия содержится в поступательных, вращательных и колебательных степенях свободы. Вероятность возбуждения поступательных степеней свободы равна единице, т. к. для газов энергия связи между частицами по определению газового состояния равна нулю. В газах вероятность возбуждения вращательных степеней свободы также равна нулю вследствие отсутствия трения между частицами газа. Только для колебательных степеней свободы вероятность их возбуждения отлична от нуля и определяется энергией связи между атомами в молекулах газа. Поэтому для двухатомных газов, в пренебрежении возбуждения колебательных степеней свободы, $i = 5$, а для многоатомных молекул $i = 6$.

При низких температурах следует учитывать образование кластеров и их взаимодействие. В данном случае количество возбуждаемых степеней свободы находится следующим образом:

$$i = \frac{1}{\sum_j n_j} \sum_j \sum_k n_j i_k W_k, \quad (9)$$

а при определении плотности энергии по (5) следует учитывать уменьшение общей концентрации частиц при образовании кластеров. В этом случае

$$n = n_0 \left(1 + \sum_{\zeta} N_{\zeta} - \sum_{\zeta} N_{\zeta} W_{\zeta} \right), \quad (10)$$

где $n_0 = 1 / r_{\text{кл}}^3$;

N_{ζ} — число частиц в ζ -м координационном слое;

$$W_{\zeta} = \int_0^{E_{св,\zeta}} f(E, T) dE - \text{вероятность того, что частица}$$

ζ -го координационного слоя пребывает в кластере.

По (9) и (10) определяются число степеней свободы и концентрация частиц в промежуточной зоне, когда в определенном температурном интервале происходит постепенный переход газового состояния в жидкое состояние. В жидком состоянии ситуация усложняется.

Жидкая среда

В жидком состоянии перенос тепла также определяется путем решения уравнения теплопроводности (1) с использованием эмпирических формул определения длины свободного пробега при разных температурах. Такой метод является приближенным и не отражает реальных процессов, происходящих в жидкостях при распространении тепла. Поэтому применение вектора Умова для описания распростра-

нения тепла в жидкой среде представляется более плодотворным. Плотность тепловой энергии также определяется формулой (5), а число степеней свободы, возбуждаемых в жидкостях, — по (9). Однако в формуле (5) следует учитывать, что концентрация частиц в межкластерных объемах резко уменьшается из-за существенного роста числа частиц в кластерных образованиях. Следовательно, в жидкостях присутствуют два сорта частиц: 1) молекулы, взаимодействующие между собой ковалентной и ионной связью с учетом электрон-дипольного и диполь-дипольного взаимодействия, и 2) кластерные образования преимущественно с первым координационным слоем.¹⁾

В теплотехнике в качестве теплоносителя преимущественно применяется вода, которая обладает максимальной теплоемкостью. Поэтому все необходимые теплотехнические расчеты выполним для воды в жидком состоянии. Молекула воды показана на рисунке 1. Среднеэффективный радиус молекулы воды по данным, указанным на рисунке 1, составляет приблизительно 0,926 Å. Овалом выделена область повышенной электронной плотности между атомами кислорода и водорода. В плотноупакованном состоянии, которое реализуется в кластерах, расстояние между молекулами воды составляет 1,852 Å. Расстояние между кластерами воды в жидком состоянии определяется по значению плотности. Для молекул

воды $r_0 = \sqrt[3]{\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{8\rho}}$. В нормальных условиях $r_0 = 1,552$ Å,

а для эффективного радиуса основного кластера воды получаем $r_{\text{кл}} = 2,969$ Å.

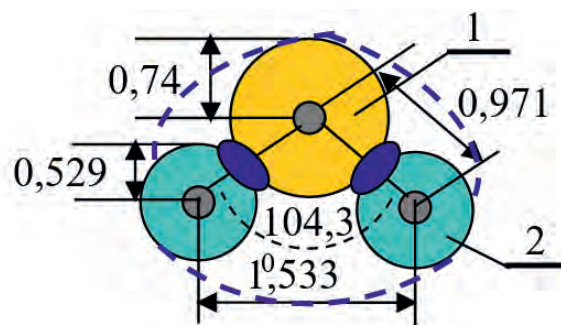


Рисунок 1 — Молекула воды с указанием размеров в Å:

1 — атом кислорода; 2 — атом водорода

По данным справочника [3] энергия ионизации молекулы воды составляет 12,614 эВ. По значению эффективного радиуса и энергии ионизации первой кратности получены энергии ионизации второй и третьей кратности ионизации, а также эффективные радиусы и эффективные заряды молекулы воды второй и третьей кратности ионизации (таблица 1).

По значениям, приведенным в таблице 1, с применением методики, описанной в работе [4], был выполнен расчет энергий связи молекул воды внутри кластера и межкластерного бинарного взаимодействия. Эти значения оказались соответственно равными: $E_{св,1} = 0,178$ эВ и $E_{св,2} = 0,086$ эВ. Свободные молекулы воды в жидком состоянии связаны между собой энер-

¹ Ранее применительно к воде полагали [2], что это осколки нарастающего льда, которые формируются водородной связью. В действительности кластеры взаимодействуют между собой диполь-дипольной связью.

Таблица 1 — Исходные данные для молекулы воды

	Потенциал первой, второй и третьей кратности ионизации, эВ			Среднее удаление электрона от ядра первой, второй и третьей кратности ионизации, Å			Эффективный заряд ядра первой, второй и третьей кратности ионизации			Дипольный электрический момент для молекулы в дебаях (D)
	Θ_1	Θ_2	Θ_3	$r_{p,1}$	$r_{p,2}$	r_s	Z_1^*	Z_2^*	Z_3^*	
H ₂ O	12,6	38,8	77,1	0,93	0,67	0,52	0,81	1,81	2,81	1,85

гией 0,0647 эВ. На поверхности жидкости молекулы окружены шестью молекулами в горизонтальной плоскости и одной молекулой нормально к поверхности. Тогда результирующая энергия связи отдельных молекул на поверхности воды составит 0,45 эВ, что совпадает со значением, полученным из данных по насыщенным парам (0,46 эВ) и из значения сил поверхностного натяжения.

Жидкое состояние возникает, когда $E_{св,1} \geq 3k_B T_{ж}$. При температуре кипения энергия бинарной связи ослабляется на величину

$$E_{кнп} \cong 3k_B T_{кнп} = 0,0964 \text{ эВ}, \quad (11)$$

а при температуре плавления — на величину

$$E_{пл} \cong 3k_B T_{пл} = 0,0706 \text{ эВ}. \quad (12)$$

В промежутке между температурой кипения 373 К и температурой таяния льда 273 К вода пребывает в жидком состоянии. Получается, что бинарная связь между кластерами в жидком состоянии настолько сильно ослабляется, что они между собой практически не взаимодействуют и являются свободными. В диапазоне температур, где реализуется жидкое состояние, плотность тепловой энергии определяется также по (5), но с учетом (9) и (10). Тогда

$$w_{ж} = \frac{i}{2} k_B T_{эфф} n, \quad (13)$$

где n — общая концентрация частиц.

Свободные молекулы воды обладают трансляционным движением и, сталкиваясь с кластерами, осуществляют обменную связь, которая обладает сферической симметрией. Возникающие сферически симметричные силы взаимодействия на равновесном расстоянии препятствуют объемному сжатию и одновременно способствуют свободному растеканию жидкости во все стороны. Свободные двухатомные молекулы в жидком состоянии содержат три поступательные и две вращательные степени свободы, а трехатомные молекулы обладают тремя поступательными и тремя вращательными степенями свободы. Кластеры в жидком состоянии обладают тремя колебательными и тремя крутильными колебательными степенями свободы.

Распространение тепла в жидкостях (при отсутствии лучистого теплообмена) определяется скоростью распространения звука. Обычно скорость звука в воде находят по эмпирической формуле $v = \sqrt{\rho k_s}$, где k_s — адиабатный коэффициент сжатия. Для каждой конкретной жидкости адиабатный коэффициент сжатия определяется опытным путем. Это результат

того, что жидкое состояние недостаточно изучено с учетом образования кластерных структур.

В жидкостях распространяются только продольные звуковые волны вдоль нормально приложенной силы. За время dt на жидкость вдоль выбранного направления будет действовать импульс силы Fdt . Под действием такого импульса силы возникнет перемещение некоторой массы жидкости dm со скоростью v . Тогда

$$Fdt = dm v. \quad (14)$$

Если равенство (14) поделить на площадь действия силы S , то получаем импульс давления

$$Pdt = \frac{dm v}{S}. \quad (15)$$

Выражая массу dm через плотность, а давление — через модуль Юнга, с учетом равенства (13), получаем

$$E = \rho v^2. \quad (16)$$

Отсюда для скорости распространения продольных волн сжатия в жидкости

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (17)$$

где E — модуль объемного сжатия, определяемый для плоской волны сжатия следующим образом:

$$E = \frac{[E_{св,1}(r) - E_{св,1}(r_0)]}{2\pi e^2 r_0^3} \frac{3k_B T}{E_{св,1}(r_0) N_{кл}}, \quad (18)$$

где $N_{кл}$ — число частиц в кластере при температуре T .

Среднеэффективный радиус самой молекулы воды составляет приблизительно 0,926 Å, а среднеэффективное расстояние между молекулами, полученное из значения плотности воды, — 1,552 Å. Отсюда доля свободного объема в воде составляет приблизительно 0,79, а если учесть образование кластеров, то эта доля свободного объема в воде возрастет. Следует учитывать, что только свободный объем поддается сжатию. Поэтому при распространении звука в жидкостях максимальный коэффициент сжатия составляет

$$\chi = 1 - \frac{4r_0^3}{r_1^3} = 1 - \frac{4 \cdot 0,926^3}{1,552^3} = 15 \%. \quad (19)$$

В газах сжатие свободного объема молекул может достигать 100 %, а в жидкостях в 7 раз меньше (для воды это только 15 %). По этому параметру жидкость как-бы соответствует газу. Такое сжатие для воды

Таблица 2 — Величина объемного модуля сжатия, скорость распространения звука и коэффициент объемного сжатия в зависимости от температуры

Параметры	Температура, К					
	273	283	293	303	350	373
$E \cdot 10^{-9}$, Па	1,96	2,09	2,20	2,26	2,64	2,86
v , м/с	1401	1446	1482	1503	1625	1692
χ , %	9,80	9,60	9,50	9,55	9,60	9,60

в принципе недостижимо. Реально при распространении звука в воде происходит импульсное сжатие, которое зависит от амплитуды звуковой волны. Чтобы получить зависимость скорости звука от температуры, следует коэффициент сжатия рассматривать как вариационный параметр. При каком импульсном сжатии звуковой волной получаются скорости ее распространения в соответствии с экспериментальными данными (таблица 2). По величине модуля сжатия вода приближается к твердому телу.

Жидкое состояние представляет собой сложную систему взаимодействующих частиц, которые под влиянием внешнего возмущения могут приближаться и расходиться на достаточно большие расстояния. Поэтому молекулы в жидком состоянии совершают хаотическое трансляционное движение внутри жидкости.

На основании (5) и (17) теплопроводность в жидкостях определяется величиной вектора Умова:

$$P_{ж} \approx \frac{1}{2} k_B T n (6W_2 + 3W_1) \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (20)$$

$$\text{Здесь } W_2 = \int_{E_{св} - 3k_B T}^{\infty} f(E, T) dE, \text{ а } W_1 = \int_0^{E_{св} - 3k_B T} f(E, T) dE.$$

Общая схема распространения тепла в одномерном случае изображена на рисунке 2. Под действием потока тепла $P_{ж,1}$ поверхность А рассматриваемого

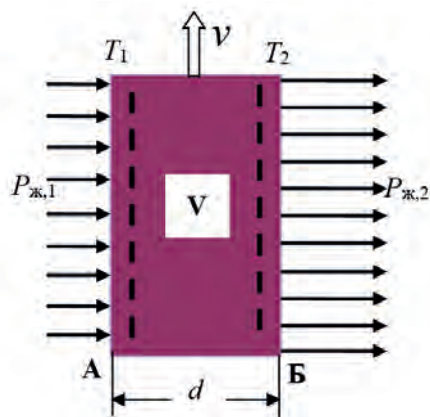


Рисунок 2 — Схема распространения тепла по жидкой среде в одномерном приближении

плоского слоя жидкой среды разогревается до температуры T_1 . Поток тепла $P_{ж,2}$ с поверхности Б обеспечивает температуру T_2 . Если не учитывать процессы разогрева и охлаждения ограничивающих поверхностей, то можно применять уравнение теплопроводности (1). Но такой случай реально в природе не реализуется. Кроме этого, решая уравнение второго порядка, необходимо задавать граничные и начальные условия. Однако их невозможно правильно сформулировать, не зная причин их возникновения в каждом конкретном случае. Рассмотрим разные случаи. При $P_{ж,1} > P_{ж,2}$ осуществляется раз-

зогрев среды. За время t разогрев среды произойдет до температуры

$$T = T_0 + \frac{P_{ж,1} - P_{ж,2}}{\rho d c_V} t. \quad (21)$$

Процесс разогрева происходит непрерывно.

При $P_{ж,1} < P_{ж,2}$ рассматриваемая среда непрерывно должна охлаждаться по закону (21).

Твердое тело

Твердое тело представляет собой кристалл. В кристаллической решетке твердого тела внутренняя тепловая энергия формируется продольными и поперечными колебаниями объемных кластеров. Кроме этого, в свободных объемах между кластерами следует учитывать энергию хаотического поступательного движения частиц и энергию крутильных колебаний кластеров относительно их собственного центра тяжести. Экспериментальное доказательство кластерного строения твердого тела было выполнено Г. А. Месяцем [7]. Результирующая внутренняя тепловая энергия представляется в виде

$$Q = \sum_j \frac{3}{2} W_j E_j = \frac{3}{2} k_B T_{эфф}, \quad (22)$$

где $j = 1$ соответствует энергии поступательных степеней свободы E_1 с вероятностью их возбуждения W_1 ;

$j = 2, 3$ и 4 соответствует энергии и вероятности их возбуждения крутильных, продольных и поперечных колебаний кластеров внутри кристаллической решетки. Если в рассматриваемой среде в каком-либо направлении создается разность температур, то возникает перенос энергии. В самом общем случае перенос энергии определяется вектором Умова по формуле (4).

Плотность тепловой энергии следует определить следующим образом:

$$w = \frac{3}{4\pi r_{кл}^3} \frac{3}{2} k_B T_{эфф}. \quad (23)$$

Ранее при рассмотрении классической теории теплоемкости полагали, что внутренняя энергия в твердом теле определяется только гармоническими

колебаниями отдельных атомов или молекул относительно своих положений равновесия. В результате внутренняя энергия твердого тела в соответствии с законом равномерного распределения тепловой энергии по степеням свободы представлялась только по колебательным степеням свободы в виде $3k_b T/2$ [5]. Чтобы согласовать полученный результат с законом Дюлонга и Пти, таким колебаниям приписывалось еще две степени свободы, обусловленные тем, что в колебательном движении присутствуют две энергии: кинетическая и потенциальная, которые непрерывно превращаются друг в друга в равных количествах.

Такой подход противоречит закону равномерного распределения по степеням свободы, так как температура определяется максимальной энергией, которая содержится в одной степени свободы, а не отдельно в ее доле. Следует учитывать, что всякое поглощение энергии обусловлено возбуждением определенной степени свободы относительно ее энергии связи. При значительной энергии связи между частицами внутри твердого тела их возбуждение практически исключено.

Противоречия классической теории теплоемкости при температурах вблизи абсолютного нуля с экспериментальными данными были устранены квантовой теорией, в которой полагалось, что кристалл целиком совершает колебания как единое целое. Тогда кристалл при низких температурах должен совершать упругие колебания, а в окружающей среде должен распространяться звук. Однако такого явления в природе не возникает.

Следовательно, внутренняя энергия твердого тела определяется не колебаниями отдельных составляющих его частиц или всего кристалла относительно какого-то положения равновесия, а поведением отдельных кластеров и их взаимодействием с разными частицами в твердом теле. При низких температурах внутренняя энергия обусловлена величиной энергии связи частиц третьей координационной сферы с основным кластером. В этом случае все противоречия снимаются, как это продемонстрировано в [6].

В твердых телах отдельные свободные атомы, молекулы или кластеры находятся в межкластерном объеме. Всего частиц в каждом свободном межкластерном объеме присутствует

$$N_{\text{св}} = \sum_i N_i \int_{E_i}^{\infty} f(E, T_{\text{эфф}}) dE. \quad (24)$$

Если возбуждены только поступательные степени свободы, то на одну частицу приходится внутренней энергии $3k_b T_{\text{эфф}}/2 N_{\text{св}}$.

Аналогично определяется энергия, приходящаяся на одну частицу, вращательной и колебательной степеней свободы.

Процесс распространения тепла в твердом теле следует рассматривать как последовательное возбуждение от кластера к кластеру всех степеней свободы, определяющих внутреннюю тепловую энергию по (23). При этом следует учитывать, что воздействие теплового потока осуществляется не непосредственно на чистый материал, а через промежуточный слой оксидов данного материала и слой адсорбированных атомов, молекул окружающей среды и в каждом случае со своей скоростью распространения теплового потока.

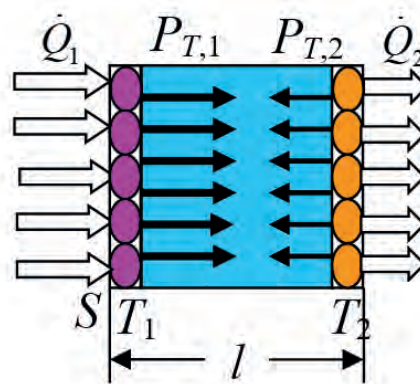


Рисунок 3 — Общая схема распространения тепла по твердому телу

В твердых телах по мере снижения температуры и вследствие взаимодействия атомов друг с другом образуются устойчивые двухатомные молекулы, а затем взаимодействие атомов с двухатомными молекулами приводит к образованию трехатомных молекул. Образующиеся молекулы взаимодействуют между собой, друг с другом и с отдельными атомами. При этом образование трехатомных молекул не может происходить вследствие тройных столкновений атомов друг с другом, а их образование происходит при бинарном взаимодействии атомов с двухатомными молекулами.

Полученные энергии связи при бинарном взаимодействии частиц в молекулярных структурах с учетом их взаимного расположения в процессе образования кластерных структур свидетельствуют о том, что такие структуры формируются только вследствие взаимодействия отдельных атомов друг с другом. Такая структура рассмотрена в [6]. При температурах вблизи абсолютного нуля в третьем координационном слое могут возникать сложные структурные образования, приводящие к возрастанию энергии связи между частицами в кристалле, что неизбежно должно сказываться на изменении физико-механических свойств, которыми обладает твердое тело при низких температурах.

Кластерные образования формируются не только путем бинарного взаимодействия между отдельными атомами, но и путем образования структур вокруг трехатомных молекул. В результате реализуются сложные аллотропические изменения в твердом теле в зависимости от роста или уменьшения температуры кристалла [2]. Все это необходимо учитывать при определении объемной плотности тепловой энергии в твердом теле.

Общая схема подвода и отвода тепла в твердом теле представлена на рисунке 3. На поверхности твердого тела находятся оксидные слои или адсорбированные атомы или молекулы. Эти поверхностные слои определяют взаимодействие с потоком тепла, падающего на твердое тело $\dot{Q}_1$ и выходящего из твердого тела $\dot{Q}_2$. Падающий поток тепла разогревает поверхностный слой до температуры T_1 , а выходящий поток тепла поддерживает температуру T_2 . При этом $T_1 > T_2$. Внутри твердого тела возникает поток тепла $P_{T,1}$, а навстречу ему движется поток $P_{T,2}$. Оба потока определяются вектором Умова:

$$P_{T,1} = 3k_B T_1 n \sqrt{\frac{E_1}{\rho}}, \quad P_{T,2} = 3k_B T_2 n \sqrt{\frac{E_2}{\rho}}. \quad (25)$$

За время dt произойдет разогрев твердого тела, и температура его повысится на величину dT . На основании уравнения теплового баланса получаем

$$(P_{T,1} - P_{T,2}) S dt = c v S \rho dT.$$

Следовательно, твердое тело на длине l будет разогреваться до температуры T_2 под воздействием температуры T_1 . Время, в течение которого произойдет такой разогрев, определяется следующим образом:

$$t = \int_{T_2}^{T_1} \frac{c_v l \rho^{3/2} dT}{3k_B T_1 \sqrt{E_1} (1 - T \sqrt{E_1} / T_1 \sqrt{E_1})}. \quad (26)$$

Если учесть возникающие потоки тепла, поглощаемые твердым телом, и величину отдачи тепла, то

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Физические величины : справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский [и др.] ; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
2. Глинка, Н. Л. Общая химия : учебное пособие для вузов / Н. Л. Глинка ; под ред. В. А. Рабиновича. – 23-е изд., испр. – Ленинград : Химия, 1983. – 704 с.
3. Радциг, А. А. Справочник по атомной и молекулярной физике / А. А. Радциг, В. М. Смирнов. – Москва : Атомиздат, 1980. – 240 с.
4. Куць, Н. Г. Влияние стационарной и нестационарной теплопроводности на эффективность работы дизеля / Н. Г. Куць, Л. И. Гречихин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : международный сборник научных трудов. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – Вып. 42. – С. 137–148.
5. Сивухин, Д. В. Курс общей физики. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – Москва : Наука, 1972. – 551 с.
6. Гречихин, Л. И. Наночастицы и нанотехнологии / Л. И. Гречихин. – Минск : Право и экономика, 2008. – 406 с.
7. Месяц, Г. А. Импульсная энергетика и электроника / Г. А. Месяц. – Москва : Наука, 2004. – 496 с.

REFERENCES

1. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskiy A.M. [et al.]. Fizicheskie velichiny: spravochnik [Physical Quantities: A Handbook]. Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p. (in Russian).
2. Glinka N.L. Obshchaya khimiya: uchebnoye posobie dlya vuzov [General Chemistry: A Textbook for Universities]. Eds. V.A. Rabinovich. 23rd ed., rev. Leningrad, Khimiya, 1983, 704 p. (in Russian).
3. Radtsig A.A., Smirnov V.M. Spravochnik po atomnoy i molekulyarnoy fizike [Handbook of Atomic and Molecular Physics]. Moscow, Atomizdat, 1980. 240 p. (in Russian).
4. Kuts' N.G., Grechikhin L.I. Vliyaniye statsionarnoy i nestatsionarnoy teploprovodnosti na effektivnost' raboty dizelya [Influence of Stationary and Non-Stationary Thermal Conductivity on Diesel Efficiency]. In: Progressivnyye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya: mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov [Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering: International Collection of Scientific Papers]. Donetsk, DonNTU, 2011, iss. 42, pp. 137-148. (in Russian).
5. Sivukhin D.V. Kurs obshchey fiziki. Termodinamika i molekulyarnaya fizika [Course of General Physics. Thermodynamics and Molecular Physics]. Moscow, Nauka, 1972, 551 p. (in Russian).
6. Grechikhin L.I. Nanochastitsy i nanotekhnologii [Nanoparticles and Nanotechnologies]. Minsk, Pravo i Ekonomika, 2008, 406 p. (in Russian).
7. Mesyats G.A. Impul'snaya energetika i elektronika [Pulsed Power and Electronics]. Moscow, Nauka, 2004, 496 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию
17.01.2026

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ КОСПАС-SARSAT

OPERATIONAL FEATURES AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF THE COSPAS-SARSAT SYSTEM

Машарский Захар Владимирович – кандидат психологических наук, декан факультета гражданской авиации учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
distm@mail.ru

Zakhar Masharsky – Candidate of Psychological sciences, Dean of the Faculty of Civil Aviation of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
distm@mail.ru

Аннотация: международная спутниковая система КОСПАС-SARSAT представляет собой ключевой элемент глобальной инфраструктуры поиска и спасания, обеспечивающий обнаружение и определение местоположения аварийных радиобуев на частоте 406 МГц. Система объединяет низкоорбитальные, геостационарные и среднеорбитальные спутники, наземные станции приема и обработки информации, а также координационные центры, обеспечивая практически глобальное покрытие. Анализ ее функционирования показывает, что современный этап развития характеризуется переходом к архитектуре MEOSAR, обеспечивающей почти мгновенное обнаружение бедствия и высокую точность локализации. Важным направлением модернизации является внедрение радиобуев второго поколения, интеграция с глобальными навигационными спутниковыми системами, а также применение цифровых технологий, включая искусственный интеллект и блокчейн. Несмотря на значительные достижения – более 33 000 спасенных жизней и свыше 1,17 млн радиобуев в эксплуатации – система сталкивается с вызовами: необходимостью усиления кибербезопасности, стандартизации процессов через системы менеджмента качества, улучшения международной координации и борьбы с ложными срабатываниями. Представленный анализ подчеркивает стратегическую роль КОСПАС-SARSAT в обеспечении глобальной безопасности и намечает векторы ее технологического и организационного совершенствования в ближайшие десятилетия.
Ключевые слова: международная спутниковая система КОСПАС-SARSAT, аварийный радиобуй, космический сегмент, наземный сегмент, координационный центр системы, частота.

Abstract: the international COSPAS-SARSAT satellite system is a key component of the global search-and-rescue infrastructure, ensuring the detection and localization of 406 MHz emergency beacons. The system integrates low-Earth-orbit, geostationary, and medium-Earth-orbit satellites, ground receiving and data-processing stations, and coordination centres, thereby providing near-global coverage. An analysis of its operation indicates that the current stage of development is marked by the transition to the MEOSAR architecture, which enables near-instantaneous distress detection and high-accuracy localization. An important direction of modernization is the introduction of second-generation beacons, integration with global navigation satellite systems, and the use of digital technologies, including artificial intelligence and blockchain. Despite its significant achievements, including more than 33,000 lives saved and over 1.17 million beacons in operation, the system faces several challenges, such as the need to enhance cybersecurity, standardize processes through quality management systems, improve international coordination, and reduce false alerts. This analysis highlights the strategic role of COSPAS-SARSAT in ensuring global safety and outlines key directions for its technological and organizational development in the coming decades.

Keywords: international COSPAS-SARSAT satellite system, emergency beacon, space segment, ground segment, system coordination centre, frequency.

Введение

Система КОСПАС-SARSAT является одной из основных частей Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности и предназначена для обнаружения и определения местоположения воздушных и морских судов, а также других объектов, потерпевших аварию. Функционирование КОСПАС-SARSAT началось 30 июня 1982 года с запуска российского спутника КОСПАС-1.

Первый практический случай спасения людей с помощью системы произошел 10 сентября 1982 года

еще на стадии отработки технических средств системы, когда советский спутник КОСПАС-1 ретранслировал сигнал бедствия с разбившегося в горах Канады легкого самолета. Аварийный сигнал через спутник был принят канадской наземной станцией. В результате спасательной операции были спасены три человека. С тех пор данные системы были использованы в нескольких тысячах поисково-спасательных операций, в результате которых во всем мире было спасено более 33 000 человеческих жизней [1].

Международная спутниковая система КОСПАС-SARSAT включает в себя:

1. Космический сегмент, состоящий при нормальных эксплуатационных условиях минимум из четырех совместно работающих спутниковых комплексов, каждый из которых содержит следующие основные элементы:

- спутниковую платформу на низкой полярной орбите Земли, на которой установлены другие элементы спутникового комплекса, формирующие систему приполярные низкоорбитальные спутники системы КОСПАС-SARSAT (далее – НССПС);

- спутниковую платформу на геостационарной орбите Земли, которая формирует систему геостационарных спутников системы КОСПАС-SARSAT (далее – ГССПС);

- приемник-процессор с блоком памяти, предназначенный для приема, обработки и хранения сигналов, принятых на частоте 406 МГц, с целью дальнейшей передачи;

- ретранслятор, принимающий и передающий сигналы радиобуев, работающих на частоте 121,5 МГц.

2. Наземный сегмент, в который входят станции приема информации для приема сигналов, переданных со спутников, и обработки их с целью определения местоположения радиобуя.

3. Аварийные радиобуи для авиационного, морского и персонального использования, которые передают сигналы в аварийной ситуации (рисунок 1).

Помимо аппаратно-технического обеспечения, система охватывает:

- наземные комплексы для приема и анализа данных, осуществляющие прием и обработку спутниковых сигналов с целью формирования сигналов бедствия;

- координационные звенья системы, получающие сигналы бедствия от наземных станций и перенаправляющие их непосредственно в спасательные координационные центры;

- пункты взаимодействия для проведения поисково-спасательных работ или иные координационные узлы системы.

Компоненты систем ГССПС и НССПС взаимодействуют друг друга. Например, ГССПС обеспечивает практически моментальную передачу сигнала SOS, если он исходит из зоны покрытия геостационарного спутника. В то же время, НССПС охватывает полярные регионы (недоступные для геостационарных спутников) и способна вычислять координаты источ-

ника бедствия с использованием доплеровского метода локации.

Возможности систем НССПС и ГССПС показаны в таблице 1.

Номинальная конфигурация спутников системы НССПС включает два спутника КОСПАС и два спутника SARSAT.

Таблица 1 — Возможности систем НССПС и ГССПС	
НССПС	ГССПС
Идентификация радиобуя и его местоположения. Глобальная зона видимости. Передача сообщения осуществляется с небольшой задержкой (не мгновенная).	Идентификация радиобуя и его местоположения в случае использования протокола с координатами (радиобуя с протоколом местоположения). Почти мгновенная передача сообщения о бедствии от источника, находящегося в зоне видимости системы ГССПС.

Основная часть

Спутник завершает полный виток вокруг нашей планеты приблизительно за 100 минут, двигаясь со скоростью 7 километров в секунду. Вращаясь вокруг Земли, он охватывает полосу поверхности, ширина которой составляет около 6000 км. Если наблюдать за спутником с Земли, то прохождение по небосводу занимает примерно 15 минут. Это время варьируется в зависимости от максимальной высоты, которую он достигает над горизонтом при конкретном пролете. На рисунке 2 представлена структура космического сегмента рассматриваемой системы.

Для приема и обработки сигналов установлены наземные станции приема и обработки информации в Великобритании, Индии, Испании, Канаде, Китае, России, США и ряде иных государств. Аварийные сигналы с них поступают в систему КОСПАС-SARSAT. Спутниковая зона видимости системы НССПС показана на рисунке 3.

В рамках системы КОСПАС-SARSAT функционируют два основных типа станций, предназначенных для приема и анализа данных. Один тип, известный

как станции приема и обработки информации для низкоорбитальной спутниковой поисково-спасательной системы (LEOLUT), или НИОСПОИ обрабатывает сигналы от спутников НССПС. Другой тип, станции приема и обработки информации для геостационарной спутниковой поисково-спасательной системы (GEOLUTs), или ГЕОСПОИ работает с данными, поступающими со спутников ГССПС.

Операторы НИОСПОИ и ГЕОСПОИ играют ключевую роль в предоставлении службам поиска и спасения точной информации



Рисунок 1 — Конфигурация системы КОСПАС-SARSAT



Рисунок 2 — Космический сегмент системы

о чрезвычайных ситуациях и координатах бедствия, обеспечивая беспрепятственный доступ и передачу этих данных. Стороны, обеспечивающие и поддерживающие космический сегмент КОСПАС-SARSAT, предоставляют операторам НИОСПОИ и ГЕОСПОИ необходимые системные данные для их эффективной работы.

Для обеспечения надежности информации, используемой службами поиска и спасания, для станций приема и обработки информации разработаны строгие спецификации и процедуры. Конфигурация и функциональные возможности НИОСПОИ могут варьироваться в зависимости от потребностей конкретной страны. Тем не менее, форматы сигналов, передаваемых со спутников КОСПАС и SARSAT на землю, соответствуют установленным стандартам, обеспечивая совместимость между различными спутниками и всеми станциями НИОСПОИ.

Функциональность наземного информационно-обрабатывающего сегмента поисково-спасательной системы во многом обусловлена характеристиками спутниковых каналов системы КОСПАС-SARSAT, для работы с которыми он разработан. В зависимости от типа спутника доступно четыре канала для приема и декодирования сигналов. Причем некоторые спутники поддерживают все каналы, в то время как другие — лишь часть из них.

Спутниковый канал процессора обработки сигналов бедствия (далее — ПОСПС) на частоте 406 МГц принимает данные, транслируемые аварийными радиобуями, и производит первичную обработку на борту спутника. В ходе этой обработки идентифи-

цируется радиобуй, определяется время передачи сигнала и частота каждой посылки. Благодаря наличию блока памяти, канал ПОСПС 406 МГц обеспечивает глобальное покрытие для аварийных радиобуев, работающих на этой частоте.

Канал ретранслятора сигналов бедствия (далее — РСПС) на частоте 406 МГц принимает сигналы от одноименных радиобуев и немедленно ретранслирует их на землю. Отсутствие памяти на этом канале означает поддержку только локального режима работы, при котором радиобуй и НИОСПОИ должны находиться

в зоне видимости спутника одновременно. Важно отметить, что поскольку спутник не выполняет никакой предварительной обработки, вся эта задача ложится на НИОСПОИ.

Для сигналов 406 МГц, принимаемых через канал РСПС, каждое сообщение обнаруживается, а затем вычисляются данные для определения координат методом Доплера. Полученные координаты используются для определения местоположения радиобуя. Помимо координат, станции приема и обработки также предоставляют информацию, позволяющую идентифицировать радиобуй.

Обработка данных канала ПОСПС, полученных на частоте 406 МГц, происходит со скоростью 2400 бит/с. Все данные, сохраненные в памяти спутника и полученные за один проход, могут быть обработаны за несколько минут после его завершения [2].

Чтобы обеспечить высокую точность определения координат, данные об орбите спутника обновляются при каждом сеансе связи между спутником и наземной станцией приема и обработки информации. Система КОСПАС-SARSAT обнаруживает и локализует исключительно радиобуи, функционирующие на частоте 406 МГц (обработка спутниковых сигналов на частотах 121,5/243 МГц была прекращена 1 февраля 2009 года). Для аварийных радиобуев, взаимодействующих со спутниковыми системами, выделен специализированный частотный диапазон 406,0—406,1 МГц. Радиобуи КОСПАС-SARSAT, работающие на частоте 406 МГц, были специально спроектированы для применения в системе КОСПАС-SARSAT. Они учитывают строгие требования к стабильности передаваемой частоты и используют цифровой протокол для передачи закодированной информации, включая уникальный идентификационный номер радиобуя. На рисунке 4 показаны зоны покрытия системы КОСПАС-SARSAT 406 МГц и ГЕОСПОИ.

Из-за применения НССПС система КОСПАС-SARSAT обладает рядом ограничений, обусловленных прерывистой видимостью этих аппаратов. Применение низкоорбитальных спутников обеспечивает выраженный эффект Доплера для восходящего сигнала, позволяя использовать доплеров-

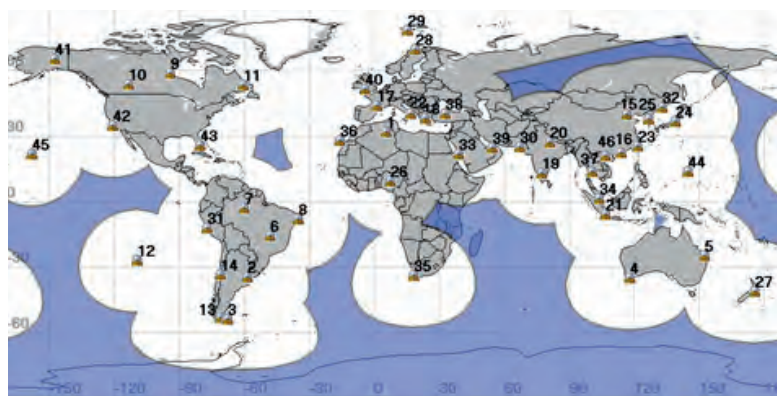


Рисунок 3 — Спутниковая зона видимости системы НССПС



Рисунок 4 — Зоны покрытия системы КОСПАС-SARSAT 406 МГц и ГЕОСПОИ

ский метод пеленгации для определения местоположения аварийных радиобуев. Система КОСПАС-SARSAT НССПС функционирует в двух вариантах: локальном и глобальном.

При получении сигналов на частоте 406 МГц ПОСПС извлекает цифровые данные из сигнала радиобуя, оценивает доплеровский сдвиг частоты и выполняет синхронизацию информации. В результате формируется массив цифровых данных, предназначенный для передачи на любую местную станцию приема и обработки информации, находящуюся в зоне видимости спутника. Одновременно с этим данные сохраняются в памяти спутника для последующей передачи и обработки в глобальном режиме.

Помимо локального режима 406 МГц, реализуемого посредством ПОСПС 406 МГц, на спутниках SARSAT установлены ретрансляторы, работающие на той же частоте и также обеспечивающие локальный режим. Отличие заключается в том, что ПОСПС выполняет ряд операций непосредственно на борту спутника, в то время как ретранслятор лишь пересылает сигналы радиобуя на Землю, требуя дополнительной обработки на наземных станциях [3].

ПОСПС 406 МГц обеспечивает глобальный режим работы путем хранения данных, полученных после первичной обработки сигналов от радиобуев 406 МГц. Информация из памяти постоянно сбрасывается по спутниковому каналу «Земля — борт», поэтому каждый радиобуй может быть локализован всеми работающими НИОСПОИ, которые отслеживают данный спутник, даже теми, которые не находились в зоне видимости спутника в момент обнаружения им радиобуя. Таким образом осуществляется глобальный режим работы на частоте 406 МГц и избыточная обработка аварийной информации наземными станциями.

Использование глобального режима 406 МГц обеспечивает значительное преимущество перед локальным режимом в скорости передачи сигнала бедствия. Благодаря тому, что сообщение аварийного буя сохраняется в памяти спутника при первом обнаружении, время ожидания передачи не зависит от момента, когда спутник окажется в зоне одновременной видимости как с наземной станцией, так и с самим буем. Это позволяет существенно сократить время, необходимое для отправки сообщения о бедствии [3].

В составе российского сегмента системы КОСПАС-SARSAT функционируют спутники различного типа: низкоорбитальные аппараты «Метеор-М» № 2–3 и № 2–4, предназначенные для метеорологических наблюдений; два среднеорбитальных навигационных спутника «Глонасс-К»; геостационарные спутники-ретрансляторы «Луч-5А» и «Луч-5В»; гидрометеорологические спутники «Электро-Л» № 2 и «Электро-Л» № 3; а также высокоэллиптический гидрометеорологический аппарат «Арктика-М» № 1.

Совместное применение указанных устройств с ретранслятором «Луч-5В» существенно увеличивает потенциал КОСПАС-

SARSAT в области спасения людей, попавших в беду на воде, в воздухе и на земле.

В свете технологического прогресса, модернизация системы КОСПАС-SARSAT представляется логичным шагом. Предполагается, что будущие улучшения значительно повысят функциональность системы, сделав поисково-спасательные работы еще более продуктивными и действенными. Непрерывное взаимодействие между международными участниками и достижения в сферах спутниковых и радиомаячных технологий позволят увеличить зону покрытия и эффективность системы в ближайшие годы.

Система КОСПАС-SARSAT находится на пороге существенного расширения благодаря технологическим инновациям и международному партнерству. К 2025 году система показывает стабильный рост: в активном использовании находится более 1,17 миллиона радиобуев, что обусловлено главным образом обязательным внедрением в авиационной и морской отраслях. Прогнозируется, что данная тенденция сохранится и будет способствовать расширению охвата системы в предстоящее десятилетие.

За прошедшие годы система КОСПАС-SARSAT продемонстрировала существенный прогресс в технологическом плане, в частности, благодаря внедрению передовых спутниковых решений и новаторских радиомаяков, расширяющих потенциал поисково-спасательных служб.

Одним из наиболее значимых обновлений является ввод в эксплуатацию среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасения (MEOSAR), гарантирующей глобальное покрытие и почти мгновенное выявление сигналов аварийных маяков. Данная система использует группировку из 72 спутников, что позволяет с большей точностью определять местоположение в течение нескольких минут после активации сигнала бедствия. MEOSAR оптимизирует работу системы КОСПАС-SARSAT, обеспечивая мониторинг в реальном времени и ускоренное реагирование при проведении поисково-спасательных работ.

Кроме того, важным этапом в развитии системы КОСПАС-SARSAT является создание маяков второго поколения (SGB), которые сокращают время отклика на сигналы бедствия. SGB включают в себя такие инновации, как передача сигналов с низким энергопотреблением, что позволяет экономить заряд батареи

и повышает точность определения местоположения маяка. Новое поколение маяков спроектировано для совместной работы со спутниками MEOSAR, что еще больше повышает эффективность системы в условиях чрезвычайных ситуаций.

Интеграция КОСПАС-SARSAT с глобальными спутниковыми навигационными системами (далее — ГНСС), такими как GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou, является перспективным направлением развития и играет ключевую роль в оптимизации поисково-спасательных работ. Применение ГНСС позволяет с высокой точностью определять координаты, что жизненно важно для оперативного реагирования при поиске пострадавших. Комбинирование информации от ГНСС с возможностями КОСПАС-SARSAT значительно повышает эффективность поиска и ускоряет прибытие спасателей, что позволяет спасти жизни в критических ситуациях.

В настоящее время ведется активная работа по модернизации инфраструктуры, в том числе внедряется система управления качеством. Это делается для унификации рабочих процессов и повышения надежности функционирования системы в странах-участницах. Данные улучшения способствуют повышению эффективности программы в области оповещения о бедствиях и направлены на удовлетворение растущих потребностей поисково-спасательных операций [4].

Международное взаимодействие усиливается благодаря таким инициативам, как Всемирный день поиска и спасания, который отмечает достижения системы и подчеркивает ее значимость в спасении людей по всему миру. Правовая основа программы постоянно совершенствуется, включая важные соглашения, определяющие оперативные обязанности стран-участниц и гарантирующие бесплатное предоставление данных о бедствиях спасательным службам в любой точке мира.

В обозримом будущем ожидается радикальное повышение эффективности поисково-спасательных мероприятий благодаря внедрению прорывных технологий, таких как квантовые вычисления, блокчейн и экологически чистые технологии. К примеру, квантовые вычисления обладают потенциалом для существенного увеличения точности поиска, а технология блокчейн способна повысить уровень прозрачности в работе различных спасательных служб.

Кроме того, приобретение новых спутников и модернизация существующих группировок, в частности, глобальной навигационной спутниковой системы BeiDou (BDS), призваны обеспечить расширение глобального покрытия и улучшение качества предоставляемых услуг к 2035 году.

Несмотря на свою роль в оптимизации глобальных поисково-спасательных операций (SAR), система КОСПАС-SARSAT сталкивается с определенными вызовами и обстоятельствами, способными повлиять на ее дальнейшую эволюцию и эффективность функционирования.

Сложности в координации возникают из-за отсутствия единой управленческой структуры, что создает препятствия для оперативного развертывания сил и средств, а также для взаимодействия между различными подразделениями. Улучшение систем управления является первоочередной задачей для повышения эффективности работы и сокращения времени реагирования в чрезвычайных ситуациях. Программа

также делает акцент на укреплении мер кибербезопасности для устранения слабых мест в системах передачи сигналов бедствия и наземных комплексах. Возрастает обеспокоенность относительно возможных атак спуфинга и глушения, способных подорвать достоверность сигналов бедствия.

Активные исследования в области надежных протоколов шифрования и аутентификации крайне важны для защиты функционирования системы и поддержания доверия между пользователями и заинтересованными сторонами.

Важнейшим направлением является модернизация спутникового оборудования. Установка радиомаяков новых поколений, отличающихся улучшенными характеристиками, включая усиленный сигнал, сниженное потребление энергии и добавление данных геолокации (GPS, ГЛОНАСС), значительно повышает эффективность в обнаружении и локализации терпящих бедствие. Не менее существенно развитие цифровых технологий и методик анализа информации. Внедрение алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта позволяет обрабатывать большие объемы данных, отсеивать ложные сигналы и с большей точностью прогнозировать зоны поиска, оптимизируя таким образом использование ресурсов служб спасения.

В будущем объединение КОСПАС-SARSAT с другими системами отслеживания и предупреждения, такими как системы мониторинга морских судов (AIS) и авиации (ADS-B), откроет перспективы для более комплексного и оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации в различных областях. Это, в свою очередь, позволит создать более надежную и действенную систему всемирной безопасности.

По мере прогресса технологий и инфраструктуры КОСПАС-SARSAT необходимо решать задачи, связанные с интеграцией систем и внедрением передовых технологий. Переход к более современным решениям в спутниковом и наземном сегментах, таким как система MEOSAR, требует создания системы контроля качества для стандартизации процессов и обеспечения соответствия требованиям стран-участниц. Успешное внедрение подобных систем потребует внимательного планирования и координации между международными партнерами для поддержания непрерывной работы.

В будущем крайне важно повышать информированность о важности регистрации индивидуальных радиобуев и улучшать взаимодействие между всеми участниками поисково-спасательных операций. Необходимо более тесное сотрудничество для объединения усилий и обеспечения понимания всеми сторонами своих ролей в системе КОСПАС-SARSAT.

Укрепление связей на разных уровнях может привести к более результативному реагированию и слаженной работе, что в конечном итоге повысит общую эффективность системы.

Заключение

За более чем четыре десятилетия существования международная спутниковая сеть КОСПАС-SARSAT подтвердила свою исключительную значимость для всемирной безопасности на воде, в небе и на земле, став важнейшей составляющей Глобальной морской системы оповещения при несчастных случаях. Уника-

льная структура, объединяющая низковысотные, геостационарные и средневысотные спутниковые группировки, гарантирует надежное выявление и точную идентификацию местонахождения аварийных радиобуев, работающих на частоте 406 МГц в режиме реального времени по всему миру.

Изучение работы КОСПАС-SARSAT демонстрирует, что дальнейшее совершенствование системы базируется на трех главных направлениях:

- переход к средневысотной архитектуре, обеспечивающей практически немедленное обнаружение аварийной ситуации и высокую точность определения координат;

- внедрение радиобуев нового поколения с возможностью передачи навигационной информации, уменьшенным расходом энергии и повышенной помехоустойчивостью;

- тесная интеграция с глобальными навигационными спутниковыми системами, позволяющая использовать встроенные координаты для ускорения поисково-спасательных работ.

В то же время, перед комплексом стоят задачи, нуждающиеся в разностороннем подходе: усиление защиты от киберугроз, унификация процедур посредством внедрения систем управления качеством, улучшение взаимодействия между странами-участницами и минимизация ложных тревог. Инновационные технологии, такие как искусственный интеллект, блокчейн и квантовые вычисления, предоставляют возможности для увеличения стабильности, прозрачности и скорости работы инфраструктуры КОСПАС-SARSAT.

Следовательно, КОСПАС-SARSAT эволюционирует от простой системы обнаружения аварийных сигналов к интеллектуальной, многослойной глобальной платформе реагирования на кризисные ситуации. Успешное осуществление запланированных технологических и организационных мероприятий позволит не только удерживать, но и значительно расширить ее возможности как одного из ключевых инструментов для спасения жизней в настоящее время.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Степенко, О. А. Поисковая система КОСПАС-САРСАТ / О. А. Степенко // Cyberleninka. – 2021. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poiskovaya-sistema-kospas-sarsat>.
2. Епифанов, М. А. Перспективы применения и развития автоматических радиомаяков коспас-сарсат типа ELT(dt) в глобальной системе оповещения о бедствии и обеспечения безопасности полетов воздушных судов (gadss) [Электронный ресурс] / М. А. Епифанов // Cyberleninka. – 2018. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-i-razvitiyaavtomaticheskikh-radiomayakov-kospas-sarsat-tipa-elt-dt-v-globalnoy-sistemeopovesheniya-o-bedstvii-i>.
3. Коспас-Сарсат // Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Коспас-Сарсат>.
4. Антонов, Д. В. Экспериментальные исследования точности определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте Коспас-Сарсат / Д. В. Антонов, А. В. Федосеев // Cyberleninka. – 2016. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnyeissledovaniyatocnostiopredeleniya-koordinat-avariynyh-radiobuev-vsredneorbitalnom-segmente-kospas-sarsat>.

REFERENCES

1. Stepenko O.A. Poiskovaya sistema KOSPAS-SARSAT [The Cospas-Sarsat Search and Rescue System]. Cyberleninka, 2021. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poiskovaya-sistema-kospas-sarsat> (in Russian).
2. Epifanov M.A. Perspektivy primeneniya i razvitiya avtomaticheskikh radiomayakov kospas-sarsat tipa ELT(dt) v global'noy sisteme opovesheniya o bedstvii i obespecheniya bezopasnosti poletov vozдушных судов (gadss) [Prospects for the Application and Development of Cospas-Sarsat ELT(dt) Automatic Beacons in the Global Distress Alerting and Flight Safety System (GADSS)]. Cyberleninka, 2018. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-i-razvitiyaavtomaticheskikh-radiomayakov-kospas-sarsat-tipa-elt-dt-v-globalnoy-sistemeopovesheniya-o-bedstvii-i> (in Russian).
3. Kospas-Sarsat [Cospas-Sarsat]. Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya [Wikipedia. The Free Encyclopedia]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Коспас-Сарсат> (in Russian).
4. Antonov D.V., Fedoseev A.V. Eksperimental'nye issledovaniya tochnosti opredeleniya koordinat avariynykh radiobuev v sredneorbital'nom segmente Kospas-Sarsat [Experimental Studies of the Accuracy of Determining Coordinates of Emergency Radio Beacons in the Cospas-Sarsat Medium-Altitude Orbit Segment]. Cyberleninka, 2016. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnyeissledovaniyatocnostiopredeleniya-koordinat-avariynyh-radiobuev-vsredneorbitalnom-segmente-kospas-sarsat> (in Russian).

*Статья поступила в редакцию
04.12.2025*

ПРОБЛЕМЫ ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

PROBLEMS OF LEGAL REGULATION OF THE OPERATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN THE REPUBLIC OF BELARUS: ANALYSIS AND PROSPECTS FOR IMPROVEMENT

Скрыпник Олег Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации движения и обеспечения безопасности на воздушном транспорте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Oleg Skrypnik – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Air Traffic Management and Safety in Air Transport of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Вишневецкий Роман Анатольевич – заведующий кафедрой организации движения и обеспечения безопасности на воздушном транспорте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Roman Vishnevsky – Head of the Department of Air Traffic Management and Safety in Air Transport of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

❖ **Аннотация:** в работе рассматриваются актуальные проблемы правового регулирования использования гражданских беспилотных летательных аппаратов в Республике Беларусь. Особое внимание уделяется проблемам административных барьеров для их легальной эксплуатации юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, вопросам ответственности и правоприменения, а также проблеме полного запрета использования беспилотных летательных аппаратов физическими лицами. На основе проведенного анализа и с учетом зарубежного опыта правового регулирования формулируются рекомендации по совершенствованию белорусского законодательства в сфере применения беспилотных летательных аппаратов и использования ими воздушного пространства.

❖ **Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты (БЛА), беспилотные авиационные системы (БАС), Республика Беларусь, правовое регулирование, административные барьеры, разрешительный порядок.

❖ **Abstract:** the paper discusses the current problems of legal regulation of the use of civilian unmanned aerial vehicles in the Republic of Belarus. Special attention is paid to the problems of administrative barriers to their legal operation by legal entities and individual entrepreneurs, issues of responsibility and law enforcement, as well as the problem of a complete ban on the use of unmanned aerial vehicles by individuals. Based on the analysis carried out and taking into account the foreign experience of legal regulation, recommendations are formulated for improving Belarusian legislation in the field of the use of unmanned aerial vehicles and their use of airspace.

❖ **Keywords:** unmanned aerial vehicles (UAVs), unmanned aerial systems (UAS), Republic of Belarus, legal regulation, administrative barriers, licensing procedure.

Введение

Развитие технологий беспилотной авиации является одним из глобальных трендов современности. Беспилотные летательные аппараты (БЛА) находят применение в самых различных сферах: от аэрофотосъемки и мониторинга объектов до доставки грузов и обеспечения общественной безопасности. В этой связи формирование эффективной норматив-

но-правовой базы, регулирующей оборот и эксплуатацию БЛА, становится важной задачей для любого государства.

Республика Беларусь в последние годы предприняла значительные усилия по созданию правовых основ в данной сфере. Ключевым нормативным правовым актом стал Указ Президента Республики Беларусь от 25 сентября 2023 года № 297 «О государственном учете и эксплуатации гражданских беспилотных

летательных аппаратов» (далее — Указ № 297), который вступил в силу в 2024 году и установил принципиально новые правила в этой области. Однако практика применения данного Указа выявила ряд серьезных проблем и противоречий, требующих научного осмысления и выработки рекомендаций по совершенствованию национального законодательства.

Цель настоящей статьи — на основе анализа действующего белорусского законодательства и практики его применения выявить ключевые проблемы правового регулирования использования гражданских БЛА и сформулировать научно обоснованные рекомендации по его совершенствованию.

1. Общая характеристика нормативно-правовой базы Республики Беларусь в сфере БЛА

Правовое регулирование использования БЛА в Республике Беларусь осуществляется на основе комплекса нормативных правовых актов различной юридической силы.

1.1. Указ Президента Республики Беларусь № 297 как системообразующий акт

Указ № 297, подписанный 25 сентября 2023 года, является основополагающим документом, определяющим порядок государственного учета и эксплуатации гражданских БЛА [1, 2]. Действие Указа распространяется как на физических лиц, так и на юридических лиц и индивидуальных предпринимателей. Однако ключевой особенностью данного акта является установление полного запрета (до соответствующего распоряжения) для физических лиц на ввоз, хранение, эксплуатацию, изготовление, приобретение и иные действия в отношении БЛА и авиамodelей.

В развитие Указа № 297 принят ряд подзаконных актов. Важнейшим из них является Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 28 декабря 2023 года № 972, которым утверждена форма заявления о постановке на государственный учет гражданского БЛА [3]. А с 1 января 2026 года вступили в силу изменения в порядке учета гражданских БЛА, предусматривающие переход на электронный формат через новую автоматизированную информационную систему (далее — АИС), доступную по адресу <https://uas.gov.by> [2]. Данное нововведение направлено на упрощение и ускорение процедур постановки на государственный учет, а также снятие с учета гражданских БЛА. При этом доступ к системе организован посредством электронной цифровой подписи и доступен только для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей.

1.2. Иные документы, регулирующие использование БЛА:

- Воздушный кодекс Республики Беларусь, который содержит определение БЛА как воздушного судна, предназначенного для выполнения полета без экипажа на борту, и другие ключевые определения в отношении БЛА;

- Правила использования воздушного пространства Республики Беларусь, где определены правила выполнения полетов БЛА;

- Указ Президента Республики Беларусь от 25 февраля 2016 года № 81 «Об использовании авиамodelей», в котором устанавливается понятие «авиамodelь»;

- Правила использования авиамodelей в Республике Беларусь (Постановление Совета Министров

Республики Беларусь от 16 августа 2016 года № 636), в которых устанавливаются правила выполнения полетов БЛА;

- Постановление Министерства обороны Республики Беларусь от 7 марта 2023 года № 5 «Об изменении постановления Министерства обороны Республики Беларусь от 9 ноября 2020 года № 26», которым актуализирован перечень запретных зон для полетов БЛА в воздушном пространстве Республики Беларусь;

- Руководство по оценке эксплуатационных рисков при выполнении полетов гражданских беспилотных летательных аппаратов (изд. 1, версия 0), утверждено приказом Департамента по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 15 марта 2024 года № 82, в котором установлены требования по проведению организацией, эксплуатирующей гражданский БЛА, оценки эксплуатационных рисков при эксплуатации гражданского БЛА;

- Указ Президента Республики Беларусь от 5 июня 2019 года № 215 «О пресечении полетов авиамodelей и беспилотных летательных аппаратов», которым устанавливается порядок применения физической силы и специальных средств при пресечении полета БЛА в случаях нарушения установленного порядка.

2. Ключевые проблемы правового регулирования в Республике Беларусь

Проведенный анализ позволяет выделить следующие основные проблемы действующего белорусского законодательства в сфере БЛА.

Первое: Проблема полного запрета использования БЛА физическими лицами.

Указ № 297 установил полный запрет для физических лиц на любые действия с БЛА. Данный запрет носит абсолютный характер и не предусматривает каких-либо исключений для использования БЛА в научных, образовательных, культурных или иных общественно полезных целях.

Такой подход противоречит мировой практике регулирования. Как показывает зарубежный опыт (например, Швейцарии), физические лица активно используют БЛА в открытой категории (open category) при соблюдении базовых требований регистрации и безопасности. Очевидно, что полный запрет не является единственным возможным способом обеспечения безопасности. Более того, он приводит к таким негативным последствиям, как:

- сдерживание технологического развития (физические лица, являющиеся основными носителями инноваций и энтузиастами в сфере беспилотных технологий, лишены возможности легально осваивать и развивать данную сферу);

- стимулирование черного оборота (запрет не устраняет потребность в использовании БЛА, а лишь переводит ее в нелегальную сферу, что подтверждается систематическими нарушениями порядка использования воздушного пространства (более 281 случая в 2025 году) [4];

- потеря образовательного потенциала (отсутствие легальной возможности использования БЛА физическими лицами препятствует формированию кадрового потенциала для развивающейся отрасли беспилотных технологий).

Второе: Чрезмерная административная нагрузка на легальных операторов беспилотных авиационных систем (юридических лиц и индивидуальных предпринимателей).

Для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, имеющих право легально использовать БЛА, установлена многоступенчатая разрешительная система, создающая значительные административные барьеры. Анализ процедуры легальной эксплуатации БЛА позволяет выделить следующие обязательные этапы:

1. Получение разрешения на право эксплуатации радиоэлектронного средства в Департаменте по авиации. Без этого разрешения невозможно осуществить постановку БЛА на учет.

2. Постановка на государственный учет в Департаменте по авиации. Процедура занимает до 15 рабочих дней и требует подачи заявления по установленной форме с приложением оценки эксплуатационных рисков для операций повышенного риска.

3. Нанесение в обязательном порядке учетного номера и метки класса на корпус БЛА любым удобным способом.

4. Прохождение подготовки оператором. Оператором может быть только совершеннолетнее лицо, прошедшее соответствующую подготовку в уполномоченных учреждениях образования.

5. Заключение договора с РУП «Белаэронавигация» и получение доступа к системе подачи заявок на использование воздушного пространства.

6. Получение разрешения Генерального штаба Вооруженных Сил на проведение аэрофотосъемки или аэромагнитной съемки, а также на использование полученных материалов.

7. Согласование полета с местными исполнительными и распорядительными органами и территориальными органами внутренних дел при осуществлении съемки в пределах городов.

8. Подача заявки на использование воздушного пространства (плана полета) в центр Единой системы организации воздушного движения на каждый конкретный полет.

9. Информирование о начале и окончании полета центра Единой системы организации воздушного движения.

10. Наличие при выполнении полета копии документа о постановке на учет, копии документа о подготовке оператора, документа, удостоверяющего личность, и светоотражающего жилета.

Данная многоступенчатая система создает серьезные административные барьеры для развития предпринимательства в сфере БЛА. В отличие от многих государств с интенсивно развивающейся отраслью беспилотной авиации гражданского применения, где для операций с низким риском достаточно соблюдения общих правил открытой категории без получения специальных разрешений, белорусское законодательство требует сложных согласительных процедур даже для относительно простых операций.

Третье: Проблема неопределенности в разграничении компетенции между органами власти.

Существующая система предполагает необходимость получения согласований как порядка эксплуатации, так и планов полетов БЛА от множества органов: Департамента по авиации, Генерального штаба, местных исполнительных органов, органов внутрен-

них дел. При этом отсутствуют четкие административные регламенты взаимодействия этих органов и сроков выдачи согласований.

Особую сложность представляет необходимость получения разрешения Генерального штаба на проведение аэрофотосъемки. Получение такого разрешения осуществляется бесплатно и в короткие сроки, однако данная процедура не имеет четкого нормативного закрепления и зависит от усмотрения конкретных должностных лиц.

Четвертое: Проблема ответственности и правоприменения.

Действующее законодательство предусматривает серьезные санкции за нарушение правил использования БЛА. Согласно статье 18.38 Кодекса об административных правонарушениях, штраф составляет:

- для физических лиц — до 30 базовых величин;
- для индивидуальных предпринимателей — до 50 базовых величин;
- для юридических лиц — до 200 базовых величин.

Кроме того, предусмотрена уголовная ответственность и возможность конфискации самого БЛА. Особого внимания заслуживает положение о том, что в случае нарушения требований к эксплуатации полет гражданского БЛА может быть принудительно прекращен уполномоченными органами, в том числе путем повреждения или уничтожения, причем вред собственнику не возмещается.

Указ № 215 в действующей редакции предоставляет силовым структурам широкие полномочия по применению физической силы, специальных средств, оружия и боевой техники для пресечения полетов беспилотных аппаратов. При этом выбор методов пресечения осуществляется исходя из текущей ситуации, что создает риск субъективного и несоразмерного применения силы.

Пятое: Проблема регулирования радиочастотного спектра.

В Республике Беларусь отсутствует радиочастотное регулирование при использовании БЛА, однако зарубежный опыт показывает важность этого аспекта. В Республике Беларусь отсутствуют выделенные частотные ресурсы для БЛА, а использование сетей мобильной связи для управления БЛА требует специальных разрешений.

3. Сравнительный анализ с зарубежным опытом

В таблице 1 показаны ключевые различия белорусского и зарубежного (на примере Швейцарии) подходов к регулированию БЛА.

4. Рекомендации по совершенствованию нормативно-правовой базы Республики Беларусь

На основе проведенного анализа представляется возможным сформулировать следующие рекомендации по совершенствованию белорусского законодательства в сфере БЛА.

Введение дифференцированного подхода к регулированию в зависимости от категории риска

Актуализация методологии оценки рисков. Беларусь, приняв Руководство по оценке эксплуатационных рисков на базе SORA 2.0, находится в русле мировых тенденций. Целесообразно осуществить переход

Таблица 1 — Сравнительный анализ с зарубежным опытом		
Критерий	Республика Беларусь	Швейцария
Использование физическими лицами	Полный запрет	Разрешено в открытой категории
Категоризация операций	Отсутствует единый разрешительный порядок использования воздушного пространства	Три категории (open, specific, certified) в соответствии с регламентами ЕС
Регистрация	Обязательная для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей	Обязательная для операторов, риск-ориентированный подход
Разрешения на полеты	На каждый полет	Обязательная для операторов, риск-ориентированный подход
Ответственность	Штрафы, конфискация, возможность уничтожения БЛА	Штрафы, соразмерные правонарушению
Частотное регулирование	Требуется разрешение на радиоэлектронное средство	Отсутствие выделенных частот, работа по имплементации ECC Decision (22)07

к версии 2.5 с учетом установленных EASA переходных периодов и изменений в методологии.

Представляется целесообразным пересмотреть ограничительные меры на использование БЛА физическими лицами и ввести категоризацию операций по степени риска по аналогии с европейским подходом. Для низкорисковых операций (полеты в пределах визуальной видимости, вдали от запретных зон, полеты БЛА малой массы) можно разрешить упрощенный порядок использования при соблюдении базовых требований регистрации и маркировки летательного аппарата.

Установление экспериментальных районов (зон), где можно было бы отрабатывать технологии организации воздушного движения беспилотных авиационных систем (БАС) и их интеграции в общее с пилотируемой авиацией воздушное пространство.

Такой подход не только соответствует мировой практике, но и позволит легализовать использование БЛА в научных, образовательных, культурных и рекреационных целях, а также будет способствовать развитию кадрового потенциала отрасли [8].

Упрощение административных процедур для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей

Существующая многоступенчатая система разрешений создает избыточные барьеры для развития предпринимательства в сфере БЛА. С целью упрощения формальностей рекомендуется:

1. Сократить количество обязательных согласований, исключив дублирующие процедуры. В частности, целесообразно рассмотреть возможность объединения процедур получения разрешения на радиоэлектронное средство и постановки на учет в

единую административную процедуру.

2. Ввести принцип «одного окна» для получения всех необходимых разрешений и согласований, связанных с эксплуатацией БЛА.

3. Установить регламент по срокам и процедурам рассмотрения заявок для всех органов, участвующих в согласовательных процедурах для разрешения полетов БЛА (Департаментом по авиации, Генеральным штабом Вооруженных сил, местными исполнительными органами и Министерством внутренних дел).

Дальнейшее развитие автоматизированной информационной системы учета БЛА

Переход на электронный учет БЛА через АИС с 1 января 2026 года является позитивным шагом. Рекомендуется продолжить развитие этой системы в следующих направлениях:

1. Интеграция с системами подачи заявок на использование воздушного пространства для создания единого цифрового пространства планирования полетов.

2. Создание интегрированного с АИС публичного геопортала с актуальными зонами ограничений и запретов, что позволит операторам автоматически проверять возможность выполнения полета в конкретном месте.

3. Разработка мобильного приложения для операторов БАС, обеспечивающего удобный удаленный (через сеть интернет) доступ к системе подачи заявок на выполнение полетов, к которому будут подключены необходимые сервисы о зонах ограничений, метеоинформации и другая справочная информация.

При этом следует отметить, что АИС станет основанием (ядром) единого цифрового пространства, и к системе будут подключены сервисы (в том числе и мобильные), необходимые для работы операторов БАС.

Совершенствование регулирования радиочастотного спектра

Целесообразно активизировать работу по гармонизации белорусского частотного регулирования с международными подходами. В частности, следует рассмотреть возможность:

1. Выделения защищенных частотных полос для линий управления БЛА.

2. Имплементации подходов, аналогичных ECC Decision (22)07, для использования сетей мобильной связи при управлении БЛА, что особенно важно для развития технологий BVLOS (Beyond Visual Line of Sight).

Уточнение оснований и порядка принудительного прекращения полетов

Действующие нормы о возможности уничтожения БЛА без возмещения вреда нуждаются в уточнении. Рекомендуется:

1. Законодательно закрепить принцип соразмерности применяемых мер характеру правонарушения.

2. Установить четкие критерии для принятия решения о повреждении или уничтожении БЛА, исключая субъективное усмотрение.

3. Предусмотреть обязательное документирование каждого случая применения силы, с фиксацией обстоятельств и оснований принятого решения.

Закключение

Проведенный анализ показывает, что правовое регулирование использования БЛА в Республике Беларусь находится на этапе активного формирования. Действующая модель регулирования, основанная на полном запрете использования БЛА физическими лицами и чрезмерно сложной разрешительной системе для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, создает серьезные препятствия для развития отрасли беспилотных технологий в стране.

Сравнение с зарубежным опытом, где используется более гибкий и дифференцированный подход

к регулированию, показывает потенциальные направления совершенствования белорусского законодательства. Введение категоризации операций по степени риска, упрощение административных процедур, развитие цифровых сервисов для операторов, совершенствование частотного регулирования и уточнение оснований применения силы при пресечении полетов — все эти меры могут способствовать созданию более сбалансированной и эффективной правовой среды.

Формирование такой среды позволит, с одной стороны, обеспечить необходимый уровень безопасности и защиты национальных интересов, а с другой — создать условия для развития инноваций, предпринимательства и кадрового потенциала в сфере беспилотных технологий, что соответствует долгосрочным интересам Республики Беларусь.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Указ Президента Республики Беларусь №297 от 25 сентября 2023 г. О государственном учете и эксплуатации гражданских беспилотных летательных аппаратов Национальный правовой портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32300297> (дата обращения: 15.02.2026).
2. Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь. Изменения в порядке учета гражданских беспилотных летательных аппаратов. – 2025. – URL: <https://mintrans.gov.by/ru/press-tsentr/novosti/item/14003> (дата обращения: 15.02.2026).
3. Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь. Департамент по авиации Минтранса Итоги за 2025 год URL: <https://mintrans.gov.by/ru/press> (дата обращения: 15.02.2026).
4. Сводный анализ состояния безопасности полетов в авиационных организациях Республики Беларусь за 2025 год. Приложение 1 к приказу Департамента по авиации от 29.01.2026 № 44.
5. Берестовицкая газета. Правила использования авиамodelей и беспилотных летательных аппаратов. – 2026. – URL: <https://www.beresta.by> (дата обращения: 15.02.2026).
6. Office fédéral de l'aviation civile (OFAC). Drones et modèles réduits. – 2023. – URL: <https://www.bazl.admin.ch/bazl/fr/home/drohnen.html> (дата обращения: 15.02.2026).
7. Office fédéral de la communication (OFCOM). Drones and model aircraft. – 2025. – URL: <https://www.bakom.admin.ch/en/drones-and-model-aircraft> (дата обращения: 15.02.2026).
8. Решения для интеграции БПЛА в общее воздушное пространство URL: <https://www.agentfly.com/uas-integration-into-shared-airspace> (дата обращения: 15.02.2026).

REFERENCES

1. Decree of the President of the Republic of Belarus No. 297 of September 25, 2023 On State registration and operation of civil aircraft National Legal Portal of the Republic of Belarus. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32300297> (accessed 15 February 2026) (in Russian).
2. Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus. Changes in the accounting procedure for civilian unmanned aerial vehicles – 2025. Available at: <https://mintrans.gov.by/ru/press-tsentr/novosti/item/14003> (accessed 15 February 2026) (in Russian).
3. Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus. Department of Aviation of the Ministry of Transport and Communications for 2025. Available at: <https://mintrans.gov.by/ru/press> (accessed on 15.02.2026) (in Russian).
4. Summary analysis of the state of flight safety in aviation organizations of the Republic of Belarus for 2025. Appendix 1 to the order of the Department of Aviation dated 29.01.2026, no. 44 (in Russian).
5. Berestovitskaya gazeta. Rules for using aircraft models and unmanned aerial vehicles – 2026. Available at: <https://www.beresta.by> (accessed 15 February 2026) (in Russian).
6. Office fédéral de l'aviation civile (OFAC). Drones et modèles réduits. – 2023. Available at: <https://www.bazl.admin.ch/bazl/fr/home/drohnen.html> (accessed 15 February 2026).
7. Office fédéral de la communication (OFCOM). Drones and model aircraft. – 2025. Available at: <https://www.bakom.admin.ch/en/drones-and-model-aircraft> (accessed 15 February 2026).
8. Solutions for integrating UAVs into common airspace. Available at: <https://www.agentfly.com/uas-integration-into-shared-airspace> (accessed 15 February 2026).

*Статья поступила в редакцию
03.04.2026*

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ИЗ УГЛЕВОЛОКНА

TECHNOLOGICAL PROCESS FOR MANUFACTURING CARBON FIBER AIRCRAFT CONSTRUCTION ELEMENTS

Шавель Юлия Андреевна – магистрант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
yulyashavel@gmail.com

Yuliya Shavel – Master's degree Student of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
yulyashavel@gmail.com

Рипинский Антон Иванович – заведующий кафедрой технической эксплуатации воздушных судов и двигателей учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Anton Ripinsky – Head of Department of Technical Operation of Aircraft and Engines of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Аннотация: в статье рассматривается технологический процесс изготовления элементов конструкции летательных аппаратов из углеволокна с применением композиционных материалов и технологии вакуумной инфузии. Проведен анализ современных конструкционных полимеров, используемых в авиационной отрасли, а также рассмотрены преимущества применения углеродного волокна при создании элементов планера воздушных судов. Особое внимание уделено вопросам выбора армирующего материала, связующего и технологической оснастки для изготовления панели кессона крыла. Описаны основные этапы производства: подготовка матрицы, нанесение разделительных составов и гелькоута, укладка слоев углеродной ткани, формирование технологического слоя, герметизация формы, вакуумирование, пропитка связующим, процессы полимеризации и последующая механическая обработка готового изделия. Рассмотрены особенности выбора схемы расположения вакуумных и инфузионных линий для обеспечения равномерной пропитки армирующего материала и минимизации дефектов. Отдельное внимание уделено вопросам механообработки углепластиковых деталей, предупреждению расслоений и сколов материала. Отмечено, что использование композитных материалов в авиационной технике позволяет снизить массу конструкции, повысить топливную эффективность, долговечность и эксплуатационные характеристики летательных аппаратов. Сделан вывод о перспективности дальнейшего развития технологий изготовления авиационных конструкций из углеродного волокна и необходимости совершенствования технологических процессов и подготовки специалистов в данной области.

Ключевые слова: конструкционные полимерные материалы, мультиаксиальная ткань, связующие материалы, гелькоут, летательный аппарат.

Abstract: the article discusses the technological process of manufacturing aircraft structural elements from carbon fiber using composite materials and vacuum infusion technology. An analysis of modern structural polymer materials used in the aviation industry is presented, along with the advantages of carbon fiber application in the production of aircraft airframe components. Particular attention is paid to the selection of reinforcing materials, binders, and tooling for manufacturing a wing box panel. The main production stages are described, including mold preparation, application of release agents and gelcoat, laying carbon fiber fabric layers, forming the technological layer, mold sealing, vacuum processing, resin infusion, polymerization, and subsequent mechanical machining of the finished product. The study also examines the arrangement of vacuum and infusion lines to ensure uniform impregnation of the reinforcing material and minimize manufacturing defects. Special attention is given to the machining features of carbon fiber reinforced plastic parts and to preventing delamination and material chipping. It is noted that the use of composite materials in aviation engineering reduces structural weight, improves fuel efficiency, durability, and operational performance of aircraft. The paper concludes that further development of carbon fiber aircraft manufacturing technologies is highly promising and requires continuous improvement of technological processes and specialist training in this field.

Keywords: structural polymer materials, non-crimp fabric, binding material, gelcoat, aircraft.

Введение

Развитие современной техники требует новых конструкционных материалов, превосходящих по своим прочностным, упругим и другим свойствам традиционные. К числу наиболее интересных и пер-

спективных композитов относятся полимерные материалы (пластики, эластомеры, волокна), и в первую очередь – наполненные.

Конструкционные полимеры все чаще применяют в современном машиностроении, причем их используют в тех случаях, когда ни один другой материал не

отвечает все более возрастающим требованиям новой техники. В настоящее время они серьезно потеснили такие основные конструкционные материалы, как металл или дерево.

Возможности полимерных материалов чрезвычайно широки благодаря многообразию полимеров и наполнителей, неисчерпаемой вариативности составов композитов на их основе и методов их модификации.

Разработка легких, устойчивых к высоким температурам композитных материалов позволит воплотить в жизнь следующее поколение высокопроизводительных, экономичных конструкций самолетов. А с увеличением спроса на легкие и эффективные транспортные средства будет расти спрос и на новые композиционные материалы.

Использование современных композитов позволит сократить расход топлива, повысить эффективность и сократить прямые эксплуатационные расходы самолетов.

Применение композиционных материалов в авиационной области стало важным шагом к созданию более легких, прочных и эффективных воздушных судов. В настоящее время из композиционных материалов изготавливаются структурные компоненты летательных аппаратов, такие как: элементы фюзеляжа современных самолетов (позволяют снизить общий вес и улучшить аэродинамические характеристики), элементы крыла (обеспечивается высокая прочность и жесткость при меньшем весе по сравнению с традиционными материалами, что позволяет увеличить подъемную силу и эффективность полета), поверхности хвостового оперения (способствует повышению устойчивости и управляемости летательных аппаратов) и т. д.

Основные преимущества применения в конструкции деталей, изготовленных из композиционных материалов:

- значительное снижение массы конструкции, что ведет к снижению расхода топлива и увеличению дальности полета;
- устойчивость к коррозии и различным видам излучения: углеродное волокно, например, не подвержено коррозии, что увеличивает срок службы компонентов и снижает затраты на обслуживание;
- улучшенные эксплуатационные характеристики: легкие конструкции позволяют самолетам достигать больших высот и скоростей, а также улучшать маневренность;
- технологии производства: современные технологии изготовления деталей из композиционных материалов позволяют создавать сложные формы и структуры, обеспечивают высокое качество и хорошие прочностные характеристики элементов, являясь при этом не столь затратными, как большинство технологий производства деталей из традиционных материалов.

В настоящее время такие самолеты как Боинг 787 Dreamliner или Airbus A350 содержат более 50 % углеволокна в своей конструкции, что значительно снижает вес конструкции данных летательных аппаратов (ЛА) и улучшает их топливную эффективность.

Основная часть

1. Выбор основных материалов и оснастки.

Выбор материалов для изготовления выбранного элемента конструкции ЛА (в нашем случае мы рассмотрим технологический процесс изготовления панели кессона крыла) зависит от большинства факторов: высокие требования к прочности конструкции, весовые характеристики, коррозионная стойкость, обрабатываемость, стоимость, долговечность и т. д.

Основные требования к конструкции закладываются на этапе создания технического задания, а после дополняются в ходе проектирования изделия.

2. Выбор армирующего материала.

В нашем случае в качестве армирующего материала для изготовления панели кессона крыла мы будем рассматривать углеродное волокно в виде выкроек мультиаксиальной ткани.

Углеродное волокно широко используется в авиационной области для изготовления как панелей крыла и хвостового оперения, так и для силовых элементов конструкции, например, для изготовления лонжеронов кессона крыла.

Такой выбор материала обусловлен тем, что детали из углеродного волокна устойчивы к коррозии и распространению повреждений, имеют высокие показатели прочности и сопротивления хрупкому разрушению, долговечны, демонстрируют стабильность свойств при изменении внешних воздействующих факторов [3].

3. Выбор связующего.

Выбор связующего является важной частью технологического процесса изготовления деталей из армирующих волокон, так как роль связующего заключается в том, чтобы поддержать волокна и связать их вместе в композиционный материал. Связующий материал должен переносить любые приложенные нагрузки на волокна, удерживать волокна в их положениях и в выбранной ориентации. Связующее определяет стойкость к воздействию окружающей среды и определяет максимальную рабочую температуру готового изделия.

Требование к рабочей температуре изделия является одним из ключевых критериев для выбора наилучшего связующего.

Существуют три основных типа связующих: эпоксидные, фенольные и бисмалеимидные. В таблице 1 указаны преимущества каждого типа связующего и области их применения.

Также при выборе связующего следует учитывать требуемую прочность, вес и условия эксплуатации проектируемой детали.

Для изготовления панели кессона крыла мы будем использовать связующее товарной марки Sicomin на основе высоковязких эпоксидных смол.

4. Выбор матрицы.

Специальная оснастка с рельефами конечного изделия называется матрицей для вакуумной формовки.

Разработка матриц для полимерных конструкционных материалов — серьезная и важная проблема, поскольку многие свойства композита определяются структурой матрицы [1].

Заготовки производятся на высокоточном оборудовании и станке с ЧПУ. Наиболее востребованными материалами в производстве болванок являются пластик, металл, камень и МДФ.

Таблица 1 — Характеристика различных видов связующих материалов

Вид связующего, его рабочая температура	Преимущества	Область применения	
Эпоксидные, 100 – 180 °С	- отличные механические свойства; - хорошая стойкость к воздействию окружающей среды и высокая жесткость; - экономичный процесс переработки	Отверждаемые при 120 – 140 °С	Отверждаемые при 180 °С
		Аэрокосмос, спортивная экипировка, военные компоненты, морские суда, автомобилестроение, железнодорожный транспорт	Аэрокосмос, военные компоненты
Фенольные, 80 – 100 °С	- хорошая термостойкость; - низкая горючесть; - низкая токсичность; - высокая скорость отверждения; - экономичный процесс переработки	Авиационно-космическая отрасль (компоненты интерьера), морские суда, железнодорожный транспорт	
Бисмалеимидные (полиимидные), ≥ 260 °С	- отличное сопротивление высоким температурам; - рабочая температура выше 260 °С; - хорошие механические характеристики; - хорошая стойкость к воздействию химических веществ (реактивов), огню и радиации	Детали авиационных двигателей, сверхзвуковые самолеты, ракетостроение	

Матрицы из камня более долговечны и хорошо подвергаются механообработке, но имеют значительный вес.

Матрицы из дюрали, например, тоже долговечны, но хуже обрабатываются.

А матрицы из МДФ не точны, не долговечны, но имеют весовые преимущества. Такие матрицы подходят для малосерийного производства. Таким образом, для наших целей наиболее пригодной будет матрица, имеющая наружную формообразующую поверхность из камня, но облегченная снизу (из МДФ).

5. Подготовительный этап.

На подготовительном этапе особое значение имеет подготовка оснастки. Этот процесс включает в себя предварительную проверку матрицы (формы) на герметичность и дальнейшую подготовку поверхности. Качество поверхности используемой матрицы (формы) в значительной мере влияет на качество наружной поверхности изготавливаемой в этой оснастке детали.

Первоначально поверхность матрицы следует очистить от механических загрязнений и тщательно обезжирить. После чего на подготовленную поверхность можно наносить разделяющий состав, применяемый для предотвращения прилипания композитной детали к поверхности матрицы. Разделяющий состав следует наносить непосредственно на поверхность матрицы в 2 – 3 слоя легким движением руки.

Другой метод предотвращения прилипания композитной детали к оснастке — использование разделительных пленок с липким слоем, которые могут быть наклеены на поверхность оснастки [2]. Такая пленка может использоваться не один раз.

Также на поверхность оснастки по требованию может наноситься декоративный слой — гелькоут.

Гелькоут — это модифицированная смола с жидкой субстанцией, которая наносится на матрицу. Он формирует наружную поверхность будущего изделия, задает цвет, однородную фактуру и обеспечивает защиту от воздействия внешних факторов (ультрафиолетовые лучи, вода, химические реагенты и пр.).

Нанесение гелькоута не является обязательной процедурой. В некоторых случаях, формование изделия вполне возможно и без него. Чаще всего материал укладывается прямым на поверхность оснастки, однако при изготовлении изделий сложной формы нанесение гелькоута желательно, т. к. это поможет сократить расходы при финишной обработке деталей.

К следующему этапу формования детали следует приступать только после частичной полимеризации гелькоута (до состояния «на отлип»).

В оснастку (матрицу) слой за слоем укладывается предварительно раскроенное углеродное волокно. При этом, для того чтобы ткань оставалась плотно прижатой, возможно применение спреев-клеев временной фиксации (AEROFIX, INFUTAC). Однако на-

несение фиксирующих клеев может отрицательно сказаться на качестве поверхности изделия (образование пузырей и раковин на поверхности изделий).

Критически важным моментом при укладке является качественное, равномерное прижатие ткани по всей поверхности оснастки. Особое внимание уделяется углам. Если слои армирующего материала не будут плотно прилегать к оснастке и друг к другу, образуются пустоты, которые в лучшем случае будут заполнены связующим, что может привести к снижению прочности элемента, а в худшем — образуют полости — концентраторы напряжений.

Необходимая толщина профиля панели набирается слоями углеродной ткани необходимой толщины. Примем условно толщину изготавливаемой панели равной 25 мм, тогда требуемую толщину будем набирать из 5 слоев углеродной ткани толщиной по 0,5 мм.

6. Укладка технологического слоя.

Технологический слой состоит из жертвенной ткани, перфорированной пленки и проводящей сетки. Укладываются линии подачи связующего и вакуумные линии — линии эвакуации воздуха и излишков смолы.

Обычно линия эвакуации воздуха и излишков смолы — спиральная трубка, укладывается по периметру оснастки в виде кольца. Если в работе используется трубка МТИ®, то ее стараются выносить как можно дальше, на периферию фланца, для отдаления момента падения разряжения при заполнении формы связующим.

Точно определить оптимальное расположение линий ввода смолы и эвакуации воздуха достаточно сложно. Опыт, тесты и запись — анализ предыдущих формований помогают минимизировать проблемы, возникающие при работе с технологией вакуумной инфузии.

При создании схемы расположения вакуумной линии важно учитывать:

- расположение вакуумных и инфузионных линий для достижения оптимального потока смолы;
- габариты и форму детали;
- минимизацию мертвых зон, где смола может не пропитать армирующий материал;
- обеспечение доступа к точкам подключения для удобства работы.

Схематическое изображение вакуумной линии пропитки панели кессона и фронт пропитки армирующего материала по выбранной схеме пропитки изображены на рисунке 1 и рисунке 2 соответственно.

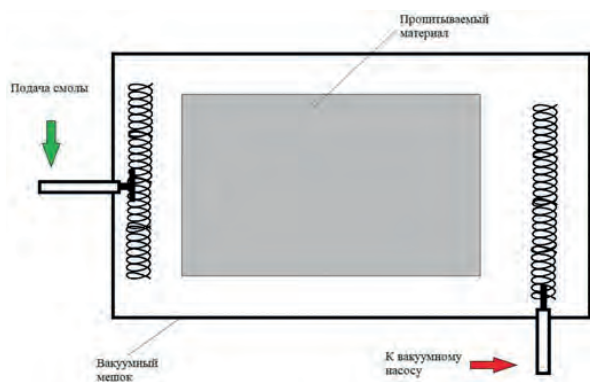


Рисунок 1 — Схематическое изображение вакуумной линии

Вакуумную магистраль располагают по периметру формы, на расстоянии порядка 2,5 см от края армирующего материала [2].

В случае больших габаритов панели кессона крыла схему пропитки следует усложнить, добавив дополнительные линии подачи смолы.

7. Герметизация формы.

Следующим этапом укладывается вакуумная пленка и при помощи герметизирующего жгута форма герметизируется и вакуумируется.

Важно иметь в вакуумной системе клапан регулировки степени разряжения, выставив низкое разряжение на первоначальном этапе, можно не торопясь, качественно распределить вакуумную пленку по поверхности формы.

При вакуумировании формы не допускается натяжение пленки. Пленка должна лежать свободно и облегать без натяжения каждый сантиметр поверхности оснастки.

Затем завакуумированную форму необходимо отключить от вакуумного насоса и оставить на время для проверки герметичности. Рекомендуется контролировать показания стрелки вакуумметра в течение 45 минут. Если за указанное время стрелка поднялась на несколько делений, необходимо найти утечки. При этом форму «слушают», пытаются по высокочастотному звуку обнаружить отверстие, либо применяют специальный ультразвуковой прибор для обнаружения утечек воздуха. В случае, когда герметичность формы не подтверждена, запускать связующее не рекомендуется.

8. Пропитка связующим.

Следующим этапом производится запуск связующего.

Благодаря разрежению, жидкость всасывается в форму и заполняет свободный объем (пространство между поверхностью оснастки и вакуумной пленкой), пропитывая армирующий материал вместе с жертвенной тканью и распределительной сеткой.

После полимеризации связующего (отверждения) вакуумный пакет снимается, удаляется технологический слой и деталь вынимается из оснастки.

Процесс полимеризации смолы должен протекать при комнатной температуре. После следует проводить постотверждение для набора смолой максимальных прочностных свойств.

9. Механическая обработка.

Готовое изделие подвергается механообработке: удаляется армирующий материал по периметру, высверливаются отверстия и прочее.

Механообработка деталей из углеродного волокна — это довольно сложный и специфический процесс, который требует особого подхода из-за уникальных свойств материала. Углеродное волокно обладает высокой прочностью, легкостью и жесткостью, но при этом является хрупким и склонным к

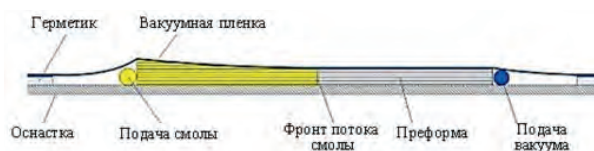


Рисунок 2 — Схематическое изображение фронта потока смолы

расслоению при механической обработке. Поэтому следует учитывать особенности материала и подбирать соответствующие методы и режимы механообработки (таблица 2).

Таблица 2 — Рекомендации по обработке деталей из углеродного волокна

Параметр	Рекомендации
Инструмент	Твердосплавные, алмазные фрезы и сверла
Скорость резания	Высокая (для снижения усилия резания)
Подача	Низкая, чтобы избежать расслоения
Охлаждение	Воздушное или минимально-жидкостное
Тип обработки	Много проходов с малой глубиной реза

Основными дефектами деталей при неправильной механической обработке являются расслоение и скалывание материала. Для минимизации количества таких дефектов следует использовать опору с обратной стороны детали и уменьшать нагрузку на инструмент.

Также в ходе обработки следует контролировать температуру детали, использовать охлаждение.

При выборе инструмента стоит отдавать предпочтение наиболее износостойким материалам. Инструмент необходимо регулярно менять или затачивать.

Заключение

Разработка деталей ЛА из углеродного волокна — это перспективное направление, которое активно развивается благодаря уникальным свойствам этого материала.

Углеродное волокно обладает высокой удельной прочностью и модулем упругости. Композитные детали по своей прочности соответствуют современным авиационным сплавам, а иногда даже и превосходят их. При этом использование углеродного наполнителя и полимерного связующего позволяет сделать такие детали легче металлических аналогов, а значит, и уменьшить массу пустого самолета. Это критично для

авиации, где снижение массы напрямую влияет на топливную эффективность и грузоподъемность.

Еще одним преимуществом углепластиковых композитных деталей является их устойчивость к распространению повреждений. Например, при ударе по такой детали, область повреждений будет ограничена. В ее пределах при эксплуатации может произойти разрушение, но оно не распространится дальше по детали. Благодаря этому же качеству композитные детали имеют больший ресурс, чем металлические. Дело в том, что по мере разрушения внутри детали снимается конструкционное напряжение. Когда оно становится равным нулю, разрушение останавливается. С учетом многослойности такая самоостановка разрушения — качество очень ценное.

Также в отличие от металлов, композиты на основе углеродного волокна не подвержены коррозии, что увеличивает срок службы и снижает затраты на техническое обслуживание.

Технологии формовки композитов позволяют создавать детали сложной геометрии, интегрируя несколько функций в одну деталь, что упрощает конструкцию и снижает количество соединений.

Использование композитов снижает массу основных конструкций, улучшает аэродинамические характеристики и повышает общую эффективность ЛА.

Ручная укладка и инфузия смолы позволяют создавать крупногабаритные детали с оптимальным соотношением цена/качество.

Однако композиты чувствительны к направлению волокон и способу укладки, что требует точных расчетов и моделирования.

С развитием технологий и увеличением требований к эффективности и экологии авиационной отрасли использование углеволокна будет только расти.

В настоящее время примером применения технологии вакуумной инфузии в конструкции ЛА является так называемое «черное крыло» самолета МС-21, верхние и нижние панели которого полностью изготовлены из сухой углеродной ленты и полимерного связующего.

Также технология вакуумной инфузии может быть применена при изготовлении силовых длинномерных элементов конструкции консоли крыла самолета.

Таким образом, использование углеродного волокна в деталях ЛА обладает огромным потенциалом для повышения эффективности, безопасности и экономичности авиационной техники. Однако для полного раскрытия этого потенциала необходимы инвестиции в исследования, развитие технологий и подготовку кадров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Бондалетова, Л. И. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
- Вакуумная инфузия. – URL: <https://composite.ru/tehnologii/infusion1/#1> (дата обращения: 07.05.2025).
- Концепция конструктивно-технологических подходов проектирования, изготовления и испытания элементов планера из ПКМ для самолета МС-21. – URL: http://old.aviationunion.ru/Files/Nom_7_IRkuT.pdf (дата обращения: 30.04.2025).

REFERENCES

- Bondaletova L.I., Bondaletov L.I. *Polimernyye kompozitsionnyye materialy (chast' 1): uchebnoye posobiye* [Polymer Composite Materials. Part 1. Textbook] – Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2013. 118 p. (in Russian).
- Vakuumnaya infuziya (Vacuum Infusion). Available at: <https://composite.ru/tehnologii/infusion1/#1> (accessed 07 May 2025) (in Russian).
- Kontseptsiya konstruktivno-tehnologicheskikh podkhodov proyektirovaniya, izgotovleniya i ispytaniya elementov planera iz PKM dlya samoleta MS-21 (The Concept of Design and Technological Approaches to the Design, Manufacture and Testing of Polymer Composite Materials (PCM) Airframe Elements for the MS-21 Aircraft). Available at: http://old.aviationunion.ru/Files/Nom_7_IRkuT.pdf (accessed 30 April 2025).

Статья поступила в редакцию
31.01.2026

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ОТ НЕСИММЕТРИИ И ОБРЫВА ФАЗ В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF PROTECTIVE DEVICES AGAINST UNSYMMETRY AND PHASE LOSS IN THREE-PHASE POWER SUPPLY SYSTEMS OF AIRCRAFT

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

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

Карнаухов Николай Сергеевич – магистр технических наук, заместитель генерального директора по качеству и сертификации ООО «Бриз», Российская Федерация

Nikolay Karnaukov – Master of Technical Sciences, Deputy General Director for Quality and Certification, LLC "Briz", Russian Federation

Аннотация: анализируются современные принципы построения защит систем электроснабжения воздушных судов от несимметрии и обрыва фаз с учетом опыта отечественных и зарубежных разработок, а также предлагаются критерии оценки их эффективности в условиях реальных эксплуатационных нагрузок. Рекомендуются перспективные пути и методы совершенствования аппаратов защиты от несимметрии и обрыва фаз систем электроснабжения воздушных судов.

Ключевые слова: система электроснабжения, аппарат защиты, несимметрия фазных напряжений, обрыв фазы, характер нагрузки, эффективность защиты.

Abstract: the paper analyzes modern design principles of protection systems for aircraft power supply against phase unbalance and phase loss, taking into account domestic and foreign development experience, and proposes criteria for evaluating their effectiveness under realistic operational loads. Promising directions and methods for improving protective devices against phase unbalance and phase loss in aircraft power supply systems are proposed.

Keywords: power supply system, protective device, phase voltage unbalance, phase loss, load characteristics, protection effectiveness.

Введение

Защита систем электроснабжения (СЭС) воздушных судов (ВС) как совокупность определенных операций по управлению ими при наличии отказов предполагает решение трех основных задач: установление факта события отказа в системе (контроль), определение места отказа или отказавшего элемента (диагностирование) и формирование собственно сигнала защиты, т. е. управляющего воздействия, направленного на отключение неисправного элемента, включение резервного элемента, выдачу информации экипажу о состоянии системы и т. п.

Принцип действия аппаратов защиты, применяемых в системах электроснабжения ВС, основан на непрерывном контроле (измерении) одного или нескольких параметров электрической энергии (ток, на-

пряжение, частота тока и т. д.) на защищаемом участке и других физических величин, характеризующих процессы их функционирования (например, быстродействие, селективность, необратимость и др.). При этом в качестве признаков отказа защищаемого объекта используются отклонения контролируемых параметров за допустимые пределы.

В современных СЭС ВС наиболее характерными и опасными являются следующие отказы:

1) обрыв фазы или фидера генератора;

2) несимметрия фазных напряжений из-за неравномерной нагрузки (особенно при подключении мощных асинхронных двигателей, статических преобразователей, систем кондиционирования);

3) появление в сети токов обратной и нулевой последовательностей — признак несимметрии;

4) заклинивание привода генератора (в системах с постоянной частотой вращения вала генератора — CSD/IDG);

5) потеря синхронизации между параллельно работающими каналами генерирования электроэнергии.

Анализ аварийных ситуаций показывает, что более 60 % инцидентов, связанных с отказами в системах электроснабжения пассажирских ВС, происходят из-за несимметрии напряжений, вызванной неправильным распределением нагрузки или обрывом фазы в бортовой сети. При этом среднее напряжение в фазах часто остается в допустимых пределах ($\pm 10\%$ от 115 В), что делает традиционные защиты от повышения/понижения напряжения нечувствительными к ситуации несимметрии напряжений [1, 2].

Основная часть

В настоящее время в авиационных СЭС переменного тока предусмотрены следующие виды защиты: от недопустимости повышения (понижения) напряжения и частоты тока; от всех видов коротких замыканий; от несимметрии фазных напряжений генератора; от обрывов проводов фидера генератора и бортовой системы распределения электроэнергии; от заклинивания вала генератора и привода постоянной скорости.

Например, несимметрия фазных напряжений, обусловленная неравномерным распределением мощности однофазных приемников электроэнергии между фазами генератора или обрывами проводов бортовой электрической сети, как правило, приводит к возникновению аварийных режимов не только для систем электроснабжения, но и для воздушного судна в целом. Влияние неравномерности распределения мощности однофазных приемников электроэнергии между фазами генератора на несимметрию его фазных напряжений поясняется векторной диаграммой напряжений, приведенной на рисунке 1.

Диаграмма напряжений построена для случая включения активной нагрузки между фазами А и В генератора. Анализ рисунка 1 показывает, что несимметричная нагрузка искажает треугольник фазных напряжений генератора. В рассматриваемом случае

несимметрия нагрузок приводит к возрастанию линейного напряжения U_{CA} и уменьшению напряжений U_{BC} и U_{AB} . Поэтому бортовые однофазные приемники электроэнергии должны быть так распределены между фазами генератора, чтобы разность нагрузок наиболее и наименее нагруженных фаз при нормальном режиме работы системы электроснабжения не превышала величин, указанных в соответствующих документах [3].

В таблице 1 приведены величины (усредненные) фазных напряжений при обрыве одной из трех фаз генератора и различных величинах мощности и характера нагрузок, полученных при натурных экспериментах и имитационном моделировании каналов генерирования на базе синхронных генераторов типа ГТ мощностью от 30 до 60 кВт·А. Измерения проводились в точке регулирования (в точке подключения регулятора напряжения).

По данным таблицы 1 можно определить влияние характера и величины мощности нагрузки при обрыве фазы генератора на несимметрию фазных напряжений (их отклонение от допустимых значений, как для нормальных, ненормальных, так и аварийных режимов работы системы электроснабжения). Следует отметить, что для рассматриваемого вида отказа среднее значение напряжений трех фаз $U_{\text{сред}}$, как правило, не превышает уровня напряжений срабатывания защит от повышения (понижения) напряжения. Поэтому эти виды защит самостоятельно не могут формировать сигналы на отключение генератора при несимметрии фазных напряжений [4].

В настоящее время используются типовые схемы защиты от несимметрии фазных напряжений. Принцип действия их измерительных органов, как правило, основан на изменении сопротивлений реактивных элементов от величины несимметрии напряжений. В качестве измерительных органов используются, например, фильтры напряжений (токов) прямой, обратной и нулевой последовательностей и резонансные контуры [5–7].

На рисунках 2–5 приведены упрощенные схемы наиболее распространенных видов защит от несимметрии фазных напряжений: защита 1 — с использованием в качестве измерительного органа фильтра напряжений обратной последовательности (рису-

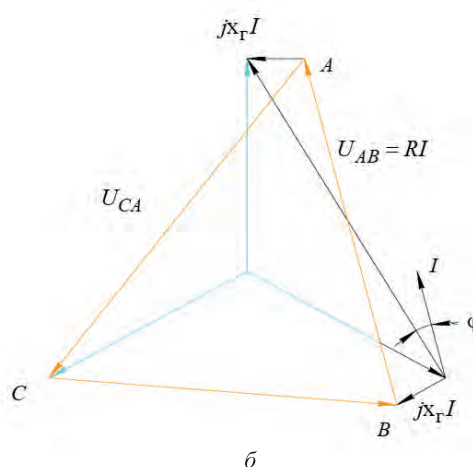
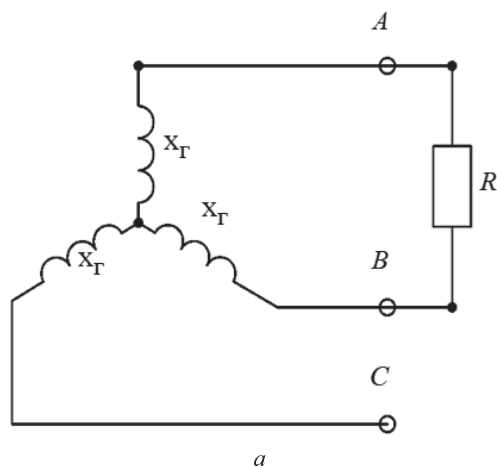


Рисунок 1 — Влияние неравномерности распределения нагрузок на несимметрию напряжений генератора:
а — схема включения неравномерной нагрузки генератора;
б — векторная диаграмма напряжений при включении нагрузки между фазами А и В

Таблица 1 — Величины фазных напряжений генератора при обрыве фазы				
Особенности нагрузки	Напряжение фазы A $U_{A'}$ В	Напряжение фазы B $U_{B'}$ В	Напряжение фазы C $U_{C'}$ В	Среднее напряжение фаз $U_{\text{сред}}'$ В
Активно-индуктивная, 50 А ($\cos\varphi = 0,8$)	156,0	158,0	83,0	133,0
Активно-индуктивная 50 А и асинхронный двигатель 6 кВ·А	152,0	154,0	32,0	121,5
Асинхронная нагрузка мощностью 6 кВ·А	140,0	139,0	86,0	121,5
Асинхронная нагрузка мощностью 10 кВ·А	132,0	136,0	96,0	121,0
Выпрямительное устройство ВУ-6Б	147,0	147,0	67,0	120,0

нок 2); защита 2 — схемы измерения разности выпрямленных напряжений сети и блока с активно-индуктивной нагрузкой (рисунок 3); защита 3 — схема измерения максимального значения выпрямленного напряжения (рисунок 4) и защита 4 — схема измерения низкочастотной составляющей пульсаций выпрямленного напряжения (рисунок 5).

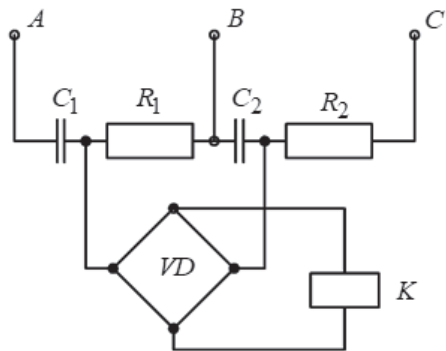


Рисунок 2 — Схема защиты 1 с использованием фильтра напряжений обратной последовательности

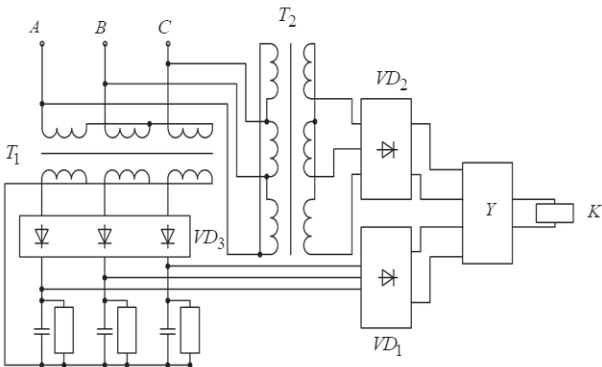


Рисунок 3 — Схема 2 измерения разности выпрямленных напряжений сети и блока с активно-индуктивной нагрузкой

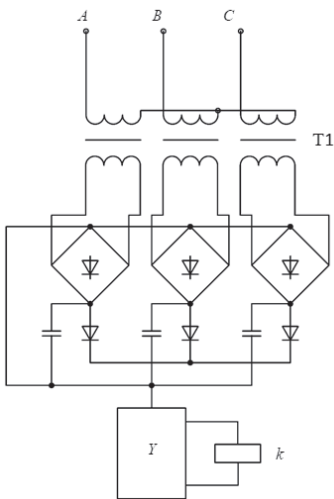


Рисунок 4 — Схема 3 измерения максимального значения выпрямленного напряжения

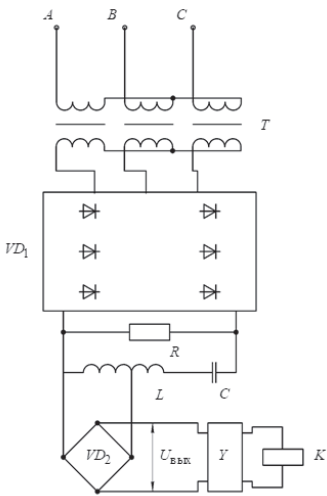


Рисунок 5 — Схема 4 измерения низкочастотной составляющей пульсаций выпрямленного напряжения

В настоящее время традиционные аналоговые защиты уступают место цифровым релейным устройствам с адаптивной логикой, мультиканальным анализом сигналов и интеграцией в систему управления воздушного судна BMS (Bus Management System) [4, 6, 8].

Современный аппарат защиты (АЗ) представляет собой цифровое релейное устройство DPR (Digital Protective Relay), состоящее из шести функциональных модулей (таблица 2).

Принципы построения защит от несимметрии фазных напряжений

Традиционные методы (устаревшие)

Фильтр обратной последовательности (см. рисунок 2) применялся в СССР и ранних западных летательных аппаратах (ЛА) (например, Boeing 737 Classic). Недостатки: чувствителен к гармоникам; не работает при асинхронных нагрузках с высоким коэффициентом мощности; низкая селективность при заземленной нейтрали.

Измерение разности выпрямленных напряжений (см. рисунок 3) эффективно работает только при активных нагрузках. Недостаток: не реагирует на обрыв фазы при подключении асинхронных двигателей.

*Современные методы
(на основе цифровой обработки сигналов)*

Метод 1: анализ обратной последовательности через сети DFT/FFT.

Вычисляется амплитуда обратной последовательности U_2 из трехфазных напряжений U_A, U_B, U_C :

$$U_2 = \frac{1}{3}(U_A + a^2U_B + aU_C), \tag{1}$$

$$a = e^{\frac{j\pi}{3}}. \tag{2}$$

Срабатывает при U_2 более 5–8 % от номинального напряжения.

Преимущества: не зависит от характера нагрузки; работает при любых гармониках; интегрируется в систему диагностики состояния агрегатов PHM (Prognostics and Health Management).

Метод 2: анализ низкочастотных пульсаций выпрямленного напряжения.

В выпрямителях (например, по схеме Ларионова) частота пульсаций при нормальной работе

$$f_{\text{пульс}} = 6f_{\text{сети}} = 2400 \text{ Гц (при } f_{\text{сети}} = 400 \text{ Гц)}. \tag{3}$$

При обрыве фазы

$$f_{\text{пульс}} = 2f_{\text{сети}} = 800 \text{ Гц}. \tag{4}$$

Современная реализация: используется цифровой полосовой фильтр IIR/FIR с центральной частотой 800 Гц.

Преимущества: устойчив к шумам; работает при любых типах нагрузок (включая мощные асинхронные двигатели); не требует дополнительных датчиков тока. Используется, например, в Airbus A350 XWB и MC-21-300.

Метод 3: машинное обучение для предиктивной защиты.

В экспериментальных системах (например, в Smart Power Distribution) применяются нейросети LSTM и CNN, обучающиеся на исторических данных аварий.

Модель предсказывает вероятность обрыва фазы на основе токов фаз; температуры кабелей; истории нагрузок; данных от датчиков вибрации привода.

Преимущество: предиктивное срабатывание, снижение ложных срабатываний на 40–60 %.

Таблица 2 — Модули DPR		
Элемент (модуль)	Функция	Реализация
Датчики сигналов (Д)	Измерение тока, напряжения, частоты, температуры	Шунты, трансформаторы тока с цифровым выходом (Rogowski coils), оптические датчики (ISO-1000, Honeywell)
Аналогово-цифровые преобразователи (АЦП)	Дискретизация и оцифровка сигналов	16–24-битные АЦП с частотой дискретизации более 10 кГц
Логическая часть (ЛЧ)	Обработка сигналов, вычисление параметров, принятие решений	Микроконтроллеры ARM Cortex-M7 / DSP, реализация алгоритмов Фурье, вейвлет-анализа, машинного обучения
Выдержка времени (ВВ)	Задержка срабатывания для селективности	Программируемые временные характеристики (IDMT – Inverse Definite Minimum Time)
Исполнительный модуль	Отключение цепи, переключение резерва	Твердотельные реле (SSR), IGBT-ключевые модули
Элементы памяти и связи	Хранение событий, обмен данными	Flash-память, Ethernet / ARINC 429 / MIL-STD-1553, протоколы IEC 61850-9-2

Оценка эффективности защит

Для оценки эффективности функционирования защит предложены различные критерии и показатели, например, процент правильных действий защиты, техническое совершенство, надежность срабатывания и др. В отечественной и зарубежной практике в качестве критерия оценки релейных защит промышленных систем электроснабжения используется обобщенный статистический показатель, называемый процентом правильных действий защиты [2, 4, 9, 10].

Однако специфические особенности функционирования и эксплуатации систем электроснабжения ВС не позволяют получить достоверных данных о количестве правильных и ложных срабатываний защит конкретного типа. Поэтому данный критерий не может быть использован для их сравнительной оценки. В то же время большое количество применяемых схем в отдельных видах защит систем электроснабжения ВС обуславливает необходимость введения такого критерия.

Опыт исследований серийных систем электроснабжения показывает, что практически все виды защит имеют определенную зону нечувствительности. Это позволяет, по аналогии с показателем правильных действий защиты, использовать критерий совершенства защиты K_c , относительно полно характери-

зующий степень совершенства исследуемой схемы защиты:

$$K_c = \frac{N_T}{N_H + N_T}, \tag{5}$$

где N_T — число условий, режимов работы и т. п., требующих срабатывание исправной защиты;

N_H — число условий, режимов работы и т. п., при которых исправная защита не должна срабатывать.

UF-анализ исследований эффективности рассматриваемых защит (см. рисунки 2—5) по данному критерию K_c при обрыве фазы в канале генерирования электроэнергии с авиационным синхронным генератором мощностью 40 кВ·А при изменении мощности характера нагрузки, подключаемой к шинам центрального распределительного устройства, сведены в таблицы 3 и 4, где символ 1 указывает на срабатывание, а символ 0 — на несрабатывание защиты.

Анализ данных таблицы 3 позволяет заключить, что эффективность защит от обрыва фаз и несимметрии фазных напряжений существенно зависит от характера и мощности нагрузки. Следует особо отметить, что наличие в бортовом оборудовании ВС асинхронных двигателей большой мощности резко снижает эффективность защит 1 и 3.

Таким образом, согласно критерию K_c наибольшую эффективность имеет защита 4, выполненная

Таблица 3 — Эффективность срабатывания защит

Характер нагрузки и показатель совершенства схемы	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4
Холостой ход	1	1	1	1
Асинхронный двигатель 6 кВ·А	0	1	1	1
Асинхронный двигатель 6 кВ·А с заземленной нейтралью	0	1	0	1
Асинхронный двигатель 10 кВ·А	0	0	0	1
Асинхронный двигатель 10 кВ·А с заземленной нейтралью	0	0	0	0
Трансформатор ТСЗ-0,75	1	1	1	1
Выпрямительное устройство ВУ-6Б	1	1	1	1
Показатель совершенства схемы защиты K_c	0,45	0,71	0,52	0,86

Таблица 4 — UF-анализ защит

Схема защиты	Тип измерения	K_c	Применение в ЛА	Комментарий
Схема 1	Фильтр обратной последовательности	0,43	Устаревшие Boeing 737 Classic, Ту-154, Ан-24	Чувствителен к гармоникам, низкая селективность при заземлении нейтрали, неэффективен при асинхронных нагрузках с высоким коэффициентом мощности

Продолжение таблицы 4				
Схема защиты	Тип измерения	K_c	Применение в ЛА	Комментарий
Схема 2	Разность выпрямленных напряжений	0,72	Airbus A320neo (частично)	Работает только при активных нагрузках, не реагирует на обрыв фазы при подключении асинхронной нагрузки
Схема 3	Максимум выпрямленного напряжения	0,57	Ил-96, Ту-204, Союз МС-22	Неэффективна при заземленной нейтрали. Эффективность резко снижается при наличии асинхронных двигателей большой мощности
Схема 4	Анализ низкочастотных пульсаций 800 Гц	0,86	Airbus A350, MC-21, Boeing 787	Рекомендуется для новых проектов. Для обеспечения высокого K_c параметры цепи нагрузки выпрямителя должны быть подобраны так, чтобы резонансный режим в ней возникал при частоте тока 800 Гц
Перспектива	Фильтр обратной последовательности (современная реализация через DFT/FFT)	—	—	Не зависит от характера нагрузки и от гармонических искажений. Легко интегрируется в систему диагностики
Перспектива	Анализ низкочастотных пульсаций 800 Гц (реализуется через цифровой полосовой фильтр с основной частотой 800 Гц)	—	Airbus A350 XWB, MC-21-300	Устойчив к шумам, работает при любых типах и характерах нагрузок

по схеме измерения низкочастотной составляющей пульсаций выпрямленного напряжения (см. рисунок 5).

Вывод: схема 4 демонстрирует наибольшую надежность (0,86) и наименьшую чувствительность к типу нагрузки, что делает ее оптимальным выбором для современных ЛА.

Заключение

Современные системы электроснабжения ВС требуют цифровых, адаптивных и многоканальных защит, способных работать при любых типах нагрузок — от активных до асинхронных. Для этого необходимо: перейти на цифровые DPR с реализацией метода 4 (анализ пульсаций 800 Гц) и внедрить алгоритм DFT для обратной последовательности как резервный; использовать гибридные схемы: DFT, совмещенные с машинным обучением и встроенным блоком PHM. Поддерживать совместимость с IEC 61850-9-2 и

ARINC 653; внедрить мониторинг в реальном времени параметров напряжения U_2 в систему BMS с автоматической передачей данных на наземный центр (через ACARS/ATN) [1, 4, 9, 10].

Наиболее эффективной схемой защиты от обрыва фазы и несимметрии фазных напряжений является анализ низкочастотной составляющей (800 Гц) пульсаций выпрямленного напряжения с использованием цифровых фильтров и DFT-анализа обратной последовательности.

Показатель совершенства K_c — единственный практически применимый критерий для сравнения защит в условиях ограниченной статистики аварий в авиации.

Внедрение цифровых релейных защит с интеграцией в систему управления ЛА (BMS) и PHM является обязательным условием для повышения безопасности и надежности новых поколений пассажирских и транспортных ВС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Перспективы развития электроэнергетических комплексов летательных аппаратов. Научно-методические материалы под редакцией С. П. Халютина. – М. : Изд-во ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2003.

2. Моделирование режимов несимметрии в авиационных системах электроснабжения / С. В. Кузнецов // Авиакосмическое приборостроение. – 2019. – № 3. – С. 25–33.
3. ГОСТ Р 54073-2017. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М.: Стандартинформ, 2018. – 33 с.
4. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник для вузов / В. А. Андреев. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 2007. – 639 с.
5. More Electric Aircraft: Power Systems and Challenges / J. Chen [et al.] // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2016. – Vol. 2, № 4. – P. 452–465.
6. Попов, А. П. Микропроцессорные устройства защиты авиационных электросетей / А. П. Попов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 88–96.
7. О построении систем интеллектуального управления и регулирования синхронных генераторов / Г. Н. Утляков, В. М. Асадуллин // Электротехнические комплексы и системы: межвуз. науч. сб. – Уфа: УГАТУ, 2005. – С. 52–56.
8. Шустов, М. А. Защита трехфазных цепей от несимметрии и обрыва фаз / М. А. Шустов // Энергетик. – 2021. – № 8. – С. 44–47.
9. Бушуев, В. В. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция и управление / В. В. Бушуев, Ю. Я. Любарский // Электричество. – 2013. – № 6. – С. 4–11.
10. Коняхин, С. Ф. Адаптивные системы защиты электроэнергетических систем / С. Ф. Коняхин, В. И. Лагуткин // Электротехника. – 2020. – № 4. – С. 12–18.

REFERENCES

1. Khalyutin S.P., ed. Perspektivy razvitiya elektroenergeticheskikh kompleksov letatel'nykh apparatov [Prospects for the Development of Electric Power Complexes of Aircraft]. Moscow, VVIA im. N.E. Zhukovskogo Publ., 2003 (in Russian).
2. Kuznetsov S.V. Modelirovanie rezhimov nesimmetrii v aviatsionnykh sistemakh elektrosnabzheniya [Modeling of Asymmetry Modes in Aircraft Power Supply Systems]. Aviakosmicheskoe priborostroenie, 2019, no. 3, pp. 25–33 (in Russian).
3. GOST R 54073-2017. Sistemy elektrosnabzheniya samoletov i vertoletov. Obshchie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii [Aircraft and Helicopter Power Supply Systems. General Requirements and Power Quality Standards]. Moscow, Standartinform Publ., 2018, 33 p. (in Russian).
4. Andreev V.A. Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya: uchebnik dlya vuzov [Relay Protection and Automation of Power Supply Systems: Textbook for Universities]. 5th ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007, 639 p. (in Russian).
5. Chen J., Wang Y., Zhang H. and Liu X. More Electric Aircraft: Power Systems and Challenges. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 452–465.
6. Popov A.P. Mikroprotssessornye ustroystva zashchity aviatsionnykh elektrosetei [Microprocessor Protection Devices for Aircraft Electrical Networks]. Nauchnyi vestnik MGTU GA, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 88–96 (in Russian).
7. Utlyakov G.N., Asadullin V.M. O postroenii sistem intellektual'nogo upravleniya i regulirovaniya sinkhronnykh generatorov [On the Construction of Intelligent Control and Regulation Systems for Synchronous Generators]. Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy: mezhvuzovskii nauchnyi sbornik. Ufa: UGATU Publ., 2005, pp. 52–56 (in Russian).
8. Shustov M.A. Zashchita trekhfaznykh tsepei ot nesimmetrii i obryva faz [Protection of Three-Phase Circuits against Asymmetry and Phase Loss]. Energetik, 2021, no. 8, pp. 44–47 (in Russian).
9. Bushuev V.V., Lyubarskii Yu. Ya. Intellektual'nye elektroenergeticheskie sistemy: kontseptsiya i upravlenie [Intelligent Electric Power Systems: Concept and Control]. Elektrichestvo, 2013, no. 6, pp. 4–11 (in Russian).
10. Konyakhin, S. F., and Lagutkin, V. I. Adaptivnye sistemy zashchity elektroenergeticheskikh sistem [Adaptive Protection Systems for Electric Power Systems]. Elektrotehnika, 2020, no. 4, pp. 12–18.

*Статья поступила в редакцию
24.04.2026*

Ю. А. ГУРВИЧ, А. С. ГАЛАНОВ, А. П. АКУЛИК, В. В. ВОРОНОВА, П. В. ТИХОНОВА

YU. GURVICH, A. GALANOV, A. AKULIK, V. VORONOVA, P. TIKHONOVA

ВЫБОР КРИТЕРИЕВ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ШАССИ САМОЛЕТА

SELECTION OF OSCILLATORY STABILITY CRITERIA IN AIRCRAFT LANDING GEAR DESIGN

Гурвич Юрий Абрамович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
gu1944@yandex.by

Yuri Gurvich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Natural Sciences and General Professional Disciplines of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
gu1944@yandex.by.

Галанов Александр Сергеевич – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Alexander Galanov – Cadet of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Акулик Аlesia Павловна – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Alesia Akulik – Cadet of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Воронова Валерия Витальевна – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Valeriya Voronova – Cadet of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Тихонова Полина Викторовна – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Polina Tikhonova – Cadet of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Аннотация: на практике при проектировании колесных машин используют четыре критерия колебательной устойчивости (отношение последовательных амплитуд, время или число циклов уменьшения амплитуды до заданной доли, среднеквадратичное отклонение колес относительно шкворней, логарифмический декремент колебаний), однако выполненные в данной работе исследования показали, что из-за серьезных просчетов при их формировании применение этих критериев может приводить к недопустимым ошибкам, поэтому были предложены новые критерии первого и второго видов, свободные от указанных недостатков. Критерии первого вида применяются, когда логарифмический декремент постоянен на всем процессе затухающих или нарастающих колебаний, а критерии второго вида – когда он не остается постоянным; при этом новые критерии могут использоваться в двух вариантах (на буквенной или на цифровой основе), причем цифровая основа имеет преимущество, поскольку на графиках арабскими цифрами обозначаются не только порядковые номера амплитуд, но и их численные значения.

Ключевые слова: критерий колебательной устойчивости движения, критерии первого и второго видов, формирование колебательных критериев на цифровой основе.

Abstract: in engineering practice, four criteria for the oscillatory stability of motion are still used in the design of wheeled vehicles: the ratio of successive amplitudes; the time or number of cycles required for the amplitude to decrease to a specified fraction of its initial value; the root-mean-square deviation of the wheels relative to the kingpins; and the logarithmic decrement of oscillations. However, the study has shown that, due to serious flaws in the formulation of these criteria, their application can lead to unacceptable errors. For this reason, new first- and second-type criteria free from these drawbacks have been proposed: first-type criteria are used when the logarithmic decrement remains constant throughout the process of decaying or growing oscillations, whereas second-type criteria are used when it does not remain constant. The new criteria may be employed in two versions, based either on a letter notation system or on a numerical one; the numerical system has an advantage because, in graphs, Arabic numerals can denote not only the ordinal numbers of amplitudes but also their numerical values.

Keywords: criterion for the oscillatory stability of motion, first- and second-type criteria, development of oscillatory criteria on a numerical basis.

Введение

Задачи многокритериального проектирования колесных транспортных средств оцениваются вектором, состоящим из нескольких локальных критериев, которые, как правило, оказывают неодно-

значное и противоречивое действие на проектируемый объект. Решение этих задач должно находиться в области компромиссов между локальными критериями [1]:

- приемлемой величины шимми колеса носовой опоры шасси самолета;

- устойчивости и безопасности движения с учетом среднего времени реакции водителя;
- плавности хода, достаточной стабилизации, усилия на рулевом колесе [2].

В литературе существуют четыре критерия колебательной устойчивости движения. Возникает вопрос: «Можно ли эти критерии применить на практике при оптимизации параметров сложных механических систем с качением?»:

- механико-математического описания взлета и посадки самолета;
- системы дифференциальных уравнений движения колеса с упругой шиной колесного транспортного средства, чтобы обеспечить во всем скоростном и частотном диапазонах движения область компромиссов критериев.

Исходя из вышесказанного, сформирована **цель работы**: установить, какие критерии колебательной устойчивости движения можно использовать при оптимизации параметров механико-математического описания шасси летательных аппаратов и любых колесных транспортных средств, чтобы обеспечить во всем скоростном диапазоне движения область компромиссов.

Обоснование цели состоит из трех частей, которые реализуются путем последовательного рассмотрения:

- недостатков и области применимости четырех критериев колебательной устойчивости-неустойчивости движения;
- разработки новых критериев колебательной устойчивости-неустойчивости движения;
- критериев колебательной устойчивости-неустойчивости движения, сформированных на цифровой основе.

Недостатки и области применимости четырех критериев колебательной устойчивости-неустойчивости движения

1. С помощью первого критерия

$$F_1 = A_i / A_{i+1} \quad (1)$$

невозможно оценить быстроту затухания двух колебательных процессов 1 и 2, потому что $A_1/A_{i+1} = A_2/A_{i+1}$ (рисунок 1).

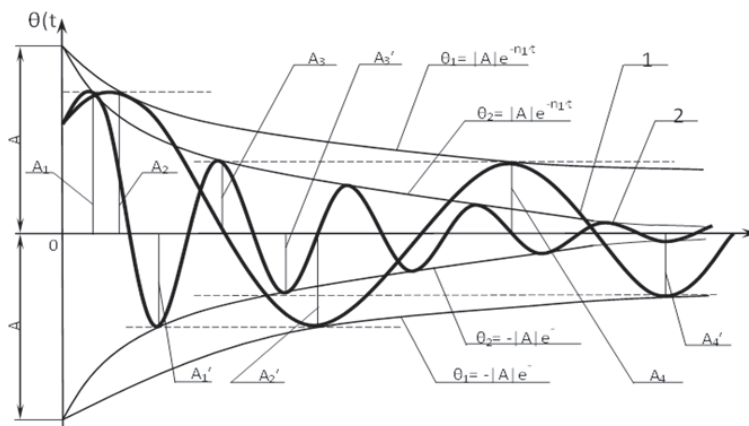


Рисунок 1 — К оценке работы первого критерия

2. Второй критерий:

$$F_2 = \frac{T}{\frac{A_i}{A_{i+1}}}, \quad (2)$$

где T — период колебаний.

Критерий (2) не способен дать точную оценку любому колебательному процессу.

3. Третий критерий:

$$F_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2 / (n-1)}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где θ_i — результат i измерения;

$\bar{\theta}$ — среднее арифметическое результатов n измерений угла отклонения управляемых колес относительно шкворней.

Критерий (3) даст одинаковую оценку затухающему и нарастающему процессам (рисунок 2).

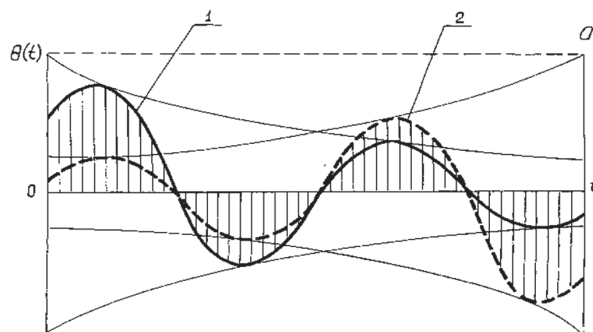


Рисунок 2 — К оценке работы третьего критерия

4. Четвертый критерий получен в курсе «Теоретическая механика» в разделе «Динамика» из дифференциального уравнения движения груза, прикрепленного к пружине, под действием двух сил: силы упругости и силы сопротивления среды, пропорциональной первой степени скорости. В результате выводится критерий темпа затухания колебательного процесса — логарифмический декремент колебаний:

$$D = \left[\ln \left(\frac{A_i}{A_{i+1}} \right) = nT \right], \quad (4)$$

где A_i — амплитуда;

n — коэффициент демпфирования;

T — период колебаний.

Этот критерий широко используется во многих областях науки и техники (например, при проектировании всех транспортных средств (самолетов, вертолетов, автомобилей и т. д.), на стадии проектирования звукоизолирующих перегородок в промышленных и гражданских зданиях).

Известно, что одним из средств борьбы с колебаниями упругих конструкций служат специальные покрытия, способные к интен-

сивному поглощению энергии колебаний. Эффективность применения на практике того или иного покрытия определяется критерием темпа затухания колебательного процесса D .

Экспериментально обнаружено парадоксальное явление, заключающееся в том, что покрытия, материал которых характеризуется большим значением критерия D , зачастую хуже демпфируют колебания, чем покрытия с меньшим значением этого критерия [1].

В литературе отсутствуют методики определения оптимальных значений параметров колесных транспортных средств, которые позволили бы в короткий срок и с малыми затратами добиваться наилучшей, хотя бы одной из выходных характеристик, во всем скоростном диапазоне движения машин.

На отсутствие такой методики сильное влияние оказало применение на практике четырех «плохих» критериев колебательной устойчивости движения.

Разработка новых критериев колебательной устойчивости-неустойчивости движения

Для исследований различного рода колебательных процессов предлагается два вида новых прикладных критериев колебательной устойчивости-неустойчивости движения, которые свободны от «парадокса».

При этом любой критерий каждого вида должен удовлетворять следующим требованиям:

- не должен противоречить теории линейных колебаний;
- должен отличать «медленные» и «быстрые» движения;
- может оценить колебания с увеличивающейся амплитудой.

«Расшифруем» перечисленные требования.

Под фразой «не противоречить теории линейных колебаний» понимается, что:

1) критерий не должен противоречить логарифмическому декременту колебаний, с помощью которого определяется темп затухания любых колебаний: линейных (для них логарифмический декремент — постоянное число) и нелинейных (логарифмический декремент постепенно меняется);

2) его можно аппроксимировать экспонентой, поскольку в основу логарифмического декремента колебаний положена экспоненциальная функция;

3) с его помощью можно оценить колебания с увеличивающейся амплитудой (нарастающие или расходящиеся колебания — признак неустойчивости движения).

Второе требование связано с терминами «медленные» и «быстрые» движения. Чтобы понять, что под ними кроется, рассмотрим пример.

Допустим, что колебательная система, например, управляемая ось автомобиля, имеет логарифмический декремент колебаний D , равный 10. Очевидно, что $D = 10$ можно получить бесчисленным числом способов сочетания n и T (таблица 3¹, в которой верхние строчки имеют большую величину периода колебаний T — соответствуют «медленному» движению управляемых колес; нижние строчки (с маленьким значением периода T) соответствуют «быстрому» движению управляемых колес).

Физически это означает следующее: при ширине дорожного полотна 3 м автомобиль, движущийся, например, со скоростью 15 м/с при «быстрых» движениях колес с полосы не сойдет. Если же движения колес «медленные», автомобиль на полотне не удержится.

Критерии первого вида

Исходя из сказанного, в качестве критериев первого вида предлагается величина, обратная коэффициенту n демпфирования системы.

$$F_1 = \frac{\frac{T}{2}}{\ln \frac{A_i}{A_{i+1}}}, \dots, F_1 = \frac{\frac{\lambda}{2} T}{\ln \frac{A_i}{A_{i+\lambda}}}, \quad (5)$$

где i, λ — целые числа.

Критерий F_1 своим числителем оценивает время, а знаменателем — тенденции к нарастанию или затуханию колебаний: если знаменатель больше нуля, то имеет место колебательная устойчивость (затухание колебаний), если меньше — колебательная неустойчивость (нарастание колебаний).

Например, если $\lambda = 5, i = 3, 6, 9, \dots, N$, то

$$F_1 = \frac{\frac{5}{2} T}{\ln \frac{A_i}{A_{i+\lambda}}} = \dots = \frac{2,5T}{\ln \frac{A_3}{A_8}} = \dots = \frac{2,5T}{\ln \frac{A_6}{A_{11}}} = \dots = \frac{2,5T}{\ln \frac{A_9}{A_{14}}} = \dots = \frac{2,5T}{\ln \frac{A_N}{A_{N+\lambda}}}.$$

Критерии первого вида (5) необходимо применять, когда логарифмический декремент колебаний остается постоянным для всего процесса затухающих или нарастающих колебаний (или для всего процесса стационарных колебаний).

Критерии второго вида

В качестве критериев второго вида предлагается также величина, обратная коэффициенту n демпфирования системы.

Приведем формулы для критериев второго вида $F_2, F_3, F_4, \dots$. Здесь каждой цифрой ряда 2, 3, 4, ... обозначается суммарное количество амплитуд в числителе и в знаменателе дроби, находящейся под знаком натурального логарифма.

Критерий F_2 ($j > i$):

$$F_2 = \frac{\frac{\lambda}{2} T}{\ln \left(\frac{A_i + A_j}{A_{i+\lambda} + A_{j+\lambda}} \right)}. \quad (6)$$

Если $\lambda = 1, i = 1, j = 3$, то

$$F_2 = \frac{\frac{T}{2}}{\ln \left(\frac{A_1 + A_3}{A_2 + A_4} \right)}.$$

Если $\lambda = 3, i = 1, j = 2$, то

$$F_2 = \frac{\frac{3}{2} T}{\ln \left(\frac{A_1 + A_2}{A_4 + A_5} \right)}.$$

¹ Авиационный вестник. — 2024. — №10. — С. 77-96.

Критерий F_3 ($k > j > i$):

$$F_3 = \frac{\frac{\lambda}{2}T}{\ln\left(\frac{A_i + A_j + A_k}{A_{i+\lambda} + A_{j+\lambda} + A_{k+\lambda}}\right)} \quad (7)$$

Если $\lambda = 4, i = 1, j = 3, k = 4$, то

$$F_3 = \frac{2T}{\ln\left(\frac{A_1 + A_3 + A_4}{A_5 + A_7 + A_8}\right)}.$$

Критерий F_4 ($l > k > j > i$):

$$F_4 = \frac{\frac{\lambda}{2}T}{\ln\left(\frac{A_i + A_j + A_k + A_l}{A_{i+\lambda} + A_{j+\lambda} + A_{k+\lambda} + A_{l+\lambda}}\right)}. \quad (8)$$

Если $\lambda = 6, i = 2, j = 3, k = 4, l = 5$, то

$$F_4 = \frac{3T}{\ln\left(\frac{A_2 + A_3 + A_4 + A_5}{A_8 + A_9 + A_{10} + A_{11}}\right)}.$$

Критерии второго вида (6) – (8) могут применяться в тех случаях, когда логарифмический декремент колебаний не является постоянной величиной для всего процесса затухающих или нарастающих колебаний (или для всего процесса нестационарных колебаний).

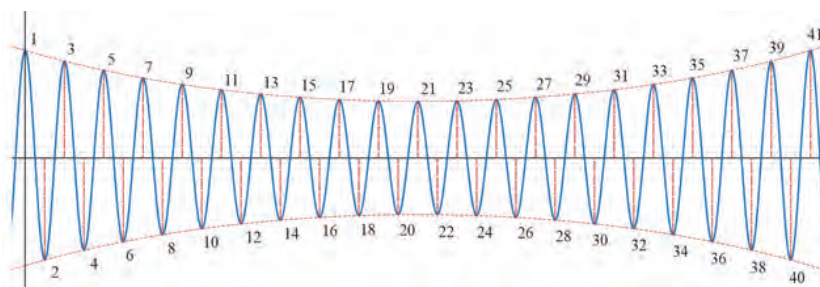


Рисунок 3 — Колебательный процесс: 20 периодов и 41 амплитуда

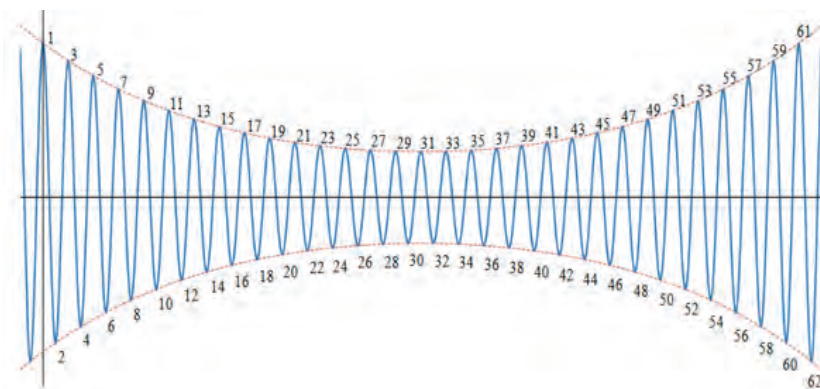


Рисунок 4 — Колебательный процесс: 30 периодов и 62 амплитуды

Критерии колебательной устойчивости-неустойчивости движения, сформированные на цифровой основе

Критерии первого вида

В качестве критериев первого вида предлагается величина, обратная коэффициенту n демпфирования системы (5).

На рисунке 3 изображен стационарный колебательный процесс, где красным цветом показаны огибающие колебаний и амплитуды. Арабскими цифрами обозначены порядковые номера амплитуд и их численные значения:

$$1. \lambda = 6, F_1 = \frac{\frac{6}{2}T}{\ln\frac{1}{1+6}} = \frac{3T}{\ln\frac{1}{1+6}}.$$

$$2. \lambda = 33, F_1 = \frac{\frac{33}{2}T}{\ln\frac{1}{1+33}} = \frac{16,5T}{\ln\frac{1}{1+33}}.$$

Критерии второго вида

На рисунке 4 изображен стационарный колебательный процесс, содержащий 30 периодов и 62 амплитуды.

Критерии $F_2 - F_6$ на цифровой основе сформированы в соответствии с рисунком 4.

I. Критерий F_2 ($j > i$):

$$F_2 = \frac{\frac{\lambda}{2}T}{\ln\left(\frac{A_i + A_j}{A_{i+\lambda} + A_{j+\lambda}}\right)}. \quad (9)$$

Если $\lambda = 1, i = 1, j = 3$, то

$$F_2 = \frac{\frac{T}{2}}{\ln\left(\frac{1+3}{2+4}\right)}.$$

Если $\lambda = 3, i = 1, j = 2$, то

$$F_2 = \frac{\frac{3}{2}T}{\ln\left(\frac{1+2}{4+5}\right)}.$$

II. Критерий F_3 ($k > j > i$):

$$F_3 = \frac{\frac{\lambda}{2}T}{\ln\left(\frac{A_i + A_j + A_k}{A_{i+\lambda} + A_{j+\lambda} + A_{k+\lambda}}\right)}. \quad (10)$$

Если $\lambda = 4, i = 1, j = 3, k = 4$, то

$$F_3 = \frac{2T}{\ln\left(\frac{1+3+4}{5+7+8}\right)}.$$

III. Критерий F_4 ($l > k > j > i$):

$$F_4 = \frac{\frac{\lambda}{2}T}{\ln\left(\frac{A_i + A_j + A_k + A_l}{A_{i+\lambda} + A_{j+\lambda} + A_{k+\lambda} + A_{l+\lambda}}\right)}. \quad (11)$$

Если $\lambda = 6, i = 2, j = 3, k = 4, l = 5$, то

$$F_4 = \frac{2T}{\ln\left(\frac{2+3+4+5}{8+9+10+11}\right)}.$$

IV. Критерий F_5 ($m > l > k > j > i$):

$$F_5 = \frac{\frac{\lambda}{2}T}{\ln\left(\frac{A_i + A_j + A_k + A_l + A_m}{A_{i+\lambda} + A_{j+\lambda} + A_{k+\lambda} + A_{l+\lambda} + A_{m+\lambda}}\right)}. \quad (12)$$

Если $\lambda = 40, i = 16, j = 17, k = 18, l = 19, m = 20$, то

$$F_5 = \frac{20T}{\ln\left(\frac{16+17+18+19+20}{56+57+58+59+60}\right)}.$$

Подчеркнем, что количество слагаемых в числителе и знаменателе дроби под знаком логарифма в критерии колебательной устойчивости-неустойчивости движения на цифровой основе может быть любым. Например, если $\lambda = 40, i = 1, j = 2, k = 3, l = 4, m = 5, \dots, 8, 9, 10$, то

$$F_6 = \frac{20T}{\ln\left(\frac{1+2+3+4+5+6+7+8+9+10}{51+52+53+54+55+56+57+58+59+60}\right)}.$$

Заключение

На практике при проектировании колесных транспортных средств используют четыре критерия колебательной устойчивости или неустойчивости движения:

1) отношение последовательных амплитуд колебаний;

2) время или количество циклов, за которое амплитуда колебаний уменьшится до величины, составляющей определенную долю первоначальной;

3) величина среднеквадратичного отклонения колес относительно шкворней;

4) логарифмический декремент колебаний. Как показали исследования, выполненные в данной работе, применение этих критериев из-за серьезных просчетов при их формировании может привести к недопустимым ошибкам при работе колесных машин.

Поэтому были предложены новые критерии колебательной устойчивости движения первого и второго видов, которые свободны от ошибок:

- критерии первого вида необходимо применять, когда логарифмический декремент колебаний остается постоянным для всего процесса затухающих или нарастающих колебаний;

- критерии второго вида могут применяться в тех случаях, когда логарифмический декремент колебаний не является постоянной величиной для всего процесса затухающих и нарастающих колебаний или во всех случаях при наличии нестационарных колебательных процессов.

Критерии колебательной устойчивости движения первого и второго видов можно использовать на практике в двух вариантах, когда критерии сформированы на буквенной или на цифровой основе.

Использование цифровой основы по сравнению с буквенной основой дает определенные преимущества: на графических зависимостях колебательных процессов арабскими цифрами обозначаются не только порядковые номера амплитуд, но и, главное, их численные значения.

Результаты данных исследований необходимо внедрить в учебные процессы технических вузов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Повышение эффективности преподавания теоретической и прикладной механики с помощью новых прогрессивных технологий / Ю. А. Гурвич, К. К. Крамник, А. Ю. Демко, И. Л. Бурдин, Г. А. Сенокосов // *Авиационный вестник*. – 2024. – № 10. – С. 77–96.
2. Гурвич, Ю. А. Многокритериальное проектирование управляемых неразрезных осей грузовых автомобилей / Ю. А. Гурвич // *Сборник научных статей военной академии Республики Беларусь*. – 2018. – № 35. – С. 72–80.

REFERENCES

1. Gurvich Yu.A., Kramnik K.K., Demko A.Yu., Burdin I.L., Senokosov G.A. Povysheniye effektivnosti prepodavaniya teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki s pomoshch'yu novykh progressivnykh tekhnologiy [Improving the Efficiency of Teaching Theoretical and Applied Mechanics Using New Advanced Technologies] // *Aviatsionnyy vestnik = Aviation Herald*, 2024, no. 10, pp. 77-96 (in Russian).
2. Gurvich Yu.A. Mnogokriterial'noye proyektirovaniye upravlyayemykh nerazreznykh osey gruzovykh avtomobiley [Multi-Criteria Design of Controlled Continuous Axles for Trucks] // *Sbornik nauchnykh statey voyennoy akademii Respubliki Belarus' = Collection of Scientific Articles by the Military Academy of the Republic of Belarus*, 2018, no. 35, pp. 72-80 (in Russian).

Статья поступила в редакцию
01.04.2026

Ю. А. ГУРВИЧ, М. А. СИДОРЕНКО, О. О. ОТЧИК, С. Н. ПРОКОПОВИЧ,
А. С. КРУПЕЦКАЯ, Т. С. БИРЮКОВ, В. В. МАЗОВКА

YU. GURVICH, M. SIDORENKO, O. OTCHYK, S. PROKOPOVICH, A. KRUPETSKAYA,
T. BIRYUKOW, V. MAZOVKA

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЕВ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ И АПЕРИОДИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ

DESIGN OF WHEELED VEHICLES USING CRITERIA OF OSCILLATORY AND APERIODIC STABILITY OF MOVEMENT

Гурвич Юрий Абрамович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
gu1944@yandex.by

Yuri Gurvich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Natural Sciences and General Professional Disciplines of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
gu1944@yandex.by.

Сидоренко Михаил Александрович – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Mikhail Sidorenko – Cadet of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Отчик Ольга Олеговна – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Olga Otchik – Cadet of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Прокопович Станислав Николаевич – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Stanislav Prokopovich – Cadet of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Крупецкая Анна Сергеевна – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Anna Krupetskaya – Cadet of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Бирюков Тимофей Сергеевич – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Timofey Biryukow – Cadet of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Мазовка Валерия Владимировна – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Valeriya Mazovka – Cadet of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Аннотация: система линеаризованных дифференциальных уравнений движения управляемых колес с неголономными связями включает стабилизацию, где критерием служит минимальное время возврата колес в нейтральное положение, а компромисс с учетом среднего времени реакции водителя характеризуют два критерия: колебательный (оценивает колебательные движения) и аperiодический (определяет аperiодические движения), оба адаптированы к показателям устойчивости и стабилизации с учетом времени реакции водителя. Наложены ограничения на величину периода T для избегания больших инерционных нагрузок. Сформирован алгоритм выбора параметров управляемой оси для всего диапазона скоростей. На основе комплекса работ впервые реализованы два метода оптимального проектирования колесных транспортных средств (шасси самолета, болид «Формулы-1», легковые и грузовые автомобили, тяжелые самосвалы БелАЗа): первый использует сумму двух критериев колебательной и аperiодической устойчивости с учетом времени реакции водителя, второй – многокритериальное проектирование на основе минимаксных критериев. Таким образом, оптимальное проектирование любых типов транспортных средств может выполняться по сумме этих двух критериев.

Ключевые слова: критерии колебательных и аperiодических движений, главный вектор и главный момент сил инерции колеса, алгоритм выбора совокупности параметров управляемой оси колесной машины, оптимальное проектирование любых типов транспортных средств.

Abstract: the system of linearized differential equations of motion of the steered wheels with non-holonomic constraints includes stabilization, where the criterion is the minimum time for the wheels to return to the neutral position, and the compromise, taking into account the average driver reaction time, is characterized by two criteria: the oscillatory criterion (which evaluates oscillatory movements) and the aperiodic criterion (which determines aperiodic movements), both of which are adapted to the stability and stabilization indicators, taking into account the driver reaction time. Restrictions

have been imposed on the value of the period T to avoid large inertial loads, and a new seven-point algorithm has been developed for selecting the parameters of the controlled axis for the entire speed range. Based on the complex of works, two methods of optimal design of wheeled vehicles (aircraft chassis, Formula 1 car, passenger and cargo cars, heavy dump trucks BelAZ) were implemented for the first time: the first method uses the sum of two criteria of oscillatory and aperiodic stability, taking into account the driver's reaction time, while the second method involves multi-criteria design based on minimax criteria. Thus, the optimal design of any type of vehicle can be performed using the sum of these two criteria.

Keywords: criteria for oscillatory and non-periodic movements, the main vector and main moment of inertia forces of the wheel, an algorithm for selecting a set of parameters for the controlled axle of a wheeled vehicle, and optimal design of any type of vehicle.

Введение

Впервые вопрос о разработке методики оптимизации параметров шасси самолета и других колесных транспортных средств на основе новых критериев колебательных и аperiodических движений, которые одновременно учитывали бы показатели устойчивости и стабилизации, безопасности движения и среднего времени реакции водителя, был поднят в работе [1]. Некоторые неточности, отдельные уточнения и корректировки этой работы были выполнены в статье [2].

В этих двух работах для создания методики оптимизации сделано следующее:

- адаптирован критерий колебательных движений второго вида для учета показателей устойчивости и стабилизации, безопасности движения и среднего времени реакции водителя;
- сформирован новый критерий аperiodических движений управляемых колес;
- критерии колебательной и аperiodической устойчивости движения использованы в новой методике и алгоритме оптимизации параметров механико-математических описаний различных конструкций шасси самолетов и управляемых осей грузовых автомобилей, отличающихся между собой числом степеней свободы управляемых колес; количеством учтенных выходных характеристик; числом управляемых параметров; числом и видом уравнений негOLONных связей.

С помощью этой методики во всем скоростном и частотном диапазонах движения можно найти область компромиссов критериев при выборе приемлемой для практики величины шимми колеса носовой опоры шасси самолета, устойчивости и безопасности движения колесных транспортных средств с учетом среднего времени реакции водителя, плавности хода, достаточной стабилизации, усилия на рулевом колесе и износа шин [1, 2]. Однако в этих работах методика оптимизации не была адаптирована к автомобилям разных классов.

По данным ЮНЕСКО величина диапазона среднего времени реакции водителя сократилась от 0,5–2,5 с до 0,5–1,5 с. В этой связи возникла необходимость:

- адаптировать методику оптимизации по критериям устойчивости, стабилизации и безопасности движения к автомобилям разных классов;
- ввести коррективы и уточнения в методику оптимизации, например, в алгоритм оптимизации параметров различных конструкций шасси самолетов и управляемых осей грузовых автомобилей.

Для полного описания и понимания методики оптимизации, адаптированной для разных классов машин, необходимо провести краткий обзор работ по

этому вопросу, а в некоторых местах данной статьи использовать отдельные фрагменты, выдержки и математические выражения из работ [1, 2].

Цель данной работы: ввести коррективы и уточнения в методику оптимизации, приведенную в [1, 2], адаптировать ее с учетом нового диапазона среднего времени реакции водителя к автомобилям разных классов.

Обоснование цели состоит из четырех частей, которые реализуются путем последовательного рассмотрения:

- краткого обзора работ и анализа методов оптимального проектирования колесных транспортных средств на основе критериев колебательной и аperiodической устойчивости движения;
- применения колебательных и аperiodических критериев для оптимального проектирования разных классов колесных транспортных средств;
- применения колебательных и аperiodических критериев для оптимального проектирования любых технических систем;
- применения второго метода многокритериального проектирования колесных машин на основе $F_I + F_{II}$ с помощью минимаксных критериев.

I. Краткий обзор работ и анализ методов оптимального проектирования колесных транспортных средств на основе критериев колебательной и аperiodической устойчивости движения

Алгоритм оптимального проектирования колесных транспортных средств состоит из следующих этапов:

- формирование механико-математических описаний движения различных конструкций колесных машин;
- определение динамических характеристик шин в эксплуатационных режимах движения колесных транспортных средств;
- проведение экспериментальных работ по определению частотных характеристик силового взаимодействия колеса с упругой шиной и твердой дорогой;
- сравнение частотных характеристик, определенных по теориям качения колеса с упругой шиной по твердой дороге, с аналогичными экспериментальными частотными характеристиками;
- определение областей применимости теорий качения колеса с упругой шиной по твердой дороге;
- формирование критериев колебательной устойчивости движения;
- формирование критериев колебательной и аperiodической устойчивости движения;
- иллюстрация алгоритма совместной «работы» критериев колебательной и аperiodической устойчивости движения;

- описание работы алгоритма выбора совокупности параметров управляемой оси.

1. Формирование механико-математических описаний движения различных конструкций колесных машин

Механико-математические описания движения различных конструкций рассматриваются в работе [3], где показана методика многокритериальной оптимизации параметров уже сформированных дифференциальных уравнений движения различных конструкций управляемых неразрезных осей грузовых автомобилей, применяемых в военной и гражданской технике, отличающихся между собой числом степеней свободы управляемых колес, количеством учтенных выходных характеристик и числом управляемых параметров.

2. Определение динамических характеристик шин в эксплуатационных режимах движения колесных транспортных средств

В статье [4] описывается экспериментально-аналитический метод определения динамических характеристик шин в эксплуатационных режимах движения колесных транспортных средств.

Введено новое понятие – коэффициент динамической боковой жесткости шины, который, как правило, на 20 – 40 % меньше, чем обычно используемый на практике коэффициент боковой жесткости, получаемый при испытаниях шины в статике.

3. Проведение экспериментальных работ по определению частотных характеристик силового взаимодействия колеса с упругой шиной и твердой дорогой

В работе [5] приведены результаты экспериментальных работ по определению амплитудных и фазовых частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) силового взаимодействия колеса с упругой шиной и твердой дорогой, выполненных на специальной экспериментальной установке, а также метод параметрической идентификации (МПИ) авиационного колеса 400×150 модели 5. С помощью МПИ в широком диапазоне путевой частоты от 0 до 25 рад/м выполнено сравнение значений кинематических коэффициентов (КК), полученных в результате проведения двух экспериментов (колеса с шиной 400×150 [6] и колеса с шиной 400×150 модели 5) на специальной экспериментальной установке [5]. При сужении диапазона путевой частоты уменьшались значения КК, полученных МПИ. В диапазоне путевой частоты от 0 до 0,5 рад/м разница в значениях КК, полученных в МПИ [5] и в [6], достигла 10–15 %.

4. Сравнение частотных характеристик, определенных по теориям качения колеса с упругой шиной по твердой дороге, с аналогичными экспериментальными частотными характеристиками

В результате сравнения теоретических АЧХ и ФЧХ боковой силы с аналогичными экспериментальными частотными характеристиками (ЧХ) авиа-

ционного колеса 400×150 модели 5 с помощью феноменологического подхода и специальной методики математической обработки экспериментальных ЧХ [5, 10] построены области применимости теорий качения (ТК) [5–8] в функции путевой частоты (рисунок 1).

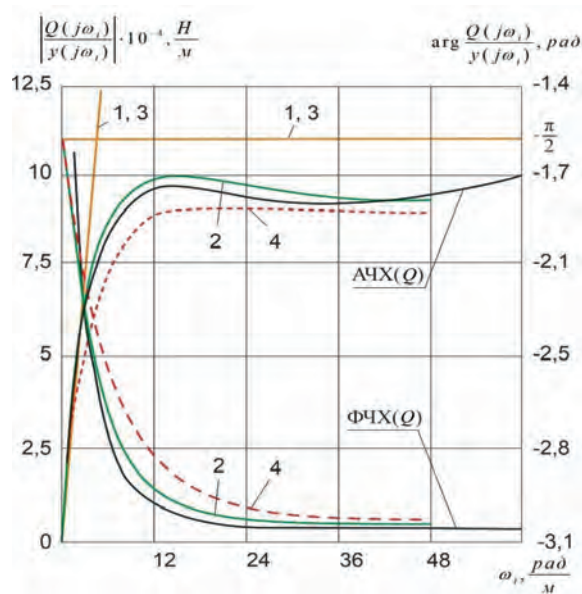


Рисунок 1 — Области применимости ТК:

- 1 – АЧХ и ФЧХ боковой силы ТК [7];
- 2 – АЧХ и ФЧХ боковой силы ТК [6];
- 3 – АЧХ и ФЧХ боковой силы, полученные по методу движения с большими скоростями (МДБС) ТК [8];
- 4 – АЧХ и ФЧХ, полученные по методу больших величин кинематических параметров (МБВКП) ТК [8];
- АЧХ(Q) и ФЧХ(Q) – экспериментальные ЧХ боковой силы при боковом гармоническом перемещении авиационного колеса 400×150 модели 5

5. Определение областей применимости теорий качения колеса с упругой шиной по твердой дороге

Проектирование шасси самолета и других летательных аппаратов, а также любых колесных транспортных средств, необходимо осуществлять с помощью механико-математических теорий качения колеса с упругой шиной по твердой поверхности [13]:

А. Теория неголономного качения упругой шины по твердой поверхности академика М. В. Келдыша [6].

Б. Методы Ю. И. Неймарка и Н. А. Фуфаева [8] применяются для понижения порядка системы дифференциальных уравнений неголономного шимми в [6] колесных транспортных средств в следующих случаях:

- метод движения с большими скоростями (МДБС) применяется в узком диапазоне путевой частоты ω_i от 0 до 0,5 рад/м для шин гоночных автомобилей;
- метод больших величин кинематических параметров (МБВКП) применяется в широком диапазоне путевой частоты ω_i от 0 до 25 рад/м для жестких шин грузовых автомобилей и тракторов;
- объединенный метод (МДБС + МБВКП) применяется в практике проектирования колесных машин, когда нужно учитывать развал и сходжение колес при

определении усилия, действующего на подшипник через ступицу колеса.

В. ТК железнодорожного (автомобильного) колеса по твердой дороге В. А. Коронатова [11, 12], в которой отсутствуют все неточности и некорректности поликомпонентной теории сухого трения академиков РАН В. Ф. Журавлева и Д. М. Климова [9]. Однако применение новой ТК на практике, по мнению самого автора, пока невозможно [11, 12]. Эту ТК можно применять в железнодорожном (для жестких колес) и в автомобильном (для упругих колес) транспорте, для колес которого введен параметр

$$\alpha = R/\varepsilon,$$

где R — радиус колеса;

ε — средний радиус пятна контакта колеса с дорогой ($\varepsilon_{\text{желез}} \ll \varepsilon_{\text{авт}}$) [11, 12].

6. Формирование критериев колебательной устойчивости движения

Для исследований различного рода колебательных движений предлагается два вида новых прикладных критериев колебательной устойчивости движения:

$$F_1 = \frac{\frac{\lambda}{2} T}{\ln \frac{A_i}{A_{i+\lambda}}},$$

$$F_2 = \frac{\frac{\lambda}{2} T}{\ln \left(\frac{A_i + A_j}{A_{i+\lambda} + A_{j+\lambda}} \right)}, \quad (1)$$

где i, λ — целые числа.

Первый вид критериев необходимо применять для всех видов затухающих или нарастающих колебаний, которыми описывают установившиеся во времени процессы, а второй — для описания неустойчивых процессов.

7. Формирование критериев колебательной и аperiodической устойчивости движения

Для исследований колебательных и аperiodических движений предлагается совокупность двух критериев, работающих совместно [2]. С их помощью можно оценить показатели устойчивости движения и стабилизации управляемых колес с учетом критерия — среднее время реакции водителей.

Первый критерий, взятый из колебательных критериев второго вида (1) и адаптированный к показателям устойчивости и стабилизации, имеет вид

$$F_1 = \min \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{|A_1| + |A_2|}{|A_5| + |A_6|}}, \quad (2)$$

где $t_2 = 2T + t_1$ — время, за которое траектория колебательного движения управляемых колес относительно шкворней достигает пятого экстремума;

T — период колебаний;

t_1 — время, за которое траектория колебательного движения управляемых колес относительно шкворней достигает первого экстремума;

$|A_1|, |A_2|$ и $|A_5|, |A_6|$ — соответственно модули амплитуд первого и третьего колебаний.

Второй критерий необходим для определения характеристики аperiodических движений:

$$F_{II} = \min \frac{\int_{t_1}^{t_2} |\theta(t)| dt}{\ln \left| \frac{\theta_1}{\theta_2} \right|}, \quad (3)$$

где t — время;

$\theta(t)$ — зависимость угла поворота управляемых колес относительно шкворней в функции времени;

θ_1 — угол поворота управляемых колес при $t = t_1$;

θ_2 — угол поворота управляемых колес, совершающих аperiodическое движение при $t = t_2$.

Интенсивность уменьшения или увеличения начального угла поворота колес от нейтрального положения учитывается и числителем, и знаменателем критерия F_{II} : если знаменатель больше нуля, то наблюдается аperiodическая устойчивость, если меньше — аperiodическая неустойчивость.

8. Иллюстрация алгоритма совместной «работы» критериев колебательной и аperiodической устойчивости движения

Алгоритм совместной «работы» критериев F_1 и F_{II} показан на рисунке 2 и заключается в следующем [1, 2].

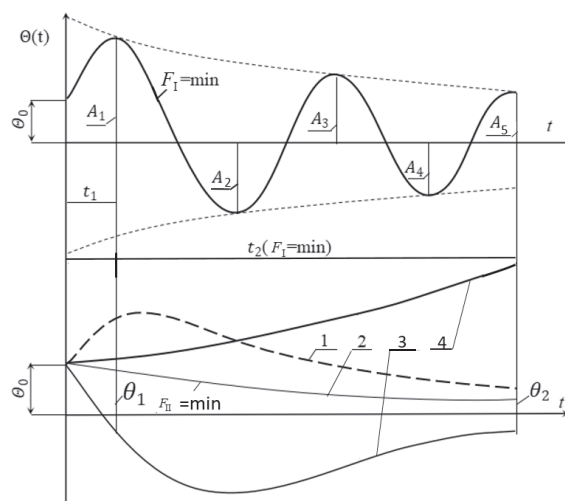


Рисунок 2 — Геометрическая интерпретация совместной «работы» критериев F_1 и F_{II}

В n -мерное пространство параметров моста одним из вероятностных методов (Монте-Карло или ЛП-поиска [10]) выбрасываются пробные точки — совокупности параметров моста [2].

Для каждой пробной точки одним из численных методов решается система дифференциальных уравнений движения моста с неголономными связями, представляющая собой механико-математическое описание движения какой-либо одной колесной машины [3].

Затем с помощью критерия F_I (2) исследуются зоны колебательной устойчивости и неустойчивости. На числитель этого критерия, т. е. на величину T необходимо ввести два ограничения, так как:

- при малых значениях T будут большими главный вектор Φ и главный момент M^Φ сил инерции колеса, которые негативно скажутся на работе деталей рулевого привода;

- при больших величинах T появляется опасность отклонения центра масс машины от прямолинейного движения при повороте колес от нейтрального положения.

Вычисленные значения критерия F_I ранжируются в порядке возрастания. Затем определяется время t_1 и t_2 , соответствующее минимальному значению критерия F_I . Это время используют в качестве верхнего и нижнего пределов интеграла F_{II} (3).

9. Описание работы алгоритма выбора совокупности параметров управляемой оси

Для оптимизации параметров управляемых осей (или мостов) разработан новый вычислительный алгоритм выбора совокупности параметров управляемой оси, приемлемой для всего диапазона скоростей движения колесной машины, который отличается от алгоритма в [1, 2]. С его помощью осуществляется систематический просмотр многомерной области n -мерного пространства параметров пробными точками C_{ij} , являющимися членами ЛП-последовательности (где $i = 1, N$ – число пробных точек; $j = 1, n$ – число варьируемых параметров) [5, 10].

Поиск значений критериев F_I для моста характеризуется следующим порядком действий.

Сначала в предполагаемом скоростном диапазоне движения проектируемой машины выбирают несколько скоростей, например 10, и по каждой из них выполняют одиннадцать расчетных процедур:

1. Для каждой пробной точки C_{ij} со своим порядковым номером и для каждой из десяти скоростей численным способом решается система дифференциальных уравнений движения какого-либо одного колесного транспортного средства. Различные конструкции транспортных средств вместе с их механико-математическими описаниями приведены в [3].

2. Выполняется разделение решений этой системы уравнений на два отдельных вида движений колес с шинами – на колебательные и на апериодические.

3. Для пробных точек с колебательным движением колес для каждого значения скорости вычисляется критерий F_I с учетом второго ограничения (см. п. 8. Порядок совместной «работы» критериев F_I и F_{II}). Далее формируется таблица, которая состоит из десяти столбцов. Если для какой-то пробной точки при каком-то значении скорости (в соответствующем столбце) второе ограничение не выполняется, то на значение критерия налагается штраф в виде большого числа, которое займет последнее место в данном столбце.

4. Выполняется ранжирование значений критерия F_I в порядке их возрастания. Верхние строчки ранжированных значений соответствуют их минимальным значениям, т. е. колебательной устойчивости, а нижние с учетом штрафа – наоборот, соответствуют их максимальным значениям – колебательной неустойчивости. В итоге формируется таблица, число строк

в которой соответствует числу пробных точек со своими номерами, а число столбцов – числу скоростей движения.

5. Из таблицы ранжированных значений критерия F_I для каждого значения скорости определяется множество допустимых решений (параметров) и соответствующие им значения t_1 и t_2 .

6. Для всего диапазона скоростей из множества допустимых значений критерия F_I выбираются точки Парето, из которых выбирается одна точка (обозначим ее – точка Парето-КД). При каждом значении скорости у нее будут свои значения t_1 и t_2 .

7. Для точки Парето-КД и пробных точек с апериодическим движением с учетом времени $t_2 = t_2(F_I = \min)$ вычисляется критерий F_{II} .

8. Выполняется ранжирование значений критерия F_{II} в порядке возрастания. Верхние строчки соответствуют их минимальным значениям, т. е. апериодической устойчивости, а нижние – наоборот соответствуют их максимальным значениям – апериодической неустойчивости. В итоге формируется таблица ранжированных значений критерия F_{II} , число строк в которой соответствует числу пробных точек со своими номерами, а число столбцов – числу скоростей движения.

9. Из таблицы ранжированных значений критерия F_{II} для каждого значения скорости определяется множество допустимых решений (параметров) и соответствующие им значения t_1 и t_2 .

10. Для всего диапазона скоростей из множества допустимых значений критерия F_{II} выбираются точки Парето-АД. При каждом значении скорости у них будут свои значения t_1 и t_2 .

11. Выбор окончательного решения из точки Парето-КД и точек Парето-АД состоит из трех вычислительных процедур:

- если значение точки Парето-КД меньше минимального из значений точек Парето-АД, выбирается значение точки Парето-КД;

- если значение точки Парето-КД находится в первой четверти диапазона между минимальным и максимальным значениями точек Парето-АД, выбирается значение точки Парето-КД или минимальное значение точки Парето-АД;

- если значение точки Парето-КД больше любого из значений точек Парето-АД, выбирается значение точки Парето-АД.

II. Применение колебательных и апериодических критериев для оптимального проектирования разных классов колесных транспортных средств

В связи с существованием разных классов колесных транспортных средств в алгоритме выбора совокупности параметров управляемой оси могут измениться нижние и верхние пределы периода T . При этом изменятся значения главного вектора Φ и главного момента M^Φ сил инерции колеса. Соответственно, изменится и вид колебательного критерия F_I , который для разных классов колесных машин может принимать различные формы (1).

Для проектирования колесных транспортных средств применяется следующий алгоритм:

1. С помощью критерия F_I (2) исследуются зоны колебательной устойчивости и неустойчивости. На числитель этого критерия, т. е. на величину T вводятся

два ограничения, которые влияют на значения главного вектора Φ и главного момента M^Φ сил инерции колеса.

2. Вычисленные значения критерия F_I с учетом второго ограничения ранжируются в порядке возрастания. Определяется время t_1 и t_2 , соответствующее минимальному значению критерия F_I . Это время используют в качестве верхнего и нижнего пределов интеграла критерия F_{II} (3). Реализуется алгоритм выбора совокупности параметров управляемой оси.

3. Оптимальное проектирование колесных транспортных средств на основе критериев колебательной и апериодической устойчивости движения должно выполняться на основе суммы двух критериев F_I и F_{II} (2), (3):

$$F_I + F_{II} = \min \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{|A_1| + |A_2|}{|A_5| + |A_6|}} + \min \frac{\int_{t_1}^{t_2} |\theta(t)| dt}{\ln \frac{|\theta_1|}{|\theta_2|}}. \quad (4)$$

1. Шасси самолета

На величину T , которая входит в числитель критерия F_{II} , необходимо ввести ограничения, так как:

- при малых значениях T будут большими главный вектор Φ и главный момент M^Φ сил инерции колеса, которые негативно скажутся на работе деталей шасси самолета;

- при больших величинах T появляется опасность отклонения колеса (или колес) передней стойки шасси от прямолинейного движения.

Оптимальное проектирование шасси самолета должно выполняться на основе суммы критериев колебательной и апериодической устойчивости движения (4) с учетом двух ограничений:

- 1) $T \leq 0,05$ с — величинами Φ и M^Φ нельзя пренебречь;
- 2) $0,05 < T \leq 0,12$ с — величинами Φ и M^Φ можно пренебречь.

2. Болид «Формулы-1»

Скорость движения болида на трассе колеблется от 180 до 300 км/ч (мировой рекорд скорости на «Формуле-1» составляет 372,54 км/ч).

У гонщиков «Формулы-1» минимальное среднее время реакции среди всех водителей и колеблется в диапазоне от 0,20 до 0,32 секунды.

Проектирование болида «Формулы-1» должно выполняться на основе суммы критериев колебательной и апериодической устойчивости движения (4) с учетом двух ограничений:

- 1) $T \leq 0,04$ с — величинами Φ и M^Φ нельзя пренебречь;
- 2) $0,04 < T \leq 0,12$ с — величинами Φ и M^Φ можно пренебречь (при этом $2T$ меньше среднего времени реакции гонщиков «Формулы-1», равного 0,23...0,27 секунды).

3. Легковые автомобили

Проектирование легковых автомобилей должно выполняться на основе суммы критериев колебательной и апериодической устойчивости движения (4) с учетом двух ограничений:

- 1) $T \leq 0,08$ с — величинами Φ и M^Φ нельзя пренебречь;
- 2) $0,08 < T \leq 0,20$ с — величинами Φ и M^Φ можно пренебречь ($2T$ меньше среднего времени реакции водителей легковых автомобилей, равного 0,35...0,53 секунды).

4. Грузовые автомобили

Проектирование грузовых автомобилей должно выполняться на основе суммы критериев колебательной и апериодической устойчивости движения (4) с учетом двух ограничений:

- 1) $T \leq 0,10$ с — величинами Φ и M^Φ нельзя пренебречь;
- 2) $0,10 < T \leq 0,30$ с — величинами Φ и M^Φ можно пренебречь ($2T$ меньше среднего времени реакции водителей грузовых автомобилей, равного 0,60...0,70 секунды).

5. Тяжелые самосвалы — колесные машины Белорусского автомобильного завода

Проектирование тяжелых самосвалов на основе критериев колебательной и апериодической устойчивости движения должно выполняться при помощи суммы двух критериев и двух ограничений:

$$F_I + F_{II} = \min \frac{3T}{\ln \frac{|A_1| + |A_2|}{|A_5| + |A_6|}} + \min \frac{\int_{t_1}^{t_2} |\theta(t)| dt}{\ln \frac{|\theta_1|}{|\theta_2|}};$$

- 1) $T \leq 0,15$ с — величинами Φ и M^Φ нельзя пренебречь;
- 2) $0,15 < T \leq 0,30$ с — величинами Φ и M^Φ можно пренебречь ($3T$ меньше среднего времени реакции водителей тяжелых самосвалов, равного 0,85...0,98 секунды).

III. Применение колебательных и апериодических критериев для оптимального проектирования любых технических систем

Для разных классов колесных машин критерий F_I может описываться выражениями из (1). Алгоритм выбора совокупности параметров управляемой оси, приемлем для всего диапазона скоростей движения машин. Поэтому оптимальное проектирование любых типов транспортных средств на основе критериев колебательной и апериодической устойчивости движения должно выполняться на основе суммы двух критериев $F_I + F_{II}$.

IV. Применение второго метода многокритериального проектирования колесных машин на основе $F_I + F_{II}$ с помощью минимаксных критериев

В отличие от [1, 2], в работах [3, 14] приведен второй метод многокритериального проектирования колесных машин на основе $F_I + F_{II}$ с использованием минимаксных критериев. В них рассматривается стратегия многокритериальной оптимизации параметров механико-математических описаний различных конструкций управляемых неразрезных осей грузо-

вых автомобилей, применяемых в военной и гражданской технике, отличающихся между собой числом степеней свободы управляемых колес, количеством учетных выходных характеристик, числом управляемых параметров, численными значениями коэффициентов системы дифференциальных уравнений движения и уравнений неголономных связей.

Заключение

1. На основе комплекса работ [1, 2, 4, 5, 10, 13, 14] реализован первый метод оптимального проектирования колесных транспортных средств с помощью суммы критериев колебательной F_I и аperiodической F_{II} устойчивости движения с учетом среднего времени реакции водителя машин.

2. На основе минимаксных критериев в работах [3, 14] реализован второй метод многокритериального проектирования колесных машин с помощью суммы двух критериев $F_I + F_{II}$.

3. Системы линеаризованных дифференциальных уравнений движения управляемых колес с неголономными связями колесных машин включают в себя также описание стабилизации, где в качестве критерия стабилизации используют минимальное время возвращения повернутых управляемых колес в нейтральное положение.

4. Процесс колебаний управляемых колес характеризуется одновременно показателями устойчивости и стабилизации, поэтому компромисс между этими показателями, с учетом среднего времени реакции водителя — показатель безопасности движения, необходимо характеризовать суммой критериев F_I и F_{II} :

- первый — обеспечивает оценку только колебательных движений управляемых колес;

- второй — только аperiodических движений.

5. Сформирован алгоритм выбора совокупности параметров управляемой оси, приемлемой для всего диапазона скоростей движения колесных транспортных средств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гурвич, Ю. А. Новые прикладные критерии колебательной и аperiodической устойчивости движения колес транспортных средств / Ю. А. Гурвич // Актуальные проблемы в динамике и прочности в теоретической и прикладной механике : сборник научных трудов – Минск : 2001. – С. 148–162.
2. Гурвич, Ю. А. Прикладные критерии устойчивости движения управляемых колес транспортных средств / Ю. А. Гурвич, Ю. Д. Сыровкаш // Автомобильная промышленность. – 2005. – № 9. – С. 23–27.
3. Гурвич, Ю. А. Многокритериальное проектирование управляемых неразрезных осей грузовых автомобилей / Ю. А. Гурвич // Сборник научных статей военной академии Республики Беларусь. – 2018. – № 35. – С. 72–80.
4. Гурвич, Ю. А. Экспериментально-аналитический метод определения динамических характеристик шин в эксплуатационных режимах движения транспортных средств / Ю. А. Гурвич // Теоретическая и прикладная механика. – 2006. – № 20. – С. 72–76.
5. Гурвич, Ю. А. Экспериментально-аналитический метод параметрической идентификации процесса качения колеса с шиной / Ю. А. Гурвич // Авиационный вестник. – 2021. – № 5. – С. 29–44.
6. Келдыш, М. В. Избранные труды. Механика / М. В. Келдыш. – Москва : Наука, 1985. – 568 с.
7. Рокар, И. Неустойчивость в механике, автомобили, самолеты, висячие мосты / И. Рокар. – Москва : ИЛ, 1959. – 287 с.
8. Неймарк, Ю. И. Динамика неголономных систем / Ю. И. Неймарк, Н. А. Фуфаев. – Москва : Наука, 1967. – 519 с.
9. Журавлев, В. Ф. О механизме явления шимми / В. Ф. Журавлев, Д. М. Климов // Доклады академии наук. – 2009. – Т. 428, № 6. – С. 761–764.
10. Гурвич, Ю. А. Выбор критерия оптимизации параметров транспортных средств с помощью метода сеток / Ю. А. Гурвич // Машиностроение : республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып. № 31. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 137–147.
11. Коронатов, В. А. Новая теория качения на примере описания движения ведущего колеса локомотива (автомобиля) / В. А. Коронатов // Системы. Методы. Технологии / Братский государственный университет. – 2017. – № 4 (36). – С. 78–86.
12. Коронатов, В. А. Обобщение качественно новой теории качения колеса при описании явления шимми / В. А. Коронатов // Системы. Методы. Технологии / Братский государственный университет. – 2018. – № 1 (37). – С. 45–55.
13. Гурвич, Ю. А. Проектирование шасси самолета с помощью теорий качения колеса с упругой шиной по твердой поверхности / Ю. А. Гурвич, М. Ю. Ганчаров, Ю. Н. Ладыхников, Д. В. Тонких // Авиационный вестник. – 2025. – № 12. – С. 26–36.
14. Повышение эффективности преподавания теоретической и прикладной механики с помощью новых прогрессивных технологий / Ю. А. Гурвич, К. К. Крамник, А. Ю. Демко, И. Л. Бурдин, Г. А. Сенокосов // Авиационный вестник. – 2024. – № 10. – С. 77–96.

REFERENCES

1. Gurvich, Yu. A. New applied criteria for oscillatory and aperiodic stability of vehicle wheel motion. Actual problems in dynamics and strength in theoretical and applied mechanics : collection of scientific works. Minsk, 2001, pp. 148-162 (in Russian).
2. Gurvich, Yu. A. Applied criteria for stability of vehicle steering wheelsash. Automotive industry, 2005, no. 9, pp. 23-27 (in Russian).
3. Gurvich, Yu. A. Multi-criteria Design of Controlled Solid Axles of Trucks. Collection of Scientific Articles of the Military Academy of the Republic of Belarus. 2018, no. 35, pp. 72-80 (in Russian).
4. Gurvich, Yu. A. Experimental and analytical method for determining the dynamic characteristics of tires in operational modes of vehicle motion. Theoretical and applied mechanics, 2006, no 20, pp. 72-76 (in Russian).
5. Gurvich, Yu. A. Experimental and analytical method for parametric identification of the rolling process of a wheel with a tire // Aviation Bulletin, 2021, no 5, pp. 29-44 (in Russian).
6. Keldysh, M. V. Selected works: Mechanics. Moscow, Nauka, 1985, 568 p. (in Russian).
7. Rokar, I. Neustoychivost' v mekhanike, avtomobili, samolety, visyachiye mosty. Moscow, IL, 1959, 287 p. (in Russian).
8. Neimark, Yu. I. Dynamics of Nonholonomic Systems. Moscow, Nauka, 1967, 519 p. (in Russian).
9. Zhuravlev, V. F. On the Mechanism of the Shimmy Phenomenon // Reports of the Academy of Sciences, 2009, Vol. 428, no. 6, pp. 761-764 (in Russian).
10. Gurvich, Yu. A. Selection of a Criterion for Optimizing Vehicle Parameters Using the Grid Method. Mechanical Engineering : Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers. Minsk, BNTU, 2018, no. 31, pp. 137-147 (in Russian).
11. Koronotov, V. A. New theory of rolling using the example of describing the motion of the drive wheel of a locomotive (car). Systems. Methods. Technologies. Bratsk State University, 2017, no. 4 (36), pp. 78-86 (in Russian).
12. Koronotov, V. A. Generalization of a Qualitatively New Theory of Wheel Rolling in Describing the Shimmy Phenomenon. Systems. Methods. Technologies. Bratsk State University, 2018, no. 1 (37), pp. 45-55 (in Russian).
13. Gurvich, Yu. A. Design of Aircraft Chassis Using the Theories of Rolling of a Wheel with an Elastic Tire on a Hard Surface // Aviation Bulletin, 2025, no. 12, pp. 26-36 (in Russian).
14. Improving the Efficiency of Teaching Theoretical and Applied Mechanics Using New Progressive // Aviation Bulletin. 2024, no. 10, pp. 77-96 (in Russian).

Статья поступила в редакцию
13.02.2026

РАЗРАБОТКА НАГЛЯДНО-ОБУЧАЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАДИОКОМПАСА В СОСТАВЕ КОНТРОЛЬНО-ПРОВЕРОЧНОЙ АППАРАТУРЫ

DEVELOPMENT OF A VISUAL TRAINING PROGRAM FOR STUDYING AN AUTOMATIC RADIO COMPASS AS PART OF TEST AND CHECK EQUIPMENT

Алексей Сергеевич Маликов – магистр технических наук, старший преподаватель цикла технической эксплуатации воздушных судов кафедры воздушных судов и авиационного оборудования военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
werdish5@gmail.com

Aleksey Malikov – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Aircraft Technical Operation Cycle of the Department of Aircraft and Aviation Equipment of the Military Faculty Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
werdish5@gmail.com

Аннотация: в статье рассматривается процесс разработки наглядно-обучающей программы VTPofARC (Visual-Training Program of the Automatic Radio Compass), предназначенной для изучения принципов работы и особенностей эксплуатации малогабаритного автоматического радиокompаса, применяемого в авиационной технике. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования методик подготовки авиационных специалистов, повышения эффективности образовательного процесса и снижения эксплуатационных затрат, связанных с использованием дорогостоящего контрольно-проверочного оборудования и реальных образцов авиационной техники. Представлена структура и архитектура программного комплекса, обеспечивающего эмуляцию работы контрольно-проверочной аппаратуры E017-1, применяемой для проверки и настройки автоматических радиокompасов. Описаны основные функциональные возможности программы, позволяющие моделировать типовые радионавигационные задачи, включая полет по курсовому углу радиостанции, выполнение захода на посадку по системе обеспечения слепой посадки, а также проверку технических параметров радиокompаса. Особое внимание уделено реализации алгоритмов расчета и индикации курсового угла радиостанции, имитации питающих напряжений, моделированию рабочих режимов оборудования и проверке автоматического переключения частот. Программный комплекс разработан в среде Borland C++ Builder и ориентирован на использование в образовательном процессе авиационных учебных заведений для повышения качества подготовки специалистов авиационного профиля.

Ключевые слова: автоматический радиокompас, наглядно-обучающая программа, радионавигация, курсовой угол радиостанции, Borland C++ Builder, имитационное моделирование.

Abstract: the article discusses the development process of the VTPofARC (Visual-training program of the automatic radio compass), designed for studying the operating principles and functional features of a compact automatic radio compass used in aviation equipment. The relevance of the study is determined by the need to improve training methods for aviation specialists, increase the efficiency of the educational process, and reduce operational costs associated with the use of expensive testing equipment and real aircraft systems. The structure and architecture of the software package are presented, providing emulation of the E017-1 testing and inspection equipment used for checking and adjustment of automatic radio compasses. The main functional capabilities of the program are described, allowing simulation of typical radio navigation tasks, including flight according to the radio station bearing angle, instrument landing system approach procedures, and verification of technical parameters of the radio compass. Particular attention is paid to the implementation of algorithms for calculating and displaying the radio station bearing angle, simulation of power supply voltages, modeling of equipment operating modes, and verification of automatic frequency switching. The software package was developed in the Borland C++ Builder environment and is intended for use in the educational process of aviation training institutions to improve the quality of professional training for aviation specialists.

Keywords: automatic radio compass, visual-educational program, radio navigation, radio station heading angle, Borland C++ Builder, simulation modeling.

Подготовка летного и инженерно-технического состава в современных условиях невозможна без глубокого понимания принципов работы радионавигационного оборудования, такого как автоматический радиокompас (далее — АРК). Несмотря на развитие спутниковых систем, АРК остается важным резервным средством навигации, особенно для малой авиации. Он обеспечивает решение таких задач, как полет на радиостанцию и от нее, а также заход на посадку по системе обеспечения слепой посадки (далее — ОСП).

Однако практическое изучение АРК сопряжено с рядом трудностей: высокая стоимость эксплуатации наземного оборудования, ограниченный ресурс блоков и необходимость использования штатной контрольно-проверочной аппаратуры (далее — КПА). Для традиционных методов проведения лабораторных работ требуется включение питания и непосредственное взаимодействие с аппаратурой, что ведет к ее износу и поломке, особенно при ошибках выполнения операции обучающимися.

Целью данной работы является описание порядка разработки наглядно-обучающей программы VTPofARC (Visual-Training Program of the Automatic Radio Compass), позволяющей эмулировать работу АРК в комплекте с КПА Е017-1. Программа предназначена для демонстрации функциональных возможностей радиокompаса и формирования у обучающихся практических навыков выполнения работ по проверке его работоспособности без физического подключения к реальным блокам.

1. Назначение и функциональные задачи программного комплекса

Объектом изучения является малогабаритный автоматический радиокompас, предназначенный для установки на самолеты в качестве резервного средства. В соответствии с эксплуатационной документацией он должен обеспечивать полет на радиостанцию и от нее с визуальной индикацией курсового угла радиостанции (далее — КУР), автоматическое определение пеленга, заход на посадку по системе ОСП с

автоматическим переключением частот дальней (далее — ДПРС) и ближней (далее — БПРС) приводных станций, а также прием связанных радиостанций [1].

Разработанная программа VTPofARC призвана визуализировать перечисленные процессы [3, 5]. Основная задача симулятора — создать интерактивную среду, максимально приближенную к реальному рабочему месту оператора КПА. Программа позволяет выполнять полный цикл наземных проверок, предусмотренных регламентом технического обслуживания, что соответствует требованиям к квалификации авиационных техников по радиооборудованию.

2. Инструментарий и архитектура программы

2.1. Выбор среды разработки

Разработка программы выполнена в среде Borland C++ Builder (рисунок 1). Выбор данного редактора обусловлен его мощной библиотекой визуальных компонентов VCL, позволяющей быстро создавать интерфейсы, имитирующие лицевые панели реальных приборов. Поддержка стандартов ANSI/ISO и широкие возможности по работе с таймерами и графикой делают эту среду эффективным инструментом для создания утилит обучения, что подтверждается актуальностью C++ в разработке программного обеспечения для авиационных систем [2].

2.2. Структура программы

Программа VTPofARC имеет модульную структуру, что облегчает ее сопровождение и модернизацию. Взаимосвязь элементов отображена на рисунке 2. Ядром системы является главная форма, на которой размещена эмуляция лицевой панели КПА Е017-1.

Вспомогательные формы, доступные через меню «Инструменты», содержат описания, схемы и эпюры напряжения в ключевых точках функциональной схемы АРК. Отдельно реализованы формы пульта управления (далее — ПУ), эквивалента антенны Е017-2 и блока предварительной настройки (далее — БПН). Такая декомпозиция позволяет изучать аппаратуру как единое целое, так и отдельные ее составляющие, что соответствует принципам модульного обучения.

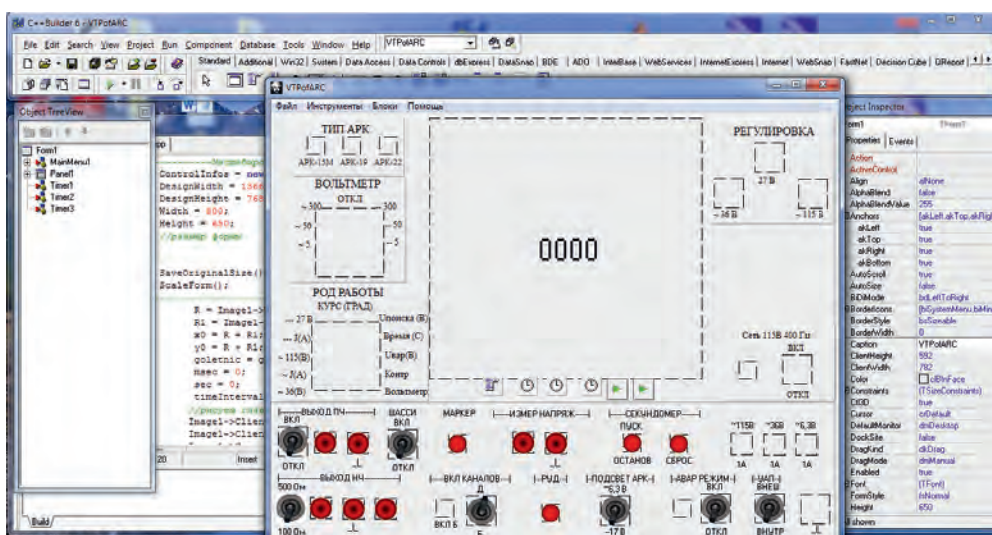


Рисунок 1 — Главное окно программы VTPofARC в среде Borland C++ Builder

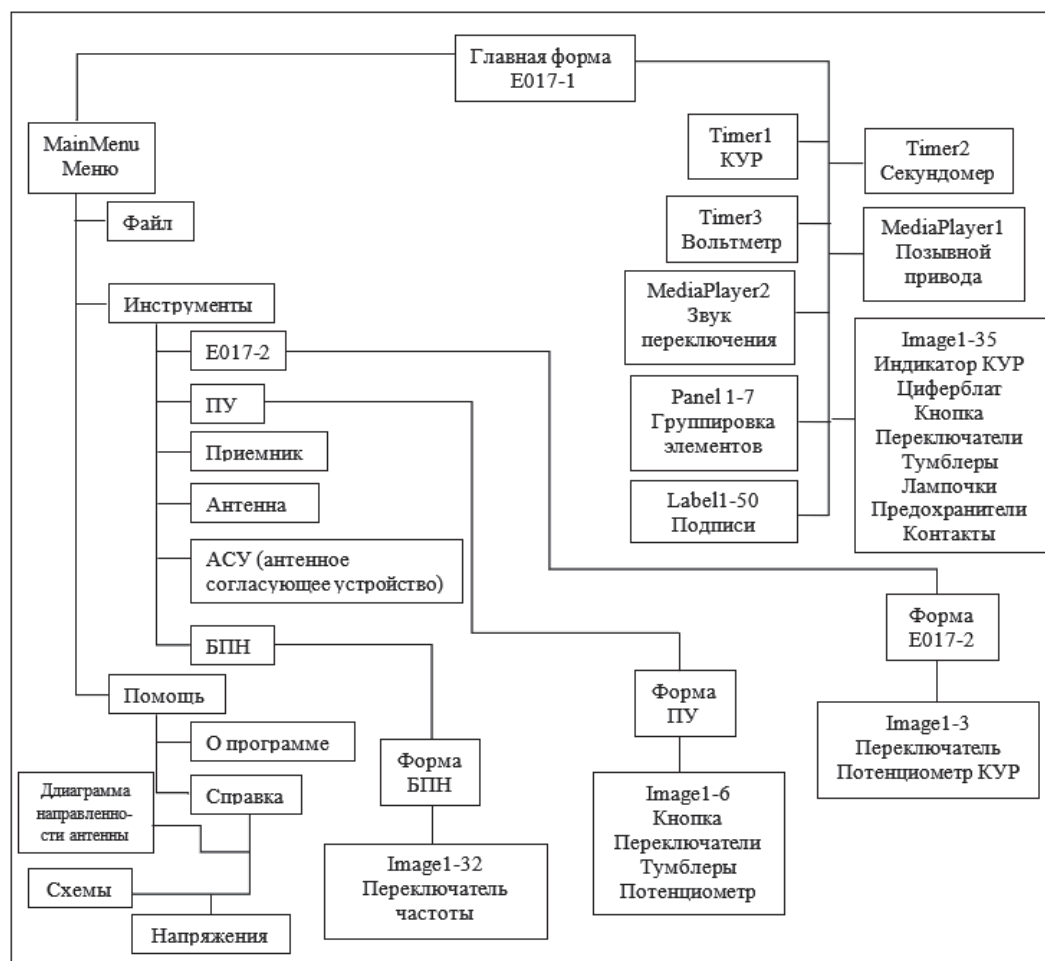


Рисунок 2 — Структурная схема программы VTPofARC

3. Реализация динамических процессов

Ключевой особенностью программы является имитация динамических процессов, происходящих в реальной аппаратуре [1, 4]. Для этого в проекте задействовано три программных таймера, каждый из которых отвечает за определенную группу процессов.

Timer1 отвечает за наиболее важную навигационную функцию — отображение КУР на светодиодном индикаторе. Логика работы таймера построена таким образом, чтобы имитировать инерционность следящей системы реального радиокompаса. Программно реализована не только дискретная смена показаний, но и изменение скорости «отработки» КУР при переходе с дальней на ближнюю приводную станцию, что позволяет обучающемуся наблюдать динамику работы автоматики [3].

Timer2 выполняет две функции. Во-первых, он генерирует случайную последовательность значений питающего напряжения, отображаемого на цифровом индикаторе. Это имитирует нестабильность бортовой сети или пульсации, которые оператор наблюдает при реальной проверке. Во-вторых, данный таймер управляет работой секундомера, что важно при проверке времени возврата на КУР из любого положения отклонения от него, особенно при проверках чувствительности АРК.

Timer3 предназначен для отображения случайной последовательности измеряемого напряжения. Это

имитирует процесс измерения уровней напряжения на варикапах, уровня сигнала при проверке чувствительности приемника и точности пеленгования, позволяя обучающемуся освоить методику оценки погрешностей.

3.1. Алгоритмы функционирования программы

Для обеспечения корректной имитации работы АРК и КПА в программе VTPofARC разработаны специализированные алгоритмы, реализованные на языке C++ в среде Borland C++ Builder.

3.1.1. Алгоритм отработки курсового угла радиостанции

Данный алгоритм является ключевым для имитации навигационной функции радиокompаса. Он реализован в обработчике события OnTimer для Timer1 и моделирует поведение следящей системы индикатора КУР.

Алгоритм работает следующим образом:

1. Считывается текущее значение заданного пеленга (целевое значение КУР) в зависимости от частоты настройки АРК, которое может изменяться пользователем при имитации полета или выбираться автоматически для демонстрации.

2. Сравнивается текущее значение, отображаемого КУР, с целевым значением.

3. При наличии разницы (дельты) запускается процесс «отработки»:

- если разница превышает пороговое значение (например, более 5°), выбирается максимальная скорость вращения рамки;
- при малой разнице, около порогового (например, менее 5°), скорость снижается, имитируя замедление механической системы (эффект демпфирования).

4. Обновляются значения на индикаторе и перерисовывается виртуальная шкала.

Данный алгоритм позволяет обучающемуся наблюдать реалистичное поведение стрелки или цифрового индикатора при изменении пеленга.

3.1.2. Алгоритм автоматического переключения частот ДПРС/БПРС

Для имитации захода на посадку по системе ОСП разработан алгоритм, моделирующий логику работы коммутатора АРК. Алгоритм базируется на анализе условия перевода АРК в режим ОСП [1, 4].

Псевдокод алгоритма:

Если (КУР = $0^\circ \pm 40^\circ$)

 Если («Маркер» = true)

 Если («Шасси» = выпущено) то

 АктивныйКанал = БПРС

 КонецЕсли

 КонецЕсли

Иначе

 АктивныйКанал = ДПРС (дальняя)

КонецЕсли

При выпущенных шасси, курсовом угле полета на ДПРС около 0° и пролете над ДПРС (приеме сигнала от маркерного радиомаяка) программа мгновенно меняет частоту настройки виртуального приемника на частоту ДПРС, изменяет позывной приводной радиостанции, а нарушение одного из условия приводит к обратному процессу, что полностью соответствует поведению реальной аппаратуры [5].

3.1.3. Алгоритм генерации тестовых напряжений

Для имитации показаний вольтметра на лицевой панели КПА используются алгоритмы с генератором псевдослучайных чисел. Однако чисто случайные значения не отражают реальную картину, так как напряжение в сети имеет тенденцию к плавным изменениям и наличие шумовой составляющей [3].

В программе реализован комбинированный алгоритм:

1. Базовая составляющая U_{base} задается пользователем (ручка «Регулировка напряжения»).

2. Шумовая составляющая U_{noise} генерируется по нормальному закону распределения (функция `rand()` с масштабированием).

3. Итоговое напряжение:

$$U_{disp} = U_{base} + U_{noise} * K,$$

где K — коэффициент пульсаций, задаваемый для различных режимов работы.

Для `Timer2` и `Timer3`, управляющих отображением напряжений, периоды обновления выбраны разными, чтобы создать эффект независимости каналов измерения, что повышает реалистичность симуляции работы КПА.

4. Методика проведения практических занятий

Разработанная наглядно-обучающая программа позволяет реализовать цикл практических занятий, полностью покрывающий регламент наземной проверки АРК. Основные проверки, доступные в симуляторе, включают:

- включение питания КПА и регулировку питающего напряжения;
- установку рабочих частот ДПРС и БПРС;
- проверку отработки курсовых углов и прослушивание позывных дальней и ближней приводных радиостанций;
- проверку автоматического переключения радиокompаса с ДПРС на БПРС и обратно;
- проверку погрешности пеленга;
- проверку скорости автоматического вращения.

Критически важной функцией является проверка автоматического переключения с ДПРС на БПРС при заходе на посадку. Программа позволяет смоделировать пролет над торцом взлетно-посадочной полосы и визуально (по изменению показаний КУР) и на слух (по изменению тональности позывных) наблюдать срабатывание автоматики. Также реализована возможность проверки погрешности пеленга и скорости автоматического вращения, что соответствует типовым операциям контроля технического состояния, описанным в квалификационных характеристиках.

Преимуществом использования `VTPofARC` является полное отсутствие риска повреждения аппаратуры. Традиционные методы проверки, связанные с вращением рамки и коммутацией кабелей, требуют строгого соблюдения последовательности операций: их нарушение в реальных условиях может привести к поломке дорогостоящих блоков, таких как гониометр или двигатель ДК-1А. В программном симуляторе отработка ошибочных действий безопасна и даже может быть использована как педагогический прием для демонстрации последствий неправильной эксплуатации.

Заключение

В результате выполнения работы создана наглядно-обучающая программа `VTPofARC`, предназначенная для изучения устройства и принципов работы автоматического радиокompаса. Программа разработана в среде `Borland C++ Builder` и представляет собой эффективный тренажер, имитирующий работу контрольно-проверочной аппаратуры `E017-1`.

Архитектура программы, основанная на использовании системы таймеров и модульном построении интерфейса, позволяет в полном объеме моделировать динамику процессов радионавигации. Разработанные алгоритмы отработки курсового угла, автоматического переключения частот и генерации тестовых напряжений обеспечивают высокую степень реализма симуляции.

Внедрение данной разработки в учебный процесс позволит обучающимся приобрести устойчивые практические навыки в эксплуатации АРК и КПА без включения реального питания, что ведет к значительной экономии ресурса оборудования и повышению качества профессиональной подготовки авиационных специалистов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматический радиокompас АРК-19 : руководство по технической эксплуатации. 1.244.024. РЭ – 214 с.
2. Архангельский, А. Я. Программирование в С++Builder 6 / А. Я. Архангельский. – Москва : БИНОМ, 2003. – 1152 с.
3. Баженов, А. В. Радионавигационные системы : учебное пособие / А. В. Баженов, Г. И. Захаренко, А. Н. Бережнов, К. Ю. Савченко ; под ред. А. В. Баженова – Ставрополь : СВВА-ИУ(ВИ), 2007. – 202 с.
4. Радиокompас автоматический АРК-35-1 : руководство по технической эксплуатации. ФБМИ. 461531.022. РЭ – 128 с.
5. Рубцов, Е. А. Радиооборудование воздушных судов и его летная эксплуатация : учебное пособие / Е. А. Рубцов, О. М. Шикавко ; СПб ГУ ГА. – Санкт-Петербург, 2017. – 120 с.

REFERENCES

1. ARK-19 Automatic Radio Compass. Operating Manual. 1.244.024. RE, 214 p. (in Russian).
2. Arkhangelsky A.Y. Programirovaniye v C++Builder 6. [Programming in C++Builder 6]. Moscow, BINOM Publishing House, 2003. 1152 p. (in Russian).
3. Bazhenov A.V., Zakharchenko G.I., Berezhnov A.N., Savchenko K.Yu. Radionavigatsionnyye sistemy [Radionavigation Systems. Tutorial]. Eds A.V. Bazhenov. Stavropol, SVVAIU(VI), 2007, 202 p. (in Russian).
4. ARK-35-1 Automatic Radio Compass. Operating Manual. FBMI. 461531.022 RE, 128 p. (in Russian).
5. Rubtsov E.A., Shikavko O.M. Radiooborudovaniye vozdushnykh sudov i yego letnaya ekspluatatsiya: uchebnoye posobiye [Aircraft Radio Equipment and Its Flight Operation. Study Guide]. St. Petersburg State University of Civil Aviation. St. Petersburg, 2017, 120 p. (in Russian).

*Статья поступила в редакцию
23.03.2026*

НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ

REGULATORY AND TECHNICAL SPECIFICS OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS UTILIZATION FOR THE TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS

Машарский Захар Владимирович – кандидат психологических наук, декан факультета гражданской авиации учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
distm@mail.ru

Zakhar Masharsky – Candidate of Psychological Sciences, Dean of the Faculty of Civil Aviation of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
distm@mail.ru

Стойко Сергей Олегович – начальник авиационного научно-технического центра учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
sergey_14_95@mail.ru

Sergey Stoiko – Head of Aviation Scientific and Technical Center of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
sergey_14_95@mail.ru

Шпилевский Даниил Олегович – инженер лаборатории беспилотных авиационных систем авиационного научно-технического центра учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
daniil26_5@icloud.com

Daniil Shpileuski – Engineer of the Unmanned Aircraft Systems Laboratory of the Aviation Scientific and Technical Center of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
daniil26_5@icloud.com

Аннотация: статья посвящена исследованию перспектив и проблем внедрения беспилотных летательных аппаратов и беспилотных воздушных судов в сферу транспортировки опасных грузов. Анализируется современное состояние мировой транспортно-логистической системы, использование беспилотной авиации в качестве полноценного элемента транспортной инфраструктуры, приводятся конкретные примеры внедрения беспилотных летательных аппаратов и беспилотных воздушных судов в логистику. Основное внимание уделено специфике перевозки опасных грузов, требующей пересмотра существующих подходов к безопасности полетов. В статье подробно рассматриваются такие технические и эксплуатационные вызовы, как необходимость обеспечения высокой отказоустойчивости энергосистем, защиты каналов связи, внедрения гибридных навигационных систем, создание норм летной годности. Обосновывается преимущество использования беспилотной авиации в минимизации рисков, связанных с человеческим фактором. Отмечается, что полноценная интеграция беспилотной авиации в логистические процессы невозможна без создания специфических норм Международной организацией гражданской авиации и Международной ассоциацией воздушного транспорта и гармонизации национального законодательства с ними. Делается вывод, что успешное развитие отрасли зависит от создания комплексной нормативно-технической базы, систем сертификации летной годности и технологий автоматизированного предотвращения столкновений в едином воздушном пространстве.

Ключевые слова: логистика, беспилотный летательный аппарат, беспилотное воздушное судно, опасные грузы, безопасность полетов, летная годности.

Abstract: the article explores the prospects and challenges of integrating Unmanned Aerial Vehicles and Unmanned Aircrafts into the transport of dangerous goods. The study analyzes the current state of the global transport and logistics system and the utilization of unmanned aviation as a fully-fledged element of transport infrastructure, providing specific examples of Unmanned Aerial Vehicles and Unmanned Aircrafts implementation in logistics. Primary focus is placed on the specifics of dangerous goods transportation, which necessitates a revision of existing flight safety approaches. The article examines in detail technical and operational challenges, such as the requirement for high fault tolerance of power systems, protection of command and control data links, implementation of hybrid navigation systems, and the development of airworthiness standards. The advantage of using unmanned aviation in minimizing risks associated with the human factor is substantiated. It is noted that the full integration of unmanned aviation into logistical processes is impossible without the establishment of specific regulations by the International Civil Aviation Organization and the International Air Transport Association, as well as the harmonization of national legislation with these standards. The study concludes that the successful development of the industry depends on creating a comprehensive regulatory and technical framework, airworthiness certification systems, and automated collision avoidance technologies within non-segregated airspace.

Keywords: logistics, unmanned aerial vehicle, unmanned aircraft, dangerous goods, flight safety, airworthiness.

Введение

В последние 10 лет мировая транспортно-логистическая система характеризуется активным внедрением цифровых технологий и автоматизированных методов управления перевозочными процессами. Непрерывное внедрение передовых технологий и изменчивая геополитическая обстановка влечет за собой необходимость адаптации отрасли не только на макрологистическом уровне, управляющем региональными и международными потоками, но и на мезологистическом (взаимосвязывающим процессы между предприятиями и внутри отраслей), а также микрологистическом (объясняющем логистику в условиях предприятия) уровнях.

Рассматривая микрологистический уровень, особое внимание стоит уделить процессам автоматизации складской логистики, получившим широкое распространение в Соединенных Штатах Америки. Самыми яркими примерами внедрения роботизации являются такие индустриальные гиганты, как Amazon и DHL, которые внедрили беспилотные летательные аппараты (БЛА) в рабочие процессы размещения и перемещения грузов [1]. Опыт использования БЛА для решения логистических задач также прорабатывается и в Российской Федерации. Примером тому может служить пилотный проект, реализованный акционерным обществом «Почта России» по доставке почтовых отправок беспилотными авиационными системами вертолетного типа БАС-200 в отдаленные районы за полярным кругом.

В существующей мировой практике уже реализованы проекты по доставке медикаментов при помощи БЛА в отдаленные населенные пункты стран Африканского континента. Так, в Малави, Руанде, Гане при содействии Всемирной организации здравоохранения и Глобального альянса по вакцинам и иммунизации обеспечена оперативная доставка грузов медицинского назначения и вакцин от центральных больниц в районные, автомобильное движение до которых затруднено из-за неудовлетворительного качества транспортной инфраструктуры и местности. Такой способ транспортировки позволяет не только снизить смертность, вызванную несвоевременным оказанием медицинской помощи, но и является экономически эффективным [2, 3].

На сегодняшний день прослеживается устойчивая тенденция расширения методов «классического» использования беспилотной авиации в целях проведения аэрофотосъемки, наблюдения и мониторинга, точечного земледелия, выполнения специальных задач в интересах государственной авиации в сторону внедрения БЛА и беспилотных воздушных судов (БВС) в качестве перспективного элемента транспортной инфраструктуры, способного обеспечить выполнение грузовых перевозок в различных условиях эксплуатации.

Особую актуальность приобретает возможность применения БЛА и БВС в интересах перевозки опасных грузов, которые в условиях мировой глобализации экономики и международной торговли составляют весомую часть грузооборота как внутри стран, так и в целях экспорта. Согласно определению Международной организации гражданской авиации (ИКАО), опасные грузы — это изделия или вещества, которые при транспортировке по воздуху способны создавать

значительную угрозу здоровью, безопасности, имуществу или окружающей среде [4]. Такие виды грузов требуют особых условий транспортировки, при этом повышение требований к скорости доставки и развитию логистических технологий обуславливает необходимость поиска качественно новых подходов к организации перевозочного процесса.

I. Проблематика обеспечения безопасности полетов

Международная система регулирования перевозок опасных грузов воздушным транспортом основывается на положениях Чикагской конвенции, Приложении 18 ИКАО «Безопасная перевозка опасных грузов по воздуху», а также Технических инструкциях ИКАО Doc 9284 [4–6]. Однако, действующая система международного регулирования в значительной степени ориентирована на пилотируемую авиацию и не учитывает в полной мере особенности эксплуатации БЛА и БВС.

В пилотируемой авиации основная часть мероприятий по обеспечению безопасности полетов при выполнении воздушных перевозок основана на человеческом факторе, являющимся производным от действий и принятия решений членами экипажа воздушного судна и инженерно-техническим персоналом. В беспилотной авиации данные функции перераспределены между оператором или внешним пилотом, программно-аппаратными комплексами (наземная станция управления, бортовые комплексы) и автоматизированными системами управления. Это приводит к необходимости пересмотра подходов к обеспечению безопасности перевозок опасных грузов.

Одним из ключевых преимуществ использования беспилотной авиации является минимизация возможного негативного воздействия человеческого фактора, а также исключение непосредственной угрозы жизни авиационного персонала в случае инцидента или катастрофы при перевозке токсичных, радиоактивных или взрывчатых веществ. Кроме того, БЛА и БВС, обладающие не столь специфическими требованиями к взлетно-посадочным площадкам, могут эксплуатироваться в условиях повышенного риска (к примеру, в районах стихийных бедствий, техногенных аварий, эпидемий и чрезвычайных ситуаций).

Ограничением применения беспилотной авиации для перевозки опасных грузов остается проблема обеспечения высокого уровня отказоустойчивости энергетической системы. Современная архитектура энергосистем использует преимущественно один тип источников питания (чаще всего аккумуляторные батареи). Наиболее перспективным вариантом представляется применение гибридных энергосхем с генераторами электроэнергии и аварийными источниками питания, обеспечивающих резервирование питания критически важных систем.

В силу современных военных конфликтов в исследуемой области остро стоят вопросы кибербезопасности. Эксплуатация БЛА и БВС осуществляется с использованием беспроводных каналов связи С2, С3 (С2 — канал управления и контроля, С3 — канал управления, контроля и коммуникации). Нарушение функционирования канала связи вследствие воздействия устройств радиоэлектронной борьбы, радиоперехвата способно привести к потере управления [7].

В этой связи при перевозке опасных грузов необходимо применение криптографической защиты, резервируемых каналов связи и технологий автоматического переключения между различными источниками передачи данных.

Существенным фактором является обеспечение устойчивости к отказам навигационной системы. Современная беспилотная авиация в значительной степени зависима от спутниковых систем навигации (GPS, GLONASS, Galileo и BeiDou), что делает их уязвимыми для таких угроз, как спуффинг. В связи с этим перспективным направлением является использование комплексированных навигационных систем, сочетающих спутниковую навигацию с инерциальной, что позволит повысить надежность и устойчивость навигации БЛА и БВС.

Также возникает ряд конструкторских задач, связанных с обеспечением сохранности груза и отказоустойчивости. В отличие от беспилотных автомобильных платформ, допускающих ограниченный уровень риска во время эксплуатации, внедрение БЛА и БВС влечет необходимость формирования принципиально иной концепции минимизации вероятности разрушения конструкции и потери управляемости при отказе критически важных систем.

Отказоустойчивость БЛА и БВС — способность летательного аппарата либо воздушного судна сохранять управляемость и возможность безопасного завершения полета при выходе отдельных элементов из строя. Конструкция летательного аппарата должна предусматривать многократное резервирование критически важных систем и оснащаться системами мониторинга температуры и автоматического пожаротушения. Для реализации этого следует рассмотреть возможность использования многослойных демпфированных контейнеров (для повышения вибрационной устойчивости) с термической изоляцией и встроенными пассивными средствами отвода тепла. Кроме того, при проектировании необходимо учитывать возможность аварийного сброса грузового контейнера в безопасной зоне.

Отдельного рассмотрения требует проблема эксплуатационной надежности силовых установок БЛА и БВС. В отличие от пилотируемой авиации, где обслуживание воздушных судов осуществляется в рамках жестко регламентированной системы технической эксплуатации, значительная часть коммерческих БЛА и БВС эксплуатируется по упрощенным схемам технического обслуживания. Применительно к перевозке опасных грузов подобный подход является недопустимым.

Беспилотные авиационные комплексы, предназначенные для транспортировки опасных грузов, должны эксплуатироваться в рамках полноценной системы поддержания летной годности, включающей регламентное техническое обслуживание, контроль ресурса агрегатов, диагностику технического состояния и анализ эксплуатационной надежности.

На сегодняшний день норм, обуславливающих летную годности для перевозки опасных грузов применительно беспилотной авиации, не существует. С целью последующей сертификации такие требования должны учитывать категорию перевозимого груза, порожнюю и взлетную массу БЛА и БВС, уровень автономности системы управления, надежность

каналов связи, характеристики аварийной защиты и другие параметры.

С точки зрения обеспечения безопасности полетов следует рассмотреть алгоритмы взаимодействия беспилотной авиации с пилотируемой. Важнейшей задачей является полноценная интеграция полетов БЛА и БВС в едином воздушном пространстве при содействии органов организации воздушного движения. В связи с этим особое значение приобретают технологии автоматизированного управления потоками и создание специализированных транспортных коридоров.

Выполнение полетов требует исключения вероятности столкновения с другими воздушными судами даже при возникновении отказов, что влечет за собой создание системы предотвращения столкновений для БЛА и БВС, функционирующей на основе спутниковой навигации, радиолокационных и оптических средств обнаружения, и модернизацию существующих систем для воздушных судов. Перспективным является внедрение технологий «Detect and Avoid», обеспечивающих автоматическое маневрирование при возникновении угрозы опасного сближения.

В обеспечении безопасной эксплуатации весомое место занимает организация наземного сегмента управления. В беспилотной авиации критически важные функции сосредоточены в наземной станции управления (НСУ), архитектура которой должна предусматривать резервирование вычислительных мощностей, дублирование каналов электропитания, наличие независимых каналов передачи данных, автоматическое переключение между рабочими станциями операторов, непрерывную запись параметров полета и телеметрической информации. С сертификационной точки зрения НСУ должна рассматриваться как составная часть беспилотного авиационного комплекса.

II. Нормативно-правовые аспекты

Исследуемая проблематика имеет особое значение для стран как с транзитным характером транспортной системы, так и с развитой мезологистической системой. Для внедрения систем перевозки опасных грузов беспилотной авиацией, помимо обеспечения разработки технических нормативно-правовых актов, необходимо создание международных требований ИКАО и Международной ассоциации воздушного транспорта с последующей их гармонизацией на национальном уровне. Такая система должна включать требования к сертификации БЛА и БВС, программного обеспечения и каналов связи, подготовке операторов, оценке рисков эксплуатации и организации расследования авиационных происшествий, изменению авиационных правил по организации воздушного движения.

Элементом обеспечения безопасности является система подготовки персонала. Программы подготовки помимо обязательных модулей должны включать изучение требований по перевозке опасных грузов, кибербезопасности, модули по особенностям дистанционного управления и взаимодействию «человек — машина». Особое внимание при подготовке специалистов необходимо уделять алгоритмам реагирования на чрезвычайные ситуации и влиянию человеческого фактора. В традиционной авиации процедуры ава-

рийно-спасательного обеспечения ориентированы на спасение экипажа и пассажиров, тогда как для беспилотной авиации приоритетной задачей становится предотвращение вторичных последствий аварии.

Использование БЛА и БВС сопровождается техническими и правовыми ограничениями. Отсутствие унифицированной международной системы регулирования, необходимость обеспечения отказоустойчивости и кибербезопасности, создания норм летной годности, а также сложность интеграции в единое воздушное пространство не позволяют полноценно развивать это направление.

Заключение

Таким образом, применение БЛА и БВС для перевозки опасных грузов представляет собой перспек-

тивное направление развития транспортно-логистической отрасли, где беспилотная авиация обладает значительным потенциалом, позволяющим снизить воздействие человеческого фактора, повысить оперативность доставки и обеспечить выполнение перевозок в условиях повышенного риска.

Успешная интеграция беспилотной авиации в логистику опасных грузов возможна исключительно при условии достижения высокого уровня надежности авиационных комплексов, развития цифровой инфраструктуры и формирования специализированной системы нормативно-технического регулирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ермолович, И. В. Особенности правового регулирования использования беспилотных летательных аппаратов в Республике Беларусь / И. В. Ермолович, А. А. Колос // Экономика. Право. Менеджмент. Современные вопросы : сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2024. – С. 126–130.
2. Austin, R. Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment / R. Austin. – Chichester : Wiley, 2010. – 332 p.
3. Integration of Unmanned Aircraft Systems into Global Airspace // National Center for Biotechnology Information. – 2024. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12210395/> (date of access: 08.05.2026).
4. Безопасная перевозка опасных грузов по воздуху : приложение 18 к Конвенции о международной гражданской авиации / Междунар. орг. гражд. авиации (ИКАО). – 4-е изд. – Монреаль : ИКАО, 2023. – 62 с.
5. Технические инструкции по безопасной перевозке опасных грузов по воздуху : Doc 9284 AN/905 / Междунар. орг. гражд. авиации (ИКАО). – Монреаль : ИКАО, 2023. – 1240 с.
6. Dangerous Goods Regulations / International Air Transport Association. – 65th ed. – Montreal ; Geneva : IATA, 2024. – 1120 p.
7. Clothier, R. Risk Perception and the Public Acceptance of Drones / R. Clothier, D. Greer, A. Mehta // Risk Analysis. – 2015. – Vol. 35, № 6. – pp. 1167–1183.
8. Unmanned Aircraft Systems Traffic Management Concept of Operations / Federal Aviation Administration. – Washington : FAA, 2020. – 82 p.

REFERENCES

1. Ermolovich I.V., Kolos A.A., *Osobennosti pravovogo regulirovaniya ispol'zovaniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov v Respublike Belarus* [Features of the legal regulation of the use of unmanned aerial vehicles in the Republic of Belarus]. *Jekonomika. Pravo. Menedzhment. Sovremennye voprosy: sb. nauch. tr.* [Economy. Right. Management. Modern issues: collection of scientific papers.]. Minsk, 2024, pp. 126–130 (in Russian).
2. Austin R. *Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment*. Chichester, Wiley, 2010, 332 p.
3. Integration of Unmanned Aircraft Systems into Global Airspace. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12210395/> (accessed 8 May 2026).
4. *Bezopasnaja perevozka opasnykh грузов po vozduhu: Prilozhenie 18 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviacii* [Safe transportation of dangerous goods by air: Annex 18 to the Convention on International Civil Aviation]. Montreal, ICAO, 2023, 4th ed, 62 p. (in Russian).
5. *Tekhnicheskie instrukcii po bezopasnoj perevozke opasnykh грузов po vozduhu : Doc 9284 AN/905* [Technical instructions for the safe transportation of dangerous goods by air: Doc 9284 AN/905]. Montreal, ICAO, 2023, 1240 p. (in Russian).
6. *Dangerous Goods Regulations*. Montreal, Geneva, IATA, 2024, 65th ed., 1120 p.
7. Clothier R., Greer D., Mehta A., *Risk Perception and the Public Acceptance of Drones*. Risk Analysis, 2015, Vol. 35, no. 6, pp. 1167–1183.
8. *Unmanned Aircraft Systems Traffic Management Concept of Operations*. Washington, FAA, 2020, 82 p.

Статья поступила в редакцию
12.04.2026

ПОСТРОЕНИЕ СИЛЬНОСВЯЗАННОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЫСОКОМАНЕВРЕННОГО ОБЪЕКТА

BUILDING A STRONGLY CONNECTED INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM FOR A HIGH-MANEUVERABILITY OBJECT

Санько Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем управления учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Республика Беларусь
nimiz75@mail.ru

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

Басов Максим Андреевич – инженер-исследователь Республиканского производственного унитарного предприятия «Завод точной электромеханики», Республика Беларусь
m.basov@ztem.by

Andrey Sanko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus
nimiz75@mail.ru

Vyacheslav Potapov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Research Laboratory of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
potapstark@gmail.com

Maksim Basov – Research Engineer of the Republican Production Unitary Enterprise Precision Electromechanics Plant, Republic of Belarus
m.basov@ztem.by

Аннотация: представлены результаты работы по построению сильносвязанной навигационной системы для высокоманевренного объекта с расширенной доступностью спутниковых измерений. Показан выигрыш от синергетического эффекта интеграции инерциальной и спутниковой навигационных систем в составе комплексной навигационной системы. Приводятся общие характеристики комплексной навигационной системы, построенные по различным схемам комплексования, их достоинства и недостатки. Представлены элементы расширенного фильтра Калмана, используемого для оценки разностных измерений от инерциальной и спутниковой навигационных систем. Предложена математическая модель расширенного фильтра Калмана, алгоритмически адаптированная к специфике функционирования сильносвязанной интегрированной навигационной системы. Показано, что для работы расширенного фильтра Калмана используются частные производные эфемерид в векторе невязок, что позволит фильтру «понимать», какая часть ошибки в дальности вызвана движением объекта, а какая – погрешностью самой инерциальной навигационной системы. Разработаны оригинальные структурно-алгоритмические решения, обеспечивающие оптимальную оценку параметров движения объекта. Предложен подход повышения помехоустойчивости и точности навигационных решений за счет комплексной обработки первичных измерений. Даются рекомендации по построению сильносвязанной навигационной системы для высокоманевренного объекта с расширенной доступностью спутниковых измерений.

Ключевые слова: сильносвязанная навигационная система, инерциальная и спутниковая навигационная система, помехоустойчивость и точность навигационных определений, высокоманевренный объект, фильтр Калмана.

Abstract: the article presents the results of work on the construction of a strongly coupled navigation system for a highly maneuverable object with enhanced availability of satellite measurements. The gain from the synergistic effect of integrating inertial and satellite navigation systems as part of an integrated navigation system is shown. The general characteristics of the integrated navigation system, built according to various integration schemes, their advantages and disadvantages are given. The elements of an extended Kalman filter used to evaluate difference measurements from inertial and satellite navigation systems are presented. A mathematical model of an extended Kalman filter is proposed, algorithmically adapted to the specifics of the functioning of a strongly coupled integrated navigation system. It is shown that the extended Kalman filter uses partial derivatives of ephemerides in the residual vector, which will allow the filter to "understand" which part of the range error is caused by the movement of the object, and which part is caused by the error of the inertial navigation system itself. Original structural and algorithmic solutions have been developed to ensure an optimal assessment of the object's motion parameters. An approach is proposed to increase the noise immunity and accuracy of navigation solutions through complex processing of primary measurements. Recommendations are given on the construction of a strongly coupled navigation system for a highly maneuverable object with enhanced availability of satellite measurements.

Keywords: highly connected navigation system, inertial and satellite navigation system, noise immunity and accuracy of navigation determinations, highly maneuverable object.

Введение

Обеспечение требуемых показателей точности и достоверности навигационных решений накладывает жесткие ограничения на характеристики бортового оборудования высокоманевренных объектов (объект). В современной практике решение данной задачи базируется на создании интегрированных навигационных систем, объединяющих возможности инерциальных и спутниковых навигационных систем.

Инерциальные спутниковые навигационные системы (ИНС) являются критически важным компонентом навигационного комплекса объекта в силу их полной автономности, высокой частоты выдачи параметров и инвариантности к преднамеренным и непреднамеренным помехам. Тем не менее, фундаментальным недостатком ИНС остается нестабильность навигационного решения, обусловленная временным дрейфом погрешностей чувствительных элементов, что ведет к неограниченному росту ошибок определения координат и вектора скорости при отсутствии внешней коррекции.

С другой стороны, использование спутниковых навигационных систем (СНС) для объекта позволяет достичь высокой точности позиционирования (порядка 10–15 м в штатных режимах функционирования) [1–3]. Однако эффективность СНС существенно снижается под воздействием возмущающих факторов, таких как затенение антенн при интенсивном маневрировании, многолучевость и радиоэлектронное подавление. Вышеизложенное обуславливает актуальность разработки методов глубокой интеграции ИНС и СНС. Синтез робастных алгоритмов навигации становится критически необходимым в условиях сложной помеховой обстановки, сопровождающейся деградацией созвездия СНС, когда число видимых навигационных космических спутников становится меньше минимально требуемого (менее четырех), что делает невозможным получение навигационного решения традиционными методами.

Синергетический эффект интеграции ИНС и СНС в составе комплексной навигационной системы (КНС) обусловлен различной физической природой используемых методов и их комплементарными характеристиками. Реализация алгоритмов совместной обработки избыточной информации позволяет обеспечить динамическую калибровку и компенсацию дрейфов ИНС. Одновременно с этим достигается повышение помехозащищенности и достоверности навигационных решений за счет статистической фильтрации измерительных шумов, оценивания систематических погрешностей приемника глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС-приемник) и высокой частоты экстраполяции навигационных параметров [1].

Кроме того, архитектура КНС гарантирует непрерывность навигационного обеспечения в условиях нестабильного приема сигналов СНС, включая периоды их кратковременного пропадания или функционирования по неполному созвездию [4, 5].

Постановка задачи

В настоящее время принято выделять четыре основных варианта построения КНС: раздельная, слабосвязанная, сильносвязанная и глубоко инте-

грированная. Слабосвязанные схемы, в которых спутниковый приемник работает автономно и передает готовое решение фильтру, имеют ограниченные возможности по обеспечению помехоустойчивости и быстродействия, особенно в условиях высокой динамики движения.

Глубоко интегрированная КНС, напротив, обеспечивает наилучшее качество навигационного решения за счет совместной фильтрации необработанных данных от ИНС и приемника СНС. Однако такая структура характеризуется увеличенной размерностью вектора состояния и требует значительных вычислительных ресурсов. Это затрудняет ее применение для объектов, где происходят быстрые изменения координат и скоростей, а также предъявляются жесткие требования к быстродействию навигационного алгоритма [5, 6].

Таким образом, ставится задача по разработке теоретических основ построения сильносвязанной интегрированной навигационной системы (ССИНС), а именно: вектора состояния оцениваемых параметров, состава измерений фильтра, структуры фильтра-оценителя, в том числе элементов уравнений динамики и измерений.

Решение задачи

На рисунке 1 представлена предлагаемая архитектура ССИНС, адаптированная к условиям функционирования объекта.

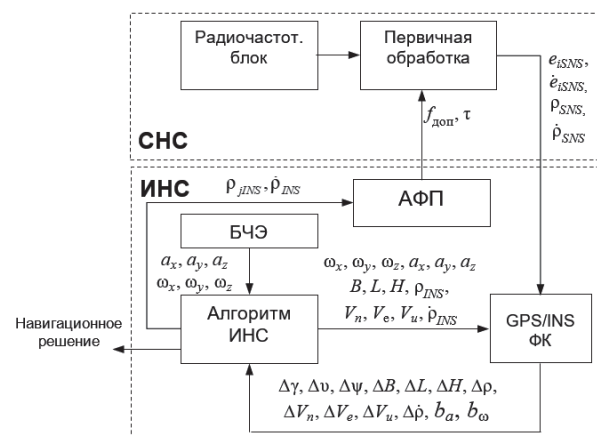


Рисунок 1 — Вариант схемы ССИНС

Сегмент СНС. В состав расчетных параметров и измерительных сигналов, отображенных на схеме, входят: $e_{iSNS}, \dot{e}_{iSNS}$ — массив эфемеридных данных, включающий декартовы координаты ($i = 1...3$) и компоненты вектора скорости спутника в геоцентрической системе координат *ECEF* (гринвичские оси); $\rho_{SNS}, \dot{\rho}_{SNS}$ — первичные навигационные параметры (псевдодальность и псевдоскорость), формируемые по сигналам спутника в дискретные моменты времени k ; $\Delta \rho, \Delta \dot{\rho}$ — формируемые векторы невязок (разностных измерений) между результатами измерений СНС и их расчетными оценками, полученными на основе данных ИНС. Использование указанных параметров в рамках единого фильтра позволит реализовать алгоритм комплексной обработки навигационных данных даже при сокращении числа видимых спутников до одного.

Сегмент ИНС. Блок чувствительных элементов (БЧЭ) выдает «сырые» данные: компоненты вектора кажущегося ускорения (a_x, a_y, a_z) и угловой скорости ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$). Алгоритм ИНС на основе этих данных осуществляет числение координат (B, L, H) северной, восточной и вертикальной составляющих путевой скорости (V_n, V_e, V_u) и углов ориентации (γ, ψ, ψ). Сформированные оценки параметров $\dot{\rho}_{INS}$ и ρ_{INS} передаются в блок АФП для вычисления прогнозных значений псевдоскорости и временной задержки сигнала для коррекции диапазона поиска спутника приемником ГНСС в случае его кратковременного пропадания.

GPS/INS ФК. Фильтр анализирует разность $\Delta\rho, \Delta\dot{\rho}$ и корректирует координаты, выдаваемые ИНС, с учетом инструментальных погрешностей ее датчиков. Уравнения динамики и измерений ССИНС в пространстве состояний:

$$x_{k+1} = F_k x_k + G_{k+1} w_{12k}; \quad z_{k+1} = H_{k+1} x_{k+1}, \quad (1)$$

где F_k — матрица динамики;

G_{k+1} — матрица шумов системы;

w_{12} — вектор шумов измерений с ковариацией R_k ;

H_{k+1} — матрица измерений.

Предлагаемый вектор состояния системы x_k (17 элементов):

$$x_k = [\Delta B_{INS}, \Delta L_{INS}, \Delta H_{INS}, \Delta V_{n_INS}, \Delta V_{e_INS}, \Delta V_{u_INS}, \Delta\gamma, \Delta\psi, \Delta\rho, \Delta\dot{\rho}, b_{ox}, b_{oy}, b_{oz}, b_{ax}, b_{ay}, b_{az}, \Delta\rho, \Delta\dot{\rho}]^T, \quad (2)$$

линеаризация уравнений измерений через частные производные [1, 2]

$$\Delta\rho = \rho_{SNS} - \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \rho_p}{\partial e_i} \right) \Delta e_{iINS}; \quad (3)$$

$$\Delta\dot{\rho} = \dot{\rho}_{SNS} - \left(\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \dot{\rho}_p}{\partial e_i} \right) \Delta e_{iINS} + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \dot{\rho}_p}{\partial \dot{e}_i} \right) \Delta \dot{e}_{iINS} \right); \quad (4)$$

$$e_{1INS} = (v + H_{INS}) \cos(B_{INS}) \cos(L_{INS});$$

$$e_{2INS} = (v + H_{INS}) \cos(B_{INS}) \sin(L_{INS});$$

$$e_{3INS} = ((b^2 / a^2) v + H_{INS}) \sin(B_{INS}),$$

где $\Delta B_{INS}, \Delta L_{INS}, \Delta H_{INS}, \Delta V_{n_INS}, \Delta V_{e_INS}, \Delta V_{u_INS}, \Delta\gamma, \Delta\psi, \Delta\rho, \Delta\dot{\rho}$ — погрешности ИНС в выработке координат, скоростей, углов ориентации, псевдодальности и псевдоскорости объекта;

Δe_{iINS} и $\Delta \dot{e}_{iINS}$ — погрешности ИНС в выработке координат;

a, b — большая и малая полуоси принятого референц-эллипсоида вращения;

$e_{1INS} \dots e_{3INS}$ — координаты, вычисленные ИНС;

v — радиус кривизны первого вертикала.

$\rho_p, \dot{\rho}_p$ — расчетные значения псевдодальности и псевдоскорости до спутника, вычисленные на основании информации от СНС и ИНС:

$$\rho_p = \sqrt{(e_{1SNS} - e_{1INS})^2 + (e_{2SNS} - e_{2INS})^2 + (e_{3SNS} - e_{3INS})^2},$$

$$\dot{\rho}_p = \frac{1}{\rho_p} \left[(e_{1SNS} - e_{1INS})(\dot{e}_{1SNS} - \dot{e}_{1INS}) + (e_{2SNS} - e_{2INS})(\dot{e}_{2SNS} - \dot{e}_{2INS}) + (e_{3SNS} - e_{3INS})(\dot{e}_{3SNS} - \dot{e}_{3INS}) \right]. \quad (5)$$

Использование частных производных эфемерид в векторе невязок позволит фильтру Калмана «понимать», какая часть ошибки в дальности вызвана движением объекта, а какая — погрешностью самой ИНС. Это обеспечит возможность системы работать всего по одному спутнику: система получает коррекцию по вектору, даже если не может построить полную геометрическую картину (для которой нужно четыре спутника).

Для определения элементов матрицы H_k раскроем частную производную псевдодальности по географическим координатам:

$$\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \rho_p}{\partial e_i} \right) \Delta e_{iINS} = A_1 \Delta B_{INS} + B_1 \Delta L_{INS} + C_1 \Delta H_{INS},$$

где коэффициент при ΔB_{INS} — $H_{1,1}$:

$$A_1 = (R + H_{INS}) [-a \cos(L_{INS}) \sin(B_{INS}) - b \sin(B_{INS}) \times \sin(L_{INS}) + c \cos(B_{INS})] / \rho_p;$$

коэффициент при ΔL_{INS} — $H_{1,2}$:

$$B_1 = (R + H_{INS}) \cos(B_{INS}) \times [-a \sin(L_{INS}) + b \cos(L_{INS})] / \rho_p;$$

коэффициент при ΔH_{INS} — $H_{1,3}$:

$$C_1 = [a \cos(B_{INS}) \cos(L_{INS}) + b \cos(B_{INS}) \cos(L_{INS}) + c \sin(B_{INS})] / \rho_p.$$

Аналогично:

$$\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \dot{\rho}_p}{\partial e_i} \right) \Delta e_{iINS} + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \dot{\rho}_p}{\partial \dot{e}_i} \right) \Delta \dot{e}_{iINS} = A_2 \Delta B_{INS} + B_2 \Delta L_{INS} + C_2 \Delta H_{INS} + D_1 \Delta V_{n_INS} + E_1 \Delta V_{e_INS} + D_1 \Delta V_{u_INS};$$

коэффициент при ΔL_{INS} — $H_{2,2}$:

$$B_2 = \frac{\dot{\rho}_p}{\rho_p^2} (R + H_{INS}) \cos(B_{INS}) \times [-a \sin(L_{INS}) + b \cos(L_{INS})];$$

коэффициент при ΔB_{INS} — $H_{2,1}$:

$$A_2 = \frac{\dot{\rho}_p}{\rho_p^2} (R + H_{INS}) [a (-\sin(B_{INS}) \cos(L_{INS})) + b (-\sin(B_{INS}) \sin(L_{INS})) + c \cos(B_{INS})];$$

коэффициент при ΔH_{INS} — $H_{2,3}$:

$$C_2 = \frac{\dot{\rho}_p}{\rho_p^2} [a \cos(B_{INS}) \cos(L_{INS}) + b \cos(B_{INS}) \sin(L_{INS}) + c \sin(B_{INS})];$$

коэффициент при ΔV_{e_INS} — $H_{2,5}$:

$$D_1 = [a \cos(L_{INS}) - b \sin(L_{INS})] / \rho_p;$$

коэффициент при ΔV_{u_INS} — $H_{2,6}$:

$$E_1 = [b \sin(B_{INS}) + a \cos(B_{INS}) \times \\ \times \cos(L_{INS}) + c \sin(L_{INS})] / \rho_p;$$

коэффициент при $V_{n_INS} - H_{2,4}$:

$$G_1 = [-a \cos(L_{INS}) \sin(B_{INS}) + \\ + c \cos(B_{INS}) - b \sin(B_{INS}) \sin(L_{INS})] / \rho_p,$$

$$\text{где } a = e_{1SNS} - e_{1INS}; \\ b = e_{2SNS} - e_{2INS}; \\ c = e_{3SNS} - e_{3INS}.$$

Для измерения псевдодальности $H_{1,16} = 1$; $H_{1,17} = 0$.
Для измерения псевдоскорости $H_{2,17} = 1$.

Матрица F_k составляется на основе линеаризованной динамической модели ошибок ИНС в географической системе координат [8–10] и дополняется двумя строками и столбцами с нулевыми параметрами до размерности (17×17).

Модель ошибок INS [8–10]:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{B}_{INS} &= \Delta V_{n_INS} - \omega_{en}(2) \Delta H_{INS} + \omega_{en}(3) \Delta L_{INS}; \\ \Delta \dot{L}_{INS} &= \Delta V_{e_INS} - \omega_{en}(3) \Delta B_{INS} + \omega_{en}(1) \Delta H_{INS}; \\ \Delta \dot{H}_{INS} &= \Delta V_{u_INS} + \omega_{en}(2) \Delta B_{INS} - \omega_{en}(1) \Delta L_{INS}; \\ \Delta \dot{V}_{n_INS} &= a_n(2) \Psi - a_n(3) v + b_{ax}^k c11 + b_{ay}^k c12 + b_{az}^k c13 + \\ &+ \Delta V_{e_INS} (\omega_{en}(3) + 2\omega_{ie}(3)) - \Delta V_{u_INS} (\omega_{en}(2) + 2\omega_{ie}(2)) - \\ &- \Delta B_{INS} \cdot g / (M + \Delta H_{INS}); \\ \Delta \dot{V}_{e_INS} &= a_n(3) \gamma - a_n(1) \Psi + b_{ax}^k c21 + b_{ay}^k c22 + \\ &+ b_{az}^k c23 - \Delta V_{n_INS} (\omega_{en}(3) + 2\omega_{ie}(3)) + \\ &+ \Delta V_{u_INS} (\omega_{en}(1) + 2\omega_{ie}(1)) - \\ &- (\Delta L_{INS} \cdot g) / (N + \Delta H_{INS}); \\ \Delta \dot{V}_{u_INS} &= a_n(1) v - a_n(2) \gamma + b_{ax}^k c31 + b_{ay}^k c32 + b_{az}^k c33 - \\ &- \Delta V_{e_INS} (\omega_{en}(1) + 2\omega_{ie}(1)) + \Delta V_{n_INS} (\omega_{en}(2) + 2\omega_{ie}(2)) + \\ &+ (2\Delta H_{INS} \cdot g) / (\sqrt{MN} + H_{INS}); \\ \Delta \dot{\gamma} &= v (\omega_{en}(3) + \omega_{ie}(3)) - b_{ax}^k c12 - b_{ay}^k c13 - \\ &- b_{az}^k c11 - \Psi (\omega_{en}(2) + \omega_{ie}(2)); \\ \Delta \dot{v} &= \Psi (\omega_{en}(1) + \omega_{ie}(1)) - b_{ax}^k c22 - b_{ay}^k c23 - \\ &- b_{az}^k c21 - \gamma (\omega_{en}(3) + \omega_{ie}(3)); \\ \Delta \dot{\Psi} &= \gamma (\omega_{en}(2) + \omega_{ie}(2)) - b_{ax}^k c32 - \\ &- b_{ay}^k c33 - b_{az}^k c31 - v (\omega_{en}(1) + \omega_{ie}(1)), \end{aligned}$$

где a_n — составляющие вектора ускорения объекта в NED СК;

ω_{ie} — составляющие угловой скорости вращения инерциальной СК относительно связанной СК;

ω_{en} — составляющая угловой скорости вращения связанной СК относительно NED СК;

M, N — радиус кривизны нормальных сечений эллипсоида;

g — ускорение силы тяжести;

$c11...c33$ — элементы матрицы направляющих косинусов C_{bn} между осями связанной СК и NED СК.

Ковариационная матрица измерений:

$$R_k = \text{diag} \begin{bmatrix} R_p \\ R_{\dot{p}} \end{bmatrix},$$

где $R_p, R_{\dot{p}}$ — дисперсия псевдодальности 1...9 м² (в условиях помех значение может программно увеличиваться до 100...400 м²) и псевдоскорости 0,0004...0,01 м/с².

Ковариационная матрица шумов Q_k , размерность (17×17):

$$Q_k = \text{diag} \begin{bmatrix} [Q_B, Q_L, Q_H] \\ [Q_{Vn}, Q_{Ve}, Q_{Vu}] \\ [Q_\gamma, Q_v, Q_\Psi] \\ [Q_{BiasW}, Q_{BiasW}, Q_{BiasW}] \\ [Q_{BiasA}, Q_{BiasA}, Q_{BiasA}] \end{bmatrix},$$

где Q_B, Q_L, Q_H — дисперсия счисления координат;

Q_{Vn}, Q_{Ve}, Q_{Vu} — дисперсия интегрированной ошибки акселерометра по скорости;

Q_γ, Q_v, Q_Ψ — дисперсия шума угловой ориентации;

$Q_{BiasW}, Q_{BiasW}, Q_{BiasW}$ — дисперсия смещения нуля гироскопа по трем осям;

$Q_{BiasA}, Q_{BiasA}, Q_{BiasA}$ — дисперсия смещения нуля акселерометра по трем осям.

Начальная ковариационная матрица ошибок, размерность (17×17):

$$P_{k-1} = \text{diag} \begin{bmatrix} [P_{B_INS}, P_{L_INS}, P_{H_INS}] \\ [P_{Vn_INS}, P_{Ve_INS}, P_{Vu_INS}] \\ [P_\gamma, P_v, P_\Psi] \\ [P_{MBiasW}, P_{MBiasW}, P_{MBiasW}] \\ [P_{MBiasA}, P_{MBiasA}, P_{MBiasA}] \\ [P_p, P_{\dot{p}}] \end{bmatrix},$$

где $P_{B_INS}, P_{L_INS}, P_{H_INS}$ и $P_{Vn_INS}, P_{Ve_INS}, P_{Vu_INS}$ — дисперсии определения координат и скоростей: горизонтальные координаты, высота, скорость, объект стартует в режиме «теплого старта»;

P_γ, P_v, P_Ψ — дисперсии определения углов: крена, тангажа и курса;

P_{MBiasW}, P_{MBiasA} — дисперсии дрейфов нулей гироскопов и акселерометров в межзапуске;

$P_p, P_{\dot{p}}$ — дисперсии определения псевдодальности и псевдоскорости (начальная неопределенность скорости ухода генератора ГНСС).

Фрагмент комплексного навигационного решения, выдаваемого ССИНС:

$$B_{INS_{k+1}} = B_{INS_{k+1}} - \Delta B_{INS_k}; L_{INS_{k+1}} = L_{INS_{k+1}} - \Delta L_{INS_k};$$

$$H_{INS_{k+1}} = H_{INS_{k+1}} - \Delta H_{INS_k}.$$

Алгоритм формирования поправок:

$$\dot{p}_{INS_{k+1}} = \dot{p}_{INS_{k+1}} - \Delta \dot{p}_k; p_{INS_{k+1}} = p_{INS_{k+1}} - \Delta p_k.$$

Используя $\dot{p}_{INS_{k+1}}$ и $p_{INS_{k+1}}$ рассчитываются прогнозные значения доплеровского смещения несущей частоты и задержка сигнала для наблюдаемого спутника:

$$f_{\text{доп}k+1} = \left[\frac{c - \dot{p}_{\text{INS}k+1}}{c} \cdot \text{GNSS L1} \right] - \text{GNSS L1};$$

$$\tau_{k+1} = \left[\frac{p_{\text{INS}k+1}}{c} \right],$$

где GNSS L1 = 1575,42 МГц;

c — скорость света.

Использование экстраполированного значения доплеровского смещения частоты $f_{\text{доп}k+1}$ позволит оптимизировать процедуру повторного захвата сигналов ГНСС после их кратковременной потери. Сужение стандартного диапазона поиска с 10 кГц до интервала 500—1000 Гц относительно $f_{\text{доп}k+1}$ сократит временные затраты на сканирование частотного пространства и минимизирует вероятность захвата ложных сигналов, тем самым повышая помехоустойчивость приемника.

Заключение

В рамках текущего этапа исследования завершено проектирование базовой архитектуры сильнос-

вязанной спутниковой навигационной системы для высокоманевренного объекта. Основным научным результатом работы является формирование математической модели расширенного фильтра Калмана, алгоритмически адаптированной к специфике функционирования ССИНС. Разработаны оригинальные структурно-алгоритмические решения, обеспечивающие оптимальную оценку параметров движения объекта. Предложенный подход позволяет повысить помехоустойчивость и точность навигационных определений за счет комплексной обработки первичных измерений. Результаты проведенных исследований обладают практической значимостью и рекомендуются к внедрению в рамках опытно-конструкторских работ по созданию перспективных навигационных систем, а также при модернизации существующих образцов специальной техники и вооружения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Емельянцеv, Г.И. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума / Г.И. Емельянцеv, А.П. Степанов, А.А. Медведков. – Санкт-Петербург : Ун-т ИТМО, 2018. – 111 с.
2. Емельянцеv, А.П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / А.П. Емельянцеv, Г.И. Степанов ; под общ. ред. В.Г. Пешехонова – Санкт-Петербург : Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – 394 с.
3. Интегрированная инерциально-спутниковая система ориентации и навигации, построенная по сильносвязанной схеме / Б.А. Блаженев, Г.И. Емельянцеv, А.Н. Коротков [и др.] // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам : сб. материалов. – СПб., 2009. – С. 153–162.
4. Об особенностях построения интегрированной инерциально-спутниковой системы для объектов, двигающихся в начальный период по баллистической траектории / Г.И. Емельянцеv, Л.П. Несенюк, Б.А. Блаженев [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 1 (64). – С. 9–21.
5. Анучин, О.Н. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / О.Н. Анучин, Г.И. Емельянцеv. – СПб.: Электроприбор, 1999. – 357 с.
6. Математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковой навигационной системы GPS. Стандартный режим / Н.Б. Вавилова, А.А. Голован, Н.А. Парусников, С.А. Трубников. – Москва : Изд. Московского университета, 2009. – 96 с.
7. Савинов, Г.Ф. Применение оптимальной фильтрации при построении навигационных комплексов / Г.Ф. Савинов. – Москва : МАИ, 1980. – 73 с.
8. Shin, E.-H. A Quaternion-Based Unscented Kalman Filter for the Integration of GPS and MEMS INS // In Proceedings of ION GNSS, 2004, pp. 1060–1068.
9. Shin, E.-H., El-Sheimy, N. An Unscented Kalman Filter for In-Motion Alignment of Low-Cost IMUs // In Proceedings of IEEE Position, Location, and Navigation Symposium, 2001, pp. 273–279.
10. Комплектирование информации в интегрированной навигационной системе при неполном рабочем созвездии спутников / А.А. Фомичев, А.Б. Колчев, П.В. Ларионов, Р.В. Пугачев // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 1. – С. 3–15.

REFERENCES

1. Emelyantsev G.I., Stepanov A.P., Medvedkov A.A. Integrirovannye inertial'no-sputnikovye sistemy orientatsii i navigatsii. Uchebno-metodicheskoe posobie po vypolneniyu laboratornogo praktikuma [Integrated inertial-satellite orientation and navigation systems. Teaching and methodological guide for laboratory workshops]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2018, 111 p. (in Russian).
2. Emelyantsev G.I., Stepanov A.P. Integrirovannye inertial'no-sputnikovye sistemy orientatsii i navigatsii [Integrated inertial-satellite orientation and navigation systems]. In: Peshkhonov V.G. (ed.). St. Petersburg, State Research Center of the Russian Federation JSC "CSRI "Elektroprigor" Publ., 2016, 394 p. (In Russian).
3. Blazhnev B.A., Emelyantsev G.I., Korotkov A.N., Koshaev D.A., Semenov I.V., Stepanov A.P. et al. Integrirovannaya inertial'no-sputnikovaya sistema orientatsii i navigatsii, postroennaya po sil'nosvyazannoy skheme [Integrated inertial-satellite orientation and navigation system based on a tightly coupled scheme]. Proceedings of the XVI Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 2009, pp. 153–162 (in Russian).
4. Emelyantsev G.I., Nesenyuk L.P., Blazhnev B.A., Korotkov A.N., Stepanov A.P. Ob osobennostyakh postroyeniya integrirovannoy inertial'no-sputnikovoy sistemy dlya ob'ektov, dvigayushchikhsya v nachal'nyy period po ballisticheskoy traektore [On the features of constructing an integrated inertial-satellite system for objects moving in the initial period along a ballistic trajectory]. Gyroskopiya i navigatsiya [Gyroscopy and Navigation], 2009, no. 1(64), pp. 9–21 (in Russian).
5. Anuchin O.N., Emelyantsev G.I. Integrirovannye sistemy orientatsii i navigatsii dlya morskikh podviznykh ob'ektov [Integrated orientation and navigation systems for marine mobile objects]. St. Petersburg, CSRI "Elektroprigor" Publ., 1999, 357 p. (in Russian).
6. Vavilova N.B., Golovan A.A., Parusnikov N.A., Trubnikov S.A. Matematicheskie modeli i algoritmy obrabotki izmereniy sputnikovoy navigatsionnoy sistemy GPS. Standartnyy rezhim [Mathematical models and algorithms for processing measurements of the GPS satellite navigation system. Standard mode]. Moscow, Moscow University Publ., 2009, 96 p. (in Russian).
7. Savinov G.F. Primenenie optimal'noy fil'tratsii pri postroyenii navigatsionnykh kompleksov [Application of optimal filtering in the construction of navigation systems]. Moscow, MAI Publ., 1980, 156 p. (in Russian).
8. Shin, E.-H. A Quaternion-Based Unscented Kalman Filter for the Integration of GPS and MEMS INS. In Proceedings of ION GNSS, 2004, pp. 1060–1068, Long Beach, CA.
9. Shin, E.-H. and El-Sheimy, N. An Unscented Kalman Filter for In-Motion Alignment of Low-Cost IMUs. In Proceedings of IEEE Position, Location, and Navigation Symposium, 2001, pp. 273–279, Monterey, CA.
10. Fomichev A.A., Kolchev A.B., Larionov P.V., Pugachev R.V., Uspenskiy V.B. Kompleksirovanie informatsii v integrirovannoy navigatsionnoy sisteme pri nepolnom rabochem sozvezdii sputnikov [Information integration in an integrated navigation system with an incomplete satellite constellation]. Gyroskopiya i navigatsiya [Gyroscopy and Navigation], 2007, no. 1, pp. 3–15 (in Russian).

Статья поступила в редакцию
30.04.2026

РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ ПЕРЕНАЗНАЧЕНИЕ ЦЕЛЕЙ ДЛЯ УСКОРЕННОГО ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМАЦИИ РОЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

DISTRIBUTED DYNAMIC GOAL REASSIGNMENT FOR FAST 3D FORMATION ACQUISITION OF UAV SWARMS

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

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

Соловьев Михаил Романович – аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Российская Федерация
onisoris@niuitmo.ru

Mikhail Solovyyov – postgraduate student, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russian Federation
onisoris@niuitmo.ru

Аннотация: цель работы – разработать и численно проверить распределенный алгоритм динамического переназначения целевых позиций для трехмерной формации роя беспилотных воздушных судов при локальном информационном взаимодействии. Каждый аппарат моделируется как агент внешнего контура второго порядка в 3D; связь описывается динамическим графом с ограниченным радиусом. Рассматриваются: случайное начальное назначение, локальные обмены, предиктивные обмены и централизованное назначение по венгерскому алгоритму в сочетании с ПД- и нелинейным регуляторами (дробно-степенные и сверхлинейные члены по ошибке). Безопасность оценивалась диагностическим порогом минимальной межагентной дистанции (жесткий барьерный фильтр не реализован). Для 16 агентов в формации 4×2×2 (шаг 2,3 м) при 30 случайных начальных условиях локальные обмены с нелинейным регулятором обеспечили среднее время построения 3,88 с, предиктивные обмены – 3,89 с, централизованное назначение – 3,81 с; случайное назначение требовало 5,48 с и в 18 из 30 запусков нарушало порог 0,5 м. Практическая значимость: распределенное динамическое переназначение через локальные обмены существенно ускоряет сборку 3D-формации по сравнению со случайным назначением; предиктивная модификация уменьшает число обменов и слегка снижает управляющее усилие, но заметного выигрыша по времени не дает.

Ключевые слова: беспилотные воздушные суда, рой, формационное управление, распределенное управление, переназначение целей, локальная связь, предотвращение столкновений, венгерский алгоритм.

Abstract: the objective of the study is to develop and numerically validate a distributed algorithm for dynamic reassignment of target positions for a three-dimensional UAV swarm formation under local information exchange. Each vehicle is modeled as a second-order outer-loop agent in 3D; communication is described by a dynamic graph with limited communication radius. The following assignment schemes are considered: random initial assignment, local swaps, predictive swaps, and centralized assignment via the Hungarian algorithm, combined with PD and nonlinear controllers (with fractional-power and superlinear error terms). Safety was assessed by a diagnostic threshold on minimum inter-agent distance (a strict quadratic-program filter based on high-order barrier functions was not implemented). For 16 agents in a 4×2×2 formation with 2.3 m spacing and 30 random initial conditions, local swaps with the nonlinear controller produced an average formation time of 3.88 s, predictive swaps – 3.89 s, centralized assignment – 3.81 s; random assignment required 5.48 s and violated the 0.5 m diagnostic threshold in 18 of 30 runs. Practical significance: distributed dynamic target reassignment via local swaps substantially accelerates 3D formation assembly compared with random assignment; the predictive modification reduces the number of exchanges and slightly lowers control effort but does not yield a noticeable improvement in formation time in the conducted simulation series.

Keywords: unmanned aerial vehicles, swarm, formation control, distributed control, goal reassignment, local connectivity, collision avoidance, Hungarian algorithm.

Групповое применение беспилотных воздушных судов позволяет решать задачи мониторинга, обследования территорий, распределенного измерения и совместного перемещения полезной нагрузки. Во многих сценариях требуется не только удерживать формацию, но и быстро построить ее из произвольного начального расположения аппаратов. При этом управление должно быть распределенным, так как централизованная обработка всех состояний ухудшает масштабируемость и увеличивает зависимость роя от одного вычислительного узла.

Классические подходы к формационному и стайному управлению многоагентными системами используют локальные взаимодействия между агентами, потенциальные функции, согласование скоростей и динамические графы связи [1]. Для беспилотных воздушных судов часто используется разделение динамики на внешний контур положения и внутренний контур ориентации. Это позволяет проектировать координационные алгоритмы на уровне положения, скорости или ускорения, предполагая, что низкоуровневый автопилот отслеживает соответствующие задания [2].

Во многих постановках целевая точка формации назначается агенту заранее и остается неизменной. Такой подход прост, но может быть неэффективен при произвольных начальных условиях. Если два соседних агента имеют назначенные цели, взаимная перестановка которых уменьшает локальную стоимость движения, то обмен целями может сократить путь и время построения. При этом обмен не должен смешиваться с эффектом регулятора: для честной оценки необходимо сравнивать одинаковые методы назначения при одинаковых законах управления.

Цель работы состоит в разработке и исследовании распределенного алгоритма динамического переназначения целевых позиций для ускоренного построения трехмерной формации роя беспилотных воздушных судов. Основной результат работы состоит в том, что распределенное динамическое переназначение целей через локальные обмены существенно ускоряет построение трехмерной формации по сравнению со случайным начальным назначением. Предиктивная стоимость рассматривается как дополнительная модификация, которая в выбранной простой форме уменьшает число обменов и немного снижает управляющее усилие, но не дает заметного выигрыша по времени построения в проведенной серии моделирования.

Анализ существующих подходов

Теоретическая основа стайного и формационного управления многоагентными системами традиционно строится на локальных правилах взаимодействия, динамических графах соседства и потенциальных функциях. В работе [1] показано, как такие механизмы позволяют описывать согласованное движение агентов второго порядка и учитывать изменение графа взаимодействия при перемещении агентов. Для роев беспилотных воздушных судов близкие идеи часто реализуются на уровне внешнего контура положения: внутренняя динамика аппарата замыкается автопилотом, а алгоритм координации формирует за-

дание скорости или ускорения. Например, в [2] такая декомпозиция используется совместно с ограничениями безопасности формационного движения.

Безопасность движения роя обычно рассматривается отдельно от задачи сходимости к целевым точкам. Барьерные функции управления позволяют записывать требования безопасности как ограничения в квадратично-программной задаче, минимально изменяющей номинальное управление [3, 4]. Для моделей второго порядка это особенно важно, поскольку ограничение на расстояние имеет относительную степень два по управляющему ускорению и требует барьерных функций высокого порядка. Потенциальные и отталкивающие поправки, применяемые в роях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), остаются полезным инженерным инструментом [8], но сами по себе не заменяют строгий фильтр безопасности.

Задача назначения целей возникает из-за взаимозаменяемости агентов: для построения формации важен набор занятых точек, а не заранее фиксированная пара «агент — цель». Централизованные методы, включая венгерский алгоритм, дают сильный ориентир, но требуют глобальной матрицы стоимостей. Распределенные стратегии назначения и переназначения целей позволяют снизить требования к связи и вычислениям [5], а траекторное планирование для взаимозаменяемых роботов показывает важность совместного учета назначения и движения [7]. Практические эксперименты с большими группами малых БПЛА дополнительно подчеркивают роль ограничений коммуникации, синхронизации и надежности локального обмена информацией [6].

Постановка задачи

Рассмотрим группу из N беспилотных воздушных судов. Положение i -го аппарата в инерциальной системе координат задается вектором $p_i(t) \in \mathbb{R}^3$. В численной модели используется внешний контур второго порядка

$$\dot{p}_i = v_i, \quad \dot{v}_i = u_i + d_i, \quad (1)$$

где $v_i \in \mathbb{R}^3$ — фактическая поступательная скорость аппарата;

$u_i \in \mathbb{R}^3$ — управляющее ускорение внешнего контура;

$d_i \in \mathbb{R}^3$ — ограниченное возмущение.

Информационное взаимодействие описывается динамическим графом $G(t) = (V, E(t))$

$$(i, j) \in E(t) \Leftrightarrow \|p_i(t) - p_j(t)\| \leq R_c, \quad (2)$$

Пусть $p_0(t)$ — положение виртуального лидера, а формация описывается набором относительных смещений $r_k \in \mathbb{R}^3$ для каждого номера k от 1 до N . Назначение целевых позиций задается перестановкой $\sigma(t)$. Целевая позиция i -го агента имеет вид

$$g_i^{\sigma(t)}(t) = p_0(t) + r_{\sigma_i(t)}. \quad (3)$$

Требуется построить алгоритм, который уменьшает время достижения условия

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \|p_i(t) - g_i^{\sigma(t)}(t)\|^2} \leq \varepsilon \quad (4)$$

при ограничениях скорости, ускорения и локального информационного обмена. Минимальная межагентная дистанция используется как диагностический показатель безопасности траекторий, но в текущей реализации не является строго гарантированным ограничением.

Регуляторы построения формации

Для модели второго порядка базовый ПД-регулятор задается в виде

$$u_i^0 = \ddot{g}_i^\sigma - k_p e_i - k_v \dot{e}_i, \quad (5)$$

где

$$e_i = p_i - g_i^\sigma, \quad \dot{e}_i = v_i - \dot{g}_i^\sigma. \quad (6)$$

При фиксированном назначении, отсутствии насыщения и $d_i = 0$ или при полной компенсации возмущения динамика ошибки имеет вид

$$\ddot{e}_i + k_v \dot{e}_i + k_p e_i = 0. \quad (7)$$

При ограниченном возмущении без компенсации получается

$$\ddot{e}_i + k_v \dot{e}_i + k_p e_i = d_i, \quad (8)$$

поэтому можно утверждать ограниченность ошибки при устойчивой линейной части, но не строгую сходимость к нулю для произвольного ненулевого возмущения.

Нелинейный регулятор, использованный в численном моделировании

В численном моделировании дополнительно используется нелинейный регулятор с дробно-степенными и сверхлинейными членами по ошибке, мотивированный конечно-временными законами управления. Для него не утверждается доказанная конечно-временная сходимость, поскольку в модели присутствуют регуляризация направления ошибки, насыщение ускорения, мягкое отталкивание и динамическое переназначение целей. Фактический номинальный закон управления имеет вид

$$u_i^0 = \ddot{g}_i^\sigma - k_v \dot{e}_i - k_d v_i - k_1 \|e_i\|^a \times \\ \times \frac{e_i}{\|e_i\| + \varepsilon_0} - k_2 \|e_i\|^\beta \frac{e_i}{\|e_i\| + \varepsilon_0}, \quad (9)$$

где $0 < a < 1$, $\beta > 1$, $\varepsilon_0 > 0$ — малое число для регуляризации направления ошибки, а член $-k_d v_i$ соответствует дополнительному демпфированию фактической скорости в реализации. После вычисления номинального воздействия применяется насыщение нормы ускорения. Для уменьшения опасных сближений к номинальному ускорению добавляется мягкая отталкивающая поправка, активная на малых расстояниях между агентами. Эта поправка не является строгим квадратично-программным фильтром безопасности.

Член $-k_d v_i$ используется как инженерное демпфирование фактической скорости в численной реализации. Для движущейся цели такое демпфирование может создавать дополнительную установившуюся

ошибку, поэтому в строгой постановке слежения предпочтительно использовать демпфирование по ошибке скорости. В проведенной серии моделирования итоговая среднеквадратичная ошибка оставалась малой, что отражено в результатах.

Динамическое переназначение целей

Для агента i текущая стоимость назначения цели k определяется как

$$J_i(k, t) = \|p_i(t) - (p_0(t) + r_k)\|^2. \quad (10)$$

Иными словами, стоимость равна квадрату евклидова расстояния от агента до соответствующей целевой точки формации.

Если агент i назначен на цель $k_i = \sigma_i$, а соседний агент j — на цель $k_j = \sigma_j$, то локальный обмен принимается при выполнении

$$J_i(k_i, t) + J_j(k_j, t) - J_i(k_j, t) - J_j(k_i, t) > \delta, \quad (11)$$

где $\delta > 0$ — гистерезис обмена.

В реализации обмена проверяются с периодом T_s только для пар, находящихся в радиусе связи R_c .

В один раунд обменов агент может участвовать не более чем в одном обмене. Все допустимые пары сортируются по величине выигрыша функции стоимости, после чего последовательно принимаются только бесконфликтные обмены. Это исключает неоднозначность, когда один агент одновременно входит в несколько выгодных пар обмена.

Предиктивная модификация использует краткосрочный прогноз положения агента и виртуального лидера:

$$p_i^{\text{pp}}(t) = p_i(t) + \tau_p v_i(t); \quad (12)$$

$$g_k^{\text{pp}}(t) = p_0(t) + \tau_p v_0(t) + r_k; \quad (13)$$

$$J_i^{\text{pp}}(k, t) = \|p_i^{\text{pp}}(t) - g_k^{\text{pp}}(t)\|^2. \quad (14)$$

Для пары соседних агентов i и j предиктивный обмен принимается, если

$$J_i^{\text{pp}}(k_i, t) + J_j^{\text{pp}}(k_j, t) - J_i^{\text{pp}}(k_j, t) - J_j^{\text{pp}}(k_i, t) > \delta. \quad (15)$$

Теоретически это условие показывает локальное уменьшение выбранной функции стоимости при одном допустимом обмене и фиксированных положениях или фиксированном прогнозе. Оно не доказывает глобальную оптимальность, конечность всех обменов на всей траектории, сокращение времени построения или безопасность движения. Эти свойства проверяются численным моделированием.

Замечание о безопасности

Для кинематической модели с заданием скорости

$$\dot{p}_i = u_i^v \quad (16)$$

можно использовать барьерную функцию первого порядка

$$h_{ij} = \|p_i - p_j\|^2 - d_{safe}^2 \quad (17)$$

и ограничение вида $\dot{h}_{ij} + \gamma h_{ij} \geq 0$. Однако для модели второго порядка управление входит во вторую производную расстояния, поэтому это условие не является корректным на основе барьерной функции управления по ускорению. Для такой модели требуется барьерная функция высокого порядка:

$$\psi_{ij} = \dot{h}_{ij} + \gamma_1 h_{ij}; \quad (18)$$

$$\dot{\psi}_{ij} + \gamma_2 \psi_{ij} \geq 0. \quad (19)$$

В текущей численной реализации используется мягкая отталкивающая поправка и диагностический порог минимальной дистанции. Строгий фильтр безопасности на основе барьерных функций высокого порядка является направлением дальнейшей работы.

Методика численного моделирования

Основной эксперимент проведен в трехмерном пространстве для группы из 16 агентов. Целевая формация задавалась сеткой $4 \times 2 \times 2$ с шагом 2,3 м относительно движущегося виртуального лидера. Для каждого метода использовались 30 случайных начальных условий, одинаковая траектория лидера, одинаковые ограничения скорости и ускорения, а также одинаковый диагностический порог безопасности.

Сравнивались восемь вариантов: четыре способа назначения целей (случайное начальное назначение,

локальные обмены, предиктивные обмены, централизованное начальное назначение на основе венгерского алгоритма) и два регулятора для каждого способа назначения. Венгерский алгоритм используется только для начального назначения целей и не пересчитывается на каждом шаге (таблица 1).

Использовались метрики: время построения формации T_f , итоговая среднеквадратичная ошибка e_{RMS} , минимальная межагентная дистанция за запуск d_{min}^{real} , число запусков с нарушением диагностического порога, суммарная длина траекторий L , управляющее усилие

$$E_u = \int \sum_i \|u_i(t)\|^2 dt \quad (20)$$

и число обменов целей N_{swap} . Успешным считался запуск, в котором СКО ошибки становилась меньше порога и удерживалось заданное время.

Результаты и обсуждение

Все восемь вариантов достигли порога сходимости во всех 30 запусках. Основное сравнение для вариантов с нелинейным регулятором приведено в таблице 2. Значения указаны как среднее с учетом стандартных отклонений.

Итоговая среднеквадратичная ошибка для всех вариантов с нелинейным регулятором составила около 0,004 м, поэтому в таблице 2 основной акцент сделан на времени построения, минимальной дистанции, длине траекторий, управляющем усилии и числе обменов.

Случайное начальное назначение существенно проигрывает методам с переназначением целей: при том же нелинейном регуляторе среднее время построения составляет 5,48 с, а диагностический порог 0,5 м нарушается в 18 из 30 запусков. Локальные обмены сокращают время до 3,88 с и устраняют нарушения порога в проведенных запусках. Предиктивные обмены в данной реализации не ускорили построение по сравнению с обычными локальными обменами: 3,89 с против 3,88 с. При этом они потребовали меньше обменов в среднем и немного меньшее управляющее усилие, но в одном из 30 запусков нарушили диагностический порог. Поэтому предиктивную модификацию следует рассматривать не как доказанно более быструю, а как вариант с иной структурой обменов, требующий дальнейшей настройки стоимости.

Централизованное начальное назначение на основе венгерского алгоритма остается лучшим по времени, длине траекторий и управляющему усилию среди вариантов с нелинейным регулятором. Это ожидаемо, поскольку такой метод использует глобальную матрицу стоимостей. Его роль

Таблица 1 — Параметры численного моделирования

Параметр	Обозначение	Значение
Число агентов	N	16
Формация	—	$4 \times 2 \times 2$
Число начальных условий	—	30
Шаг формации	s	2,3 м
Радиус связи	R_c	6,0 м
Максимальная скорость	v_{max}	3,5 м/с
Максимальное ускорение	a_{max}	8,0 м/с ²
Диагностический порог	d_{safe}	0,5 м
Шаг моделирования	Δt	0,03 с
Длительность	T	18 с
Порог сходимости	ε	0,18 м
Горизонт прогноза	τ_p	0,55 с
Период обменов	T_s	0,12 с

Таблица 2 — Основное сравнение для нелинейного регулятора

Способ назначения целей	Время построения формации, с	Минимальная межагентная дистанция, м	Количество запусков с нарушением диагностического порога	Суммарная длина траекторий, м	Управляющее усилие	Количество обменов целей
Случайное начальное назначение	$5,48 \pm 0,69$	$0,420 \pm 0,131$	18	$296,8 \pm 11,7$	$2116,5 \pm 244,5$	$0,0 \pm 0,0$
Локальные обмены целей	$3,88 \pm 0,45$	$1,005 \pm 0,206$	0	$269,6 \pm 10,8$	$1703,8 \pm 219,7$	$29,0 \pm 4,9$
Предиктивные обмены целей	$3,89 \pm 0,44$	$1,018 \pm 0,257$	1	$272,0 \pm 11,0$	$1676,2 \pm 219,8$	$23,7 \pm 4,0$
Начальное назначение по венгерскому алгоритму	$3,81 \pm 0,49$	$1,253 \pm 0,331$	0	$259,7 \pm 9,6$	$1258,1 \pm 178,9$	$0,0 \pm 0,0$

Таблица 3 — Оценка вклада способа назначения целей и типа регулятора

Способ назначения целей	Тип регулятора	Время построения формации, с	Управляющее усилие	Количество запусков с нарушением диагностического порога
Случайное начальное назначение	Пропорционально-дифференцирующий регулятор	$6,61 \pm 0,56$	781 ± 132	29
Случайное начальное назначение	Нелинейный регулятор	$5,48 \pm 0,69$	2117 ± 244	18
Локальные обмены целей	Пропорционально-дифференцирующий регулятор	$5,15 \pm 0,30$	639 ± 120	0
Локальные обмены целей	Нелинейный регулятор	$3,88 \pm 0,45$	1704 ± 220	0
Предиктивные обмены целей	Пропорционально-дифференцирующий регулятор	$5,14 \pm 0,28$	629 ± 120	0
Предиктивные обмены целей	Нелинейный регулятор	$3,89 \pm 0,44$	1676 ± 220	1
Начальное назначение по венгерскому алгоритму	Пропорционально-дифференцирующий регулятор	$4,97 \pm 0,30$	349 ± 62	0

в работе состоит в сравнительном ориентире, а не в замене распределенного решения (таблица 3).

Таблица 3 позволяет отдельно оценить вклад способа назначения целей и вклад типа регулятора в итоговые показатели построения формации. Переход от случайного назначения к локальным обменам ускоряет построение как для ПД-регулятора, так и для нелинейного регулятора. Переход от ПД-регулятора к нелинейному также сокращает время во всех способах назначения, но сопровождается заметным ростом

управляющего усилия. Это ограничение важно для практического применения: более быстрое построение формации может требовать большей энергетической и динамической нагрузки.

На рисунке 1 показано среднее изменение СКО ошибки для четырех способов назначения целей с нелинейным регулятором. Интервал $0,0 - 2,5$ соответствует стандартной ошибке среднего. Методы с переназначением быстрее выходят к порогу сходимости, чем случайное начальное назначение.

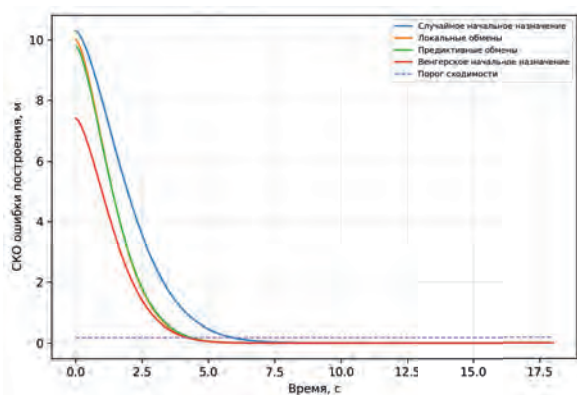


Рисунок 1 — Средняя СКО ошибки построения формации по 30 начальным условиям

На рисунке 2 показана консервативная оценка минимальной межагентной дистанции: для каждого момента времени выбирается наименьшее значение среди 30 запусков. Поэтому провалы ниже диагностического порога 0,5 м непосредственно указывают на опасные сближения, которые также отражены в таблице 2.

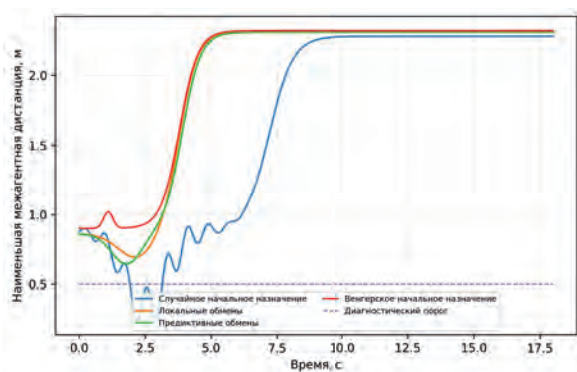


Рисунок 2 — Наименьшая межагентная дистанция среди 30 начальных условий при построении формации

Рисунок 3 показывает, что варианты с переназначением целей имеют меньший разброс времени построения, чем случайное начальное назначение. Предиктивные обмены и обычные локальные обмены практически совпадают по этому показателю.

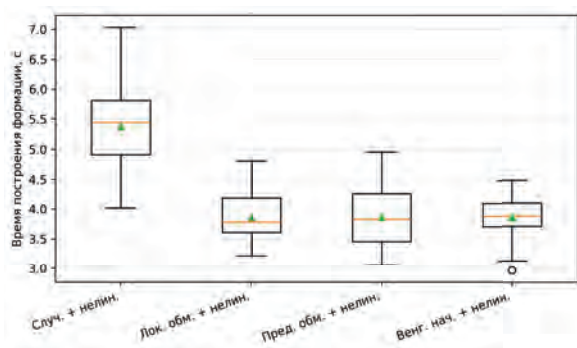


Рисунок 3 — Распределение времени построения формации по 30 начальным условиям

Рисунок 4 приведен только для наглядного отображения пространственного характера движения и не используется для количественных выводов. Количественные выводы сделаны по таблицам 2, 3 и рисункам 1–3.

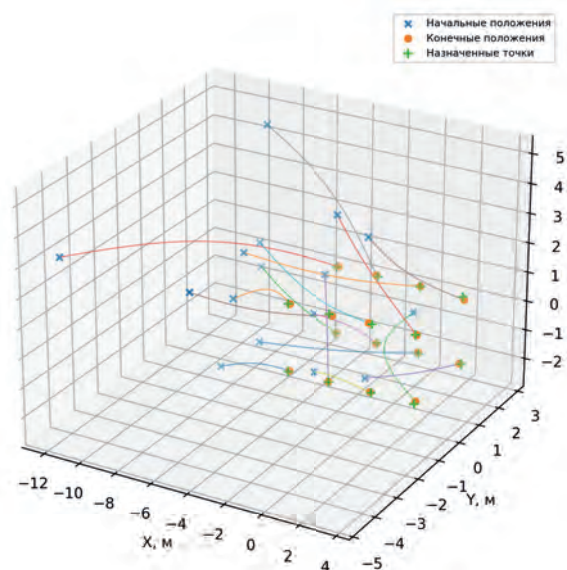


Рисунок 4 — Пример трехмерных траекторий агентов при использовании предиктивных обменов целей

Для оценки поведения при изменении размера группы проведен дополнительный эксперимент для $N = 9, 16, 25, 36$ с десятью начальными условиями на каждый размер. Для предиктивных обменов с нелинейным регулятором среднее время построения составило соответственно 3,92; 3,79; 3,57 и 3,55 с, а среднее число обменов возросло с 8,3 до 63,8. Дополнительный эксперимент по изменению числа агентов не является доказательством масштабируемости метода, поскольку при изменении N меняются геометрия формации и распределение начальных положений. Он показывает только характер поведения алгоритма при сохранении тех же параметров. Полученные нарушения диагностического порога при большей группе указывают, что масштабирование требует отдельной настройки радиуса связи, параметров отталкивающей поправки и, в дальнейшем, реализации строгого фильтра безопасности.

Заключение

В работе исследован подход к ускоренному построению трехмерной формации роя беспилотных воздушных судов на основе распределенного динамического переназначения целевых позиций. Проведенное сравнение показало, что подход с динамическим переназначением целей нельзя оценивать только в паре с более сильным регулятором: вклад переназначения целей и вклад регулятора необходимо разделять.

Для 16 агентов и 30 случайных начальных условий локальные обмены целей существенно ускорили построение формации по сравнению со случайным начальным назначением. Нелинейный регулятор с

дробно-степенными и сверхлинейными членами по ошибке дополнительно уменьшил время построения, но увеличил управляющее усилие. Предиктивная стоимость в выбранном простом виде не дала преимущества по времени над обычными локальными обменами, хотя уменьшила среднее число обменов и немного снизила управляющее усилие. При этом в одном из 30 запусков предиктивный вариант нарушил диагностический порог минимальной дистанции, что указывает на необходимость дальнейшей настройки предиктивной стоимости и отталкивающей поправки. Централизованное начальное назначение на основе вен-

герского алгоритма осталось лучшим ориентиром, но требует глобальной информации.

Ограничения работы связаны с отсутствием строгого квадратично-программного фильтра безопасности на основе барьерных функций высокого порядка, отсутствием модели задержек и потерь пакетов, а также с тем, что результаты получены в численной модели внешнего контура. Дальнейшая работа должна быть направлена на реализацию строгого фильтра безопасности, учет сетевых эффектов, настройку предиктивной стоимости и проверку алгоритма на реальных беспилотных воздушных судах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory. IEEE // Transactions on Automatic Control. 2006, vol. 51, no. 3, pp. 401-420.
2. Song Z., Huang H. Safety-critical fixed-time formation control of quadrotor UAVs with disturbance based on robust control barrier functions // Drones. 2024, vol. 8, no. 11, Article 618.
3. Ames A. D., Xu X., Grizzle J. W., Tabuada P. Control barrier function based quadratic programs for safety critical systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017, vol. 62, no. 8, pp. 3861-3876.
4. Ames A. D., Coogan S., Egerstedt M., Notomista G., Sreenath K., Tabuada P. Control barrier functions: theory and applications. Proceedings of the European Control Conference, 2019, pp. 3420-3431.
5. Choi J., Kim Y. Distributed goal assignment strategy for improving leader-following formation control performance. Arxiv: 2203.00906. 2022.
6. Preiss J. A., Honig W., Ayanian N., Sukhatme G. S. Crazyswarm: a large nano-quadcopter swarm. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2017, pp. 3299-3304.
7. Turpin M., Mohta K., Michael N., Kumar V. Goal assignment and trajectory planning for large teams of interchangeable robots // Autonomous Robots. 2014, vol. 37, pp. 401-415.
8. Xu P., Sun X., Yu M., Liu J., Bai T. A consensus control method for unmanned aerial vehicle swarm based on molecular dynamics // Drones. 2025, vol. 9, no. 6.

REFERENCES

1. Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, vol. 51, no. 3, pp. 401-420.
2. Song Z., Huang H. Safety-critical fixed-time formation control of quadrotor UAVs with disturbance based on robust control barrier functions // Drones. 2024, vol. 8, no. 11, article 618.
3. Ames A. D., Xu X., Grizzle J. W., Tabuada P. Control barrier function based quadratic programs for safety critical systems // IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, vol. 62, no. 8, pp. 3861-3876.
4. Ames A. D., Coogan S., Egerstedt M., Notomista G., Sreenath K., Tabuada P. Control barrier functions: theory and applications. Proceedings of the European Control Conference, 2019, pp. 3420-3431.
5. Choi J., Kim Y. Distributed goal assignment strategy for improving leader-following formation control performance. Arxiv: 2203.00906. 2022.
6. Preiss J. A., Honig W., Ayanian N., Sukhatme G. S. Crazyswarm: a large nano-quadcopter swarm. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2017, pp. 3299-3304.
7. Turpin M., Mohta K., Michael N., Kumar V. Goal assignment and trajectory planning for large teams of interchangeable robots // Autonomous Robots. 2014, vol. 37, pp. 401-415.
8. Xu P., Sun X., Yu M., Liu J., Bai T. A consensus control method for unmanned aerial vehicle swarm based on molecular dynamics // Drones. 2025, vol. 9, no. 6, article 404.

*Статья поступила в редакцию
06.05.2026*



ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ МОТИВАЦИИ ОПЕРАТОРОВ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ ПРИ ВЫСОКОЙ ЗРИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

PSYCHOLOGICAL FACTORS INFLUENCING MOTIVATION IN HUMAN—MACHINE SYSTEM OPERATORS UNDER HIGH VISUAL LOAD

Ильясова Мария Сергеевна – ассистент кафедры инженерной психологии и эргономики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Республика Беларусь
m.iliasova@bsuir.by

Maria Ilyasova – Assistant at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus
m.iliasova@bsuir.by

Аннотация: в статье рассматривается влияние психологических факторов зрительного комфорта на формирование профессиональной мотивации операторов человеко-машинных систем в условиях высокой визуальной нагрузки. В современных условиях значительная часть деятельности связана с длительной работой за экранами. Поэтому качество визуальной среды становится важным фактором, влияющим на состояние человека, его работоспособность и отношение к выполняемым задачам. При этом психологические аспекты зрительного комфорта остаются недостаточно изученными. Целью исследования является выявление факторов, которые влияют на удовлетворенность деятельностью, уровень мотивации операторов, определение их относительной значимости. В качестве выборки использовались студенты технических специальностей, чья учебная деятельность близка к операторской. Для сбора данных использована авторская шкала субъективной оценки зрительного комфорта. Она позволяет учитывать характеристики изображения и внутренние ощущения человека, включая уровень напряжения, утомление и уверенность при восприятии информации. Обработка данных выполнена с применением алгоритма Random Forest, что позволило выявить значимые зависимости между показателями. Установлено, что наибольшее влияние на мотивацию оказывает когнитивная уверенность, то есть ощущение правильности воспринимаемой информации. Качество визуализации также важно, однако оно выступает базовым условием и не гарантирует высокий уровень мотивации само по себе. Прогностическая модель продемонстрировала высокую точность, что подтверждает возможность ее использования для оценки функционального состояния операторов. Полученные результаты могут быть применимы при проектировании интерфейсов и организации рабочих условий для снижения утомления и поддержания устойчивой профессиональной мотивации.

Ключевые слова: человеко-машинные системы, профессиональная мотивация операторов, зрительный комфорт, психологические детерминанты, машинное обучение, Random Forest.

Abstract: this article examines the influence of psychological factors of visual comfort on the professional motivation of human-machine system operators under high visual load. In today's environment, a significant portion of work involves prolonged work in front of screens. Therefore, the quality of the visual environment is becoming an important factor influencing a person's well-being, performance, and attitude toward tasks. However, the psychological aspects of visual comfort remain understudied. The aim of the study is to identify factors that influence operator satisfaction and motivation and to determine their relative importance. The sample consisted of students majoring in technical fields whose academic activities are similar to those of operators. The author's scale for subjective assessment of visual comfort was used to collect data. It takes into account image characteristics and a person's internal sensations, including the level of tension, fatigue, and confidence in perceiving information. Data processing was performed using the Random Forest algorithm, which revealed significant relationships between the indicators. It was found that cognitive confidence, that is, the feeling of the correctness of the perceived information, has the greatest influence on motivation. Visualization quality is also important, but it is a basic requirement and does not guarantee a high level of motivation in and of itself. The predictive model demonstrated high accuracy, confirming its suitability for assessing operators' functional status. The results obtained can be applied to interface design and work environment design to reduce fatigue and maintain sustainable professional motivation.

Keywords: human-machine systems, professional motivation of operators, visual comfort, psychological determinants, machine learning Random Forest.

В современной техносфере большинство производственных и управленческих процессов основано на взаимодействии в рамках человеко-машинных систем (ЧМС). Надежность таких систем зависит от технического совершенства аппаратных средств и эффективности «человеческого звена». В условиях перехода к индустрии 5.0, ориентированной на человекоцентричный подход, деятельность оператора ЧМС зависит от высокой концентрации когнитивных ресурсов [1]. Основным каналом получения профессионально значимой информации остается визуальное восприятие. При этом зрительная нагрузка в современных интерфейсах достигает критических значений и становится значимой психологической детерминантой [2].

Проблема стимулирования труда операторов в высокотехнологичных средах традиционно рассматривается через призму материального вознаграждения. Однако современные исследования в области эргономики показывают, что внутренняя удовлетворенность качеством операциональной среды играет важную роль в сохранении профессионального долголетия [3]. Несоответствие параметров визуализации индивидуальным психофизиологическим особенностям оператора вызывает скрытый сенсорный дискомфорт, который в свою очередь снижает мотивацию. Субъект вынужден затрачивать избыточные волевые усилия на преодоление барьеров восприятия, что ведет к росту ментальной нагрузки и ощущению потери контроля над процессом [4]. Таким образом, обеспечение зрительного комфорта в ЧМС должно рассматриваться как значимый элемент системы нематериального стимулирования.

Несмотря на обширную базу исследований в области гигиены зрения, механизмы влияния субъективной удовлетворенности визуальным комфортом на психологическую структуру мотивации оператора остаются недостаточно раскрытыми. Сложность задачи обусловлена нелинейным характером связей между объективными характеристиками системы и их субъективным отражением в психике человека.

Для решения данной задачи в рамках настоящего исследования в качестве объектной группы операторов ЧМС рассматриваются студенты технических специальностей. Данный выбор обоснован тем, что учебная деятельность современного студента по своим психофизиологическим характеристикам (длительная работа с прецизионной графикой, кодированием, интерфейсами систем управления) идентична профессиональной деятельности оператора мониторинговых служб. Студенчество представляет собой репрезентативную выборку для изучения процессов адаптации к когнитивным нагрузкам и формирования первичной профессиональной мотивации в условиях интенсивного взаимодействия с цифровой средой.

Традиционные методы психологического анкетирования часто не позволяют выявлять латентные факторы неудовлетворенности в динамичных ЧМС. В связи с этим в работе предлагается использование методов машинного обучения, позволяющих формализовать субъективные оценки и выявлять ранние признаки когнитивной перегрузки [5]. В частности, применение алгоритма «Случайный лес» (Random

Forest) позволяет прогнозировать уровень удовлетворенности оператора и одновременно ранжировать психологические детерминанты по степени их влияния на общую мотивацию деятельности [6]. Использование предиктивных моделей позволяет разрабатывать адаптивные системы стимулирования, способные подстраиваться под функциональное состояние конкретного субъекта в режиме реального времени.

Целью статьи является выявление и распределение психологических детерминант профессиональной мотивации операторов в условиях высокой зрительной нагрузки для оптимизации систем управления человеческими ресурсами.

Интеллектуальный анализ психологического комфорта в человеко-машинных системах

Исследование психологических детерминант профессиональной мотивации операторов в условиях высокой зрительной нагрузки требует междисциплинарного подхода, сочетающего классические методы психодиагностики и современные технологии интеллектуального анализа данных [7]. В основу методологии данной работы положена концепция предиктивного мониторинга функционального состояния оператора.

В качестве модельной группы операторов ЧМС выступили студенты старших курсов технических специальностей ($N = 120$, средний возраст 21,4 года). Выбор данной категории респондентов обусловлен сходством учебной деятельности с работой оператора современных информационных систем, характеризующейся высокой плотностью визуальных стимулов и длительным статическим напряжением. Исследование проводилось в условиях естественной образовательной среды при выполнении заданий, требующих прецизионного визуального контроля (программирование, работа с графическими интерфейсами).

Основным инструментом сбора эмпирических данных стала специализированная шкала субъективной удовлетворенности зрительным комфортом. Ее разработка велась на основе методологии, ранее апробированной при оценке результатов высокотехнологичных офтальмологических вмешательств [8]. Оригинальная методика была адаптирована для задач инженерной психологии и оценки труда операторов ЧМС.

В отличие от стандартных опросников (VF-14 или NEI VFQ-25), ориентированных преимущественно на клинические симптомы, данная шкала фокусируется на психологических эффектах сенсорного дискомфорта, возникающих в процессе профессиональной деятельности. Адаптация инструмента заключалась в смещении акцента с «качества жизни» на «качество операциональной деятельности» и «сохранение профессиональной мотивации».

Для перевода субъективных ощущений оператора в количественные метрики была разработана диагностическая матрица. Каждый параметр шкалы оценивается респондентом по 10-бальной системе (интервальная шкала Лайкерта [9]), где показатель 1 соответствует критическому уровню дискомфорта или полному отсутствию мотивации, а 10 — идеальному функциональному состоянию и максимальной вовлеченности в процесс.

Ниже представлена структура Шкалы субъективной удовлетворенности зрительным комфортом, адаптированная для операторов ЧМС (таблица 1).

Представленная структура позволяет реализовать комплексный подход к оценке удовлетворенности. «Сенсорно-перцептивный» кластер отражает физическое соответствие системы интерфейса возможностям зрительного анализатора оператора. Именно субъективное восприятие качества изображения, а не только объективная острота зрения, является основой для формирования последующей удовлетворенности.

В контексте операторской деятельности «Психоэмоциональный» кластер выявляет «цену адаптации». Высокий балл по нему свидетельствует о том, что система визуализации не создает дополнительной когнитивной нагрузки на эмоциональную сферу оператора [10].

В «Мотивационно-поведенческом» кластере визуальный комфорт трактуется как «гигиенический фактор» по Герцбергу. Его дефицит становится критическим демотиватором, блокирующим внутренние стимулы к профессиональному росту и качественно-му выполнению задач ЧМС [11].

Высокие баллы в первом кластере при низких баллах в третьем могут свидетельствовать о скрытом психологическом выгорании оператора, которое не связано напрямую с качеством техники. Это может быть определено накопленной усталостью или дефицитом стимулирования. И наоборот, высокие показатели мотивации при низком сенсорном комфорте указывают на работу оператора на пределе физиологических возможностей, что может привести к резким срывам адаптации и ошибкам в критических ситуациях ЧМС.

Для обеспечения валидности данных процедура опроса проводилась в два этапа: первичная оценка в начале учебной сессии (рабочей смены) и повторная после 4 часов интенсивной работы с дисплейными системами. Это позволило зафиксировать динамику психологических детерминант и подготовить массив данных для алгоритма машинного обучения (Random Forest).

Математическая обработка и моделирование на основе алгоритма Random Forest

Для объективной оценки качественных показателей психологической удовлетворенности и выявления скрытых детерминант профессиональной мотивации был использован аппарат интеллектуального анализа данных. В качестве основного метода математического моделирования выбран ансамблевый алгоритм машинного обучения Random Forest, ранее показавший высокую прогностическую точность в задачах медицинской диагностики и оценки функциональных состояний [12].

Выбор алгоритма Random Forest продиктован спецификой психологических данных, которые часто характеризуются нелинейностью, наличием шумов и сложными взаимосвязями между переменными. В отличие от классических методов регрессионного анализа, Random Forest устойчив к мультиколлинеарности признаков и позволяет эффективно работать с интервальными шкалами без потери интерпретируемости результатов [13].

Входной массив данных для обучения модели (X) был сформирован из 9 параметров, представленных в разработанной шкале (сенсорные, эмоциональные и мотивационные детерминанты). Дополнительно в

Таблица 1 — Структура шкалы оценки удовлетворенности оператора ЧМС

Кластер	Оцениваемый параметр (детерминанта)	Психологическое содержание параметра	Балл (1 – 10)
1. Сенсорно-перцептивный (Базисный уровень)	Стабильность образа	Отсутствие эффекта «мерцания» и двоения знаков при длительной работе	
	Качество визуализации	Субъективная четкость границ объектов и контрастность шрифтовых решений	
	Световой комфорт	Отсутствие ослепленности, бликов и ореолов (halo-эффектов) от экрана	
2. Психоэмоциональный (Регулятивный уровень)	Когнитивная уверенность	Степень доверия к считываемой информации без необходимости перепроверки	
	Эмоциональный фон	Отсутствие раздражительности и напряжения, вызванных зрительной нагрузкой	
	Психологический покой	Ощущение легкости восприятия информации в динамических режимах ЧМС	
3. Мотивационно-поведенческий (Целевой уровень)	Волевой ресурс	Низкая потребность в сознательном усилии для удержания внимания на мониторе	
	Трудовая выносливость	Субъективная готовность продолжать работу без выраженного чувства утомления	
	Профессиональный интерес	Сохранение вовлеченности в задачу при нарастании сенсорной нагрузки	

модель вводились контекстные переменные: стаж работы в системе (курс обучения), тип интерфейса и время непрерывной нагрузки.

Целевой переменной (Y) выступал интегральный индекс удовлетворенности трудом, рассчитанный как взвешенная сумма показателей мотивационно-поведенческого кластера. Задача моделирования заключалась в классификации состояний оператора на «стабильно мотивированное» и «риск снижения профессиональной надежности».

Процесс интеллектуальной обработки данных включал следующие технологические этапы:

1. Бутстрэп-агрегирование (Bagging). Из исходной выборки формировались случайные подвыборки с возвращением, на каждой из которых обучалось независимое решающее дерево. Это позволило снизить дисперсию модели и избежать переобучения.

2. Метод случайных подпространств. При построении каждого узла дерева выбиралось случайное подмножество из m признаков, что обеспечило декорреляцию деревьев в ансамбле и повысило общую устойчивость прогноза.

3. Оптимизация гиперпараметров. С использованием метода решетчатого поиска (Grid Search) было определено оптимальное количество деревьев ($n = 500$) и максимальная глубина дерева, обеспечивающая баланс между точностью и обобщающей способностью.

Основным преимуществом использования Random Forest в данном исследовании является возможность вычисления важности признаков (Feature Importance) через уменьшение примеси Джини (Gini Impurity).

В основе построения каждого решающего дерева лежит процедура разбиения узлов таким образом, чтобы максимизировать «чистоту» получаемых подмножеств. Примесь Джини для узла n вычисляется по формуле

$$G(n) = 1 - \sum_{i=1}^C (p_i)^2,$$

где C — количество классов (уровней мотивации);

p_i — вероятность (доля) объектов класса i в узле n .

При каждом разбиении узла на дочерние узлы происходит уменьшение примеси Джини. Значимость (важность) конкретного признака X_j в отдельном дереве определяется как сумма уменьшений примеси во всех узлах, где данное условие разбиения было выбрано:

$$\Delta G(X_j) = G(\text{parent}) - (w_{\text{left}} \cdot G(\text{child}_{\text{left}}) + w_{\text{right}} \cdot G(\text{child}_{\text{right}})),$$

где w — весовые коэффициенты, соответствующие доле объектов, попавших в левое и правое поддерева.

Итоговая важность психологической детерминанты в рамках всего «случайного леса» (ансамбля из N деревьев) рассчитывается как среднее значение уменьшения примеси Джини по всем деревьям:

$$\text{Importance}(X_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta G_k(X_j).$$

Использование данного математического аппарата позволило установить количественную иерархию факторов.

Результаты и их обсуждение

Математическая обработка эмпирических данных позволила ранжировать параметры из таблицы по степени их детерминирующего влияния на общую мотивацию оператора. Визуализация результатов работы обученного ансамбля решающих деревьев позволяет наглядно интерпретировать структуру профессиональной мотивации специалиста. На рисунке 1 представлено ранжирование входных параметров (детерминант) по степени их вклада в точность прогностической модели (Feature Importance).

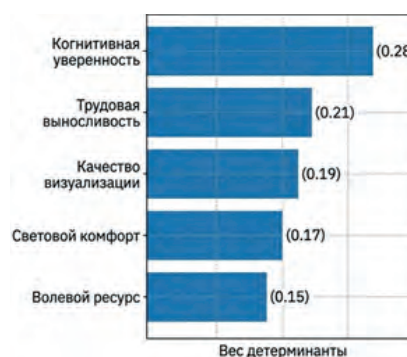


Рисунок 1 — Гистограмма важности психологических детерминант в структуре удовлетворенности трудом оператора ЧМС

Согласно полученным данным, наибольший вес в структуре удовлетворенности имеет параметр «Когнитивная уверенность» (0,28). Это подтверждает выдвинутую гипотезу о том, что для оператора ЧМС психологическая надежность принимаемых решений и отсутствие когнитивных сомнений, вызванных сенсорным дискомфортом, являются приоритетными. В условиях высокой информационной неопределенности, характерной для деятельности в сложных ЧМС, оператор стремится к минимизации «шума» в визуальном канале. Если параметры интерфейса обеспечивают высокую степень доверия к считываемой информации, это выступает мощным внутренним стимулом, снижающим уровень профессиональной тревожности.

Вторым по значимости фактором выступает «Трудовая выносливость» (0,21), что характеризует способность субъекта поддерживать высокую профессиональную активность, несмотря на нарастающее сенсорное утомление. Данный показатель тесно связан с волевой регуляцией деятельности. Высокая выносливость свидетельствует о наличии внутренних ресурсов для преодоления барьера монотонности и зрительной усталости, что является критически важным для операторской деятельности.

Примечательно, что параметр «Качество визуализации» (0,19), традиционно считающийся ключевым в клинических офтальмологических исследованиях, в психологической структуре мотивации студентов-операторов оказался лишь на третьем месте. Это свидетельствует о том, что технические характеристики интерфейса (четкость, контрастность, отсутствие аберраций) являются необходимым «гигиеническим» условием, но сами по себе не гарантируют высокую вовлеченность. Оператор готов адаптироваться к незначительным техническим несовершенствам систе-

мы, если они не препятствуют достижению целевого результата и не вызывают психоэмоционального напряжения.

Меньшие значения весовых коэффициентов для параметров кластера сенсорного комфорта (световой комфорт, стабильность образа) указывают на их опосредованное влияние на мотивацию. Критическое снижение данных факторов приводит к резкому обвалу удовлетворенности. Однако в рабочем диапазоне они воспринимаются оператором как фоновые характеристики среды.

Для оценки качества и надежности обученной модели была построена ROC-кривая (Receiver Operating Characteristic), представленная на рисунке 2.

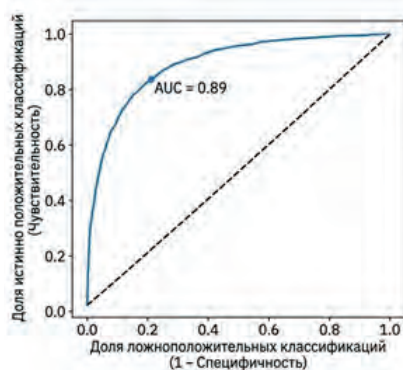


Рисунок 2 — ROC-кривая рабочих характеристик прогностической модели

ROC-кривая прогностической модели значительно отклоняется от линии случайного гадания (диагонали) в сторону левого верхнего угла. Значение площади под кривой AUC (Area Under Curve) составило 0,89, что интерпретируется как «отличное» качество модели. Полученные метрики точности доказывают, что предложенный междисциплинарный подход позволяет с высокой достоверностью выявлять детерминанты удовлетворенности и прогнозировать риск снижения профессиональной мотивации операторов ЧМС.

Модель способна выступать инструментом раннего предупреждения снижения профессиональной надежности. Выявленная иерархия детерминант позволяет точно воздействовать на наиболее значимые факторы психологического комфорта, что является ключевым элементом в проектировании современных систем стимулирования труда в высокотехнологичных отраслях.

Заключение

Полученные данные свидетельствуют о высокой прогностической способности предложенного междисциплинарного подхода. Интеграция методов классической психодиагностики с алгоритмами машинного обучения позволила выявить наличие или отсутствие зрительного дискомфорта. Иерархическая структура психологических детерминант определяет профессиональную мотивацию оператора в современных ЧМС.

Адаптированная «Шкала субъективной удовлетворенности зрительным комфортом», базирующаяся на ранее верифицированной медицинской методике оценки офтальмологических вмешательств [8], показала высокую релевантность в задачах инженерной психологии. Структурирование параметров по сенсорно-перцептивному, психоэмоциональному и мотивационному кластерам позволило зафиксировать многоуровневый характер формирования удовлетворенности оператора-студента.

С помощью алгоритма Random Forest и анализа уменьшения примеси Джини доказано, что ведущим фактором мотивации является «Когнитивная уверенность» (вес 0,28). Это подтверждает, что в структуре деятельности оператора психологическая стабильность и доверие к визуальной информации преобладают над чисто техническими характеристиками интерфейса (четкостью, контрастностью). Качество визуализации выступает необходимым «гигиеническим» условием, но не является самодостаточным стимулом профессиональной активности.

Высокая точность обученного ансамбля решающих деревьев (AUC = 0,89) свидетельствует об адекватности применения аппарата интеллектуального анализа данных для диагностики латентных факторов неудовлетворенности. Разработанная модель способна выступать инструментом раннего предупреждения снижения профессиональной надежности еще до наступления фазы явного психофизиологического утомления.

Результаты исследования закладывают основу для создания адаптивных систем нематериального стимулирования в ЧМС. Использование параметров зрительного комфорта в качестве управляемых стимулов позволяет оптимизировать эргономику рабочего (учебного) места, минимизировать «когнитивную цену» деятельности и поддерживать устойчивый интерес к профессиональному развитию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Grote, G. Shaping the development and use of Artificial Intelligence: how human factors and ergonomics expertise can become more pertinent / G. Grote // *Ergonomics*. – 2023. – Vol. 66, № 11. – P. 1702–1710.
2. A Comprehensive Review of Human Factors and Ergonomics in Industry 5.0 / H. Mouhib [et al.] // *Engineering Proceedings*. – 2025. – Vol. 112, № 61. – URL: <https://doi.org/10.3390/engproc2025112061> (date of access: 02.03.2026).
3. Çakıt, E. Applications of Machine Learning in Human Factors and Ergonomics: A Comprehensive Review of Research from the Past Decade / E. Çakıt, W. Karwowski // *IEEE Access*. – 2025. – Vol. 13. – P. 115263–115288.
4. Sharvit, E. Cognitive demand, concurrent viewing distances, and digital eyestrain / E. Sharvit, M. Rosenfield // *Optom. Vis. Sci.* – 2025. – Vol. 102, № 4. – P. 189–195.
5. Baweja, J. A. Opportunities for human factors in machine learning / J. A. Baweja, C. K. Fallon, B. A. Jefferson // *Frontiers in Artificial Intelligence*. – 2023. – Vol. 6. – Art. 1130190.
6. Petrat, D. Artificial intelligence in human factors and ergonomics: an overview of the current state of research / D. Petrat // *Discover Artificial Intelligence*. – 2021. – Vol. 1, № 2. – URL: <https://doi.org/10.1007/s44163-021-00001-5> (date of access: 03.03.2026).
7. The Future of Human-AI Collaboration: A Taxonomy of Design Knowledge for Hybrid Intelligence Systems / D. Dellermann [et al.] // *HICSS*. – 2019. – URL: <https://doi.org/10.24251/HICSS.2019.034> (date of access: 03.03.2026).
8. Разработка шкалы для определения удовлетворенности пациента результатом хирургического лечения и выбором интраокулярной линзы в зависимости от рефракции цели / В. Л. Красильникова [и др.] // *Вестник Витебского государственного медицинского университета*. – 2025. – Т. 24, № 1. – С. 89–100.
9. Квон, М. М. Использование шкалы Лайкерта при исследовании мотивационных факторов обучающихся / Г. М. Квон, В. Б. Вакс, О. Г. Поздеева // *Концепт : научно-методический электронный журнал*. – 2018. – № 11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-shkaly-laykerta-pri-issledovanii-motivatsionnyh-faktorov-obuchayuschihся> (дата обращения: 05.03.2026).

10. Чепурнов, И. А. Инженерно-психологические аспекты профессиональной деятельности операторов сложных технических систем / И. А. Чепурнов, Р. К. Ковалев // Образование, инновации, исследования как ресурс развития сообщества : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Чебоксары, 16 янв. 2024 г. – Чебоксары : Среда, 2024. – С. 206–211.
11. Виханский, О. С. Менеджмент : учебник / О. С. Виханский, А. И. Наумов. – 6-е изд. – Москва : Магистр, 2024. – 656 с.
12. Прогностическая точность удовлетворенности пациентов при хирургической коррекции афакии с использованием алгоритма случайного леса / М. С. Ильясова [и др.] // Мед-электроника–2024. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сб. науч. ст. XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 05–06 дек. 2024 г. – Минск : БГУИР, 2024. – С. 299–304.
13. Breiman, L. Random Forests / L. Breiman // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45, № 1. – P. 5–32.

REFERENCES

1. Grote G. Shaping the development and use of Artificial Intelligence: how human factors and ergonomics expertise can become more pertinent. *Ergonomics*, 2023, vol. 66, no. 11, pp. 1702–1710.
2. Mouhib H., Amar S., Elrhani S., El Abbadi L. A Comprehensive Review of Human Factors and Ergonomics in Industry 5.0. *Eng. Proc.*, 2025, vol. 112, no. 61. <https://doi.org/10.3390/engproc2025112061>.
3. Çakıt E., Karwowski W. Applications of Machine Learning in Human Factors and Ergonomics: A Comprehensive Review of Research from the Past Decade. *IEEE Access*, 2025, vol. 13, pp. 115263–115288.
4. Sharvit E., Rosenfield M. Cognitive demand, concurrent viewing distances, and digital eyestrain. *Optom. Vis. Sci.*, 2025, vol. 102, no. 4, pp. 189–195.
5. Baweja J.A., Fallon C.K., Jefferson B.A. Opportunities for human factors in machine learning. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 2023, vol. 6, art. 1130190.
6. Petrat D. Artificial intelligence in human factors and ergonomics: an overview of the current state of research. *Discover Artificial Intelligence*, 2021, vol. 1, no. 2. <https://doi.org/10.1007/s44163-021-00001-5>.
7. Dellermann D., Calma A., Lipusch N., Weber T., Weigel S., Ebel P. The Future of Human-AI Collaboration: A Taxonomy of Design Knowledge for Hybrid Intelligence Systems. *HICSS*, 2019. <https://doi.org/10.24251/HICSS.2019.034>.
8. Krasil'nikova V. L., Dudich O. N., Gridyushko S. M., Ilyasova M. S. *Razrabotka shkaly dlya opredeleniya udovletvorennosti patsiyenta rezul'tatom khirurgicheskogo lecheniya i vyborom intraokulyarnoy linzy v zavisimosti ot refraktsii tseli* [Development of a scale for determining patient satisfaction with the result of surgical treatment and the choice of an intraocular lens depending on the target refraction]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta* [Vestnik of Vitebsk State Medical University], 2025, vol. 24, no. 1, pp. 89–100 (in Russian).
9. Kvon G.M., Vaks V.B., Pozdeyeva O.G. *Ispol'zovaniye shkaly Laykerta pri issledovanii motivatsionnykh faktorov obuchayushchikhsya* [Using the Likert scale in the study of motivational factors of students]. *Kontsept* [Concept], 2018, no. 11. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-shkaly-laykerta-pri-issledovanii-motivatsionnyh-faktorov-obuchayushchihsya> (accessed 05 March 2026) (in Russian).
10. Chepurnov I.A., Kovalev R.K. *Inzhenerno-psikhologicheskiye aspekty professional'noy deyatel'nosti operatorov slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Engineering and psychological aspects of the professional activity of operators of complex technical systems]. *Obrazovaniye, innovatsii, issledovaniya kak resurs razvitiya soobshchestva: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem* [Education, innovation, research as a resource for community development: materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation]. Cheboksary, Sreda Publ., 2024, pp. 206–211 (in Russian).
11. Vikhanskiy O.S., Naumov A.I. *Menedzhment: uchebnyy* [Management: textbook]. Moscow, Magistr Publ., 2024, 656 p. (in Russian).
12. Ilyasova M.S., Gridyushko S.M., Dudich O.N., Krasil'nikova V.L. *Prognosticheskaya tochnost' udovletvorennosti patsiyentov pri khirurgicheskoy korrektsii afakii s ispol'zovaniyem algoritma sluchaynogo lesa* [Predictive accuracy of patient satisfaction in surgical correction of aphakia using the random forest algorithm]. *Medelektronika–2024. Sredstva meditsinskoy elektroniki i novyye meditsinskiye tekhnologii: sb. nauch. st. XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Medelektronika–2024. Medical electronics and new medical technologies: collection of scientific articles of the XIV International scientific and technical conference]. Minsk, BSUIR Publ., 2024, pp. 299–304 (in Russian).
13. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001, vol. 45, no. 1, pp. 5–32.

*Статья поступила в редакцию
20.03.2026*

1. Bordunov V.D., Kotov A., Malcev V.N. *Pravovoe regulirovaniye mezhdunarodnykh poletov grazhdanskikh vozdukhnykh sudov* [Legal regulation of international flights of civil aircraft]. Moscow: Nauka, 1988. (in Russian).
2. Kapustin A.Y. *Mezhdunarodnoye pravovoe regulirovaniye poletov vozdukhnykh sudov* [International legal regulation of aircraft flights]. Textbook for universities. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Yurait, 2021. 217 p. (in Russian).
3. Volkov M.M., Dezhkin V.N., Musatov V.N. *Sovetskoye vozdukhnoye pravo. Ychebnoye posobie* [Soviet air law. Textbook]. Leningrad, OLFA, 1984. (in Russian).
4. Dezhkin V.N. *Pravovoe regulirovaniye mezhdunarodnykh poletov vozdukhnykh sudov* [Legal regulation of international flights of civil aircraft]. Abstract of dissertation for candidate of legal sciences. Moscow: Yurait, 2021. 12 p. (in Russian).
5. Travnikov A., Abashidze A.K. *Mezhdunarodnoye vozdukhnoye pravo. Ychebnik dlya vuzov, 2-e izdaniye, pereizd.* [International air law. Textbook for universities / A. . Travnikov (et al); edited by, 2nd ed., revised and enlarged]. Moscow: Publishing House, 2024. 474 p. (in Russian).
6. Grechukha V.N. *Transportnoye pravo: pravovoe regulirovaniye deyatelnosti vozdukhnogo transporta. Monografiya* [Transport law: legal regulation of air transport activities. Monograph]. Available at: <https://www.consultant.ru> (Accessed: 01.01.2025).
7. Boyko N.S. *Vozdukhnoye pravo. Ychebnoye posobie dlya vuzov* [Air Law. Textbook for Universities]. Moscow: Yurait, 2021. 217 p. (in Russian).
8. Kopylov M.N. *Mezhdunarodnoye pravovoe regulirovaniye poletov vozdukhnykh sudov nad otkrytym morem* [International legal regulation of aircraft flights over the open sea]. Moscow, 1989. 44 p. (in Russian).
9. Grinev V. *Istoriya stanovleniya instituta obespecheniya bezopasnosti poletov v korpusse formirovaniya sovetskogo vnedreshnego prava* [The History of the formation of the Institute of flight safety in the context of the formation of Soviet air law]. *Russkaya pravicheskaya zhurnal "Aviatsionnyy vestnik"* [Russian legal and practical journal Aviation Herald], 2024, no. 15, pp. 34–58 (in Russian).
10. Lisitsin P.M. *Formirovaniye pravovoy mezhdunarodnoy regulatsionnoy sistemy poletov grazhdanskikh vozdukhnykh sudov* [Formation and development of the international legal system for regulating international flights of civil aircraft]. Abstract to the dissertation of candidate of legal sciences. 12.00.10.
11. CAS Strategic Plan 2026-2030. Safe, Skies, Sustainable Future. Available at: <https://www.cas.int/secretariat/SecretaryGeneral/Documents/CAS%20Strategic%20Plan%202026-30-34.pdf> (accessed 31 January 2025).
12. Prilozhenie 18 k Chicagskoy konvencii [Annex 18 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-18/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
13. Prilozhenie 2 k Chicagskoy konvencii [Annex 2 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-2/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
14. Prilozhenie 3 k Chicagskoy konvencii [Annex 3 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-3/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
15. Prilozhenie 4 k Chicagskoy konvencii [Annex 4 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-4/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
16. Prilozhenie 5 k Chicagskoy konvencii [Annex 5 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-5/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
17. Prilozhenie 6 k Chicagskoy konvencii [Annex 6 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-6/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
18. Prilozhenie 7 k Chicagskoy konvencii [Annex 7 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-7/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
19. Prilozhenie 8 k Chicagskoy konvencii [Annex 8 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-8/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
20. Prilozhenie 9 k Chicagskoy konvencii [Annex 9 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-9/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
21. Prilozhenie 10 k Chicagskoy konvencii [Annex 10 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-10/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
22. Prilozhenie 11 k Chicagskoy konvencii [Annex 11 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-11/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
23. Prilozhenie 12 k Chicagskoy konvencii [Annex 12 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-12/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
24. Prilozhenie 13 k Chicagskoy konvencii [Annex 13 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-13/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).
25. Prilozhenie 14 k Chicagskoy konvencii [Annex 14 to the Chicago Convention]. Available at: <https://www.icao.int/annexes/annex-14/pages/se.pdf.aspx> (accessed 1 January 2025).

Уважаемые авторы, приглашаем к публикации!

Авиационный вестник The aviation herald

Какие преимущества дает публикация в научно-практическом журнале «Авиационный вестник»?

- Допуск к защите диссертации;
- публикация в издании, зарегистрированном ВАК Республики Беларусь;
- повышение рейтинга в академическом и научном сообществах;
- возможность участия в научных дискуссиях с профессионалами;
- создание положительного имиджа исследователя;
- возможность продвинуться вверх по карьерной лестнице.

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СТАТЬЯМ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ

К публикации в журнале принимаются оригинальные, достоверные и обоснованные материалы, которые имеют научное и практическое значение, отличаются актуальностью и новизной.

Объем текста статьи должен составлять не менее 14 000 печатных знаков, но не превышать 40 000 печатных знаков (8–16 стр.). Рукописи большего объема принимаются только по специальному решению редакционной коллегии.

Статья должна быть выполнена в текстовом редакторе MS Word и отредактирована строго по следующим параметрам: ориентация листа — книжная, формат А4, поля по 2 см с каждой стороны, шрифт Times New Roman, кегль (для всей статьи кроме аннотации, ключевых слов и таблиц) — 14 пт, для таблиц — 12 пт, для аннотации и ключевых слов — 10 пт, междустрочный интервал — 1,5, 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.

Статья должна иметь следующую структуру:

1. УДК (номер тематической рубрики). Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации набирается обычным шрифтом, с выравниванием по левому краю.

2. Название статьи. Должно содержать до 12 слов. Не допускается использовать в названии аббревиатуры и формулы. Набирается прописными буквами, начертание — полужирное, прямое без разбиения слов переносами, с выравниванием по центру строки, без абзацного отступа, без точки в конце. Рекомендуется, чтобы в названии статьи использовались ключевые слова.

3. Инициалы и фамилия автора (авторов) с обязательным указа-

нием организации аффилирования (места работы). Инициалы и фамилия автора набираются прописными буквами, с выравниванием по правому краю строки, без абзацного отступа, без точки в конце. Через запятую перечисляются все соавторы. После названия статьи указывается фамилия, имя и отчество (полностью) автора, ученая степень, ученое звание, должность и организация аффилирования (место работы) автора, страна, адрес электронной почты. Аналогичные данные всех соавторов указываются с новой строки.

4. Аннотация (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи; должна быть информативной (не содержать общих фраз, общеизвестных положений), хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации — краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы). Текст должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, исторических справок, если они не составляют основное содержание рукописи. Следует избегать сокращений и условных обозначений, кроме общеупотребительных, ссылки на литературные источники не приводятся.

5. Ключевые слова должны содержать 5–10 слов или 3–5 словосочетаний, которые отделяются друг от друга запятой. Ключевые слова должны отражать содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования.

6. Метатекстовые данные (информация, указанная в пунктах 2–5) в той же последовательности приводится на английском языке. Если статья англоязычная —

вышеуказанные данные приводятся на русском языке.

7. Основной текст статьи может включать рисунки и таблицы (до 7–8).

Таблицы набираются в редакторе MS Word. Таблицы должны иметь номера и названия, которые должны быть указаны над таблицами. Единственная таблица в публикации не нумеруется. Исползованные в таблице сокращения подлежат расшифровке в конце таблицы.

Графический материал (рисунки, чертежи, схемы, диаграммы, фотографии) должны представлять собой обобщенные материалы исследований. Не допускается составление рисунка из разрозненных элементов. Графический материал должен размещаться сразу после его первого упоминания в тексте, а также должен быть предоставлен в виде отдельных файлов в формате .jpg/ .png/ .cdr/ или .psd (Adobe Photoshop, без склеивания слоев) с разрешением не ниже 300 dpi.). Желательно также предоставлять графические материалы в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel, Origin Pro и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Все надписи, обозначения на всех графиках, рисунках, схемах должны быть достаточно крупными, легко читаемыми, выполненными одинаковым шрифтом. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (кегель — не менее 8 пт). Названия и номера графического материала должны быть указаны под изображением. Элементы рисунков и кривые нумеруются курсивными арабскими цифрами, которые расшифровываются в подписуточных подписях. Единственный рисунок в статье не нумеруется. График должен быть наглядным, иметь аккуратное и четкое

исполнение, должен легко читаться, для чего необходимо соблюдать следующие правила: координатные оси должны заканчиваться стрелками или штрихами; оси должны быть подписаны с указанием единиц измерения. Не допускается выход рисунков за границы текста на поля. Все рисунки должны обеспечивать простое масштабирование с сохранением взаимного расположения всех элементов и внутренних надписей.

Формулы и математические символы. Простые формулы и буквенные обозначения величин нужно вставлять, используя меню «Вставка. Символ». Формулы набираются с помощью встроенного в MS Word редактора формул MathType. Шрифт Times New Roman, кегль: основной текст — 14 пт, индекс — 10 пт. Буквы (прописные и строчные) латинского алфавита, обозначающие физико-математические величины, набирают курсивом. Русские, греческие буквы, сокращенные тригонометрические и математические термины (sin, cos, tg, arcsin, ln, lg, lim, const, min, max и т. д.) набирают прямым шрифтом. Нумеруются только те формулы, на которые автор ссылается по тексту.

Иллюстрации, формулы и сноски следует нумеровать в соответ-

ствии 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.

8. Список использованных источников должен включать в себя все работы, использованные автором в тексте, и оформлен на русском (белорусском) языке в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь. Цитируемая литература приводится общим списком по мере упоминания. Каждый источник должен иметь свой порядковый номер в списке.

Затем приводится список цитированных источников в романском алфавите (латиница) (References) со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на ан-

лийский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык], выходные данные с обозначениями на английском языке. Транслитерация русскоязычных названий выполняется согласно стандарту BSI.

При оформлении списка литературы на английском языке (References) для транслитерации кириллицы используйте систему Board of Geographic Names (BGN).

Тире, а также символ // в описании на английском не используются.

Перечисляются все авторы материала через запятую. Фамилия и инициалы транслитерируются. Инициалы от фамилии запятой не отделяются.

Названия книг, журналов, материалов конференций, сборников, авторефератов и диссертаций транслитерируются и переводятся.

Транслитерация набирается курсивом, перевод — в квадратных скобках [].

Названия статей (составных частей) из журналов, сборников и т. д., а также патентов, законов, ГОСТ, СНБ, ТКП, СНиП, СанПиН и т. д. только переводятся.

К печати принимаются статьи, отвечающие профилю журнала, не публиковавшиеся ранее в других изданиях.

Материал должен быть подписан всеми авторами.

Материалы, оформленные с нарушением требований или не прошедшие рецензирование (отклонены рецензентами) не публикуются.

Примеры оформления материалов статьи и транслитерации приведены на сайте bga.by.

