

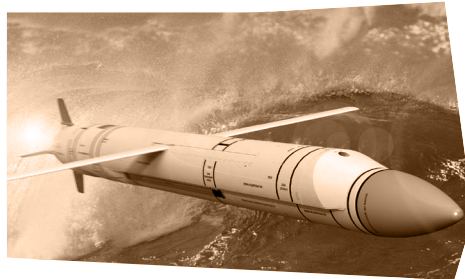
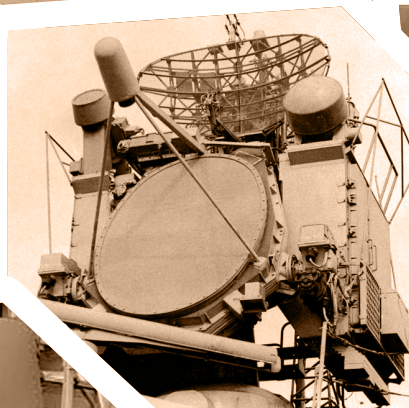
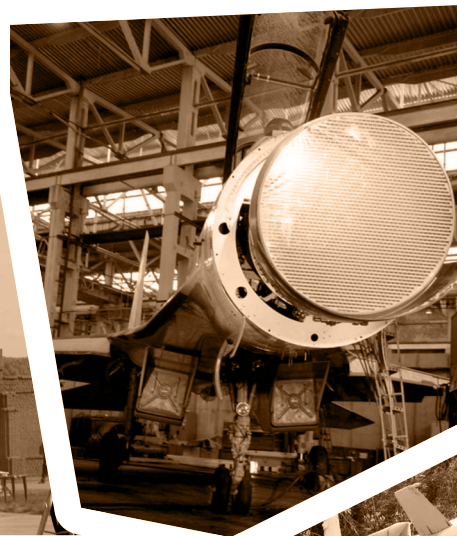
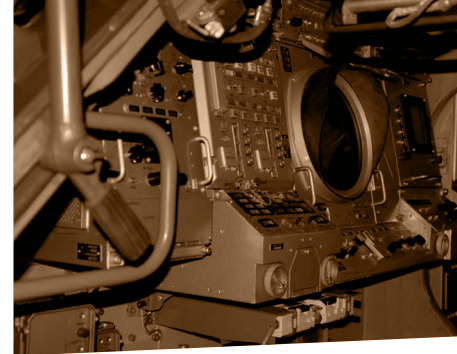
ВЕСТНИК

Концерна ВКО «Алмаз – Антей»

№ 1



2021





АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей»

Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»

№ 1

Март 2021 г.

Научно-технический журнал
Издается с июня 2009 года
Выходит четыре раза в год

Главный редактор

Козлов Г. В., д-р физ.-мат. наук, проф.

Редакционная коллегия

Авачёв А. П., канд. физ.-мат. наук
Агеев П. А., канд. техн. наук
Акопян И. Г., д-р техн. наук, канд. физ.-мат. наук, проф.
Байва Ю. В., канд. техн. наук
Балов А. В., д-р техн. наук, проф.
Белякова Е. Г., д-р техн. наук
Благоуский О. В., канд. техн. наук
Бляхман А. Б., д-р техн. наук, проф.
Богатов А. Д., канд. техн. наук
Большаков Д. Ю. (зам. гл. ред.), канд. техн. наук
Борзунов А. В., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Буров А. С., канд. техн. наук
Васильев И. В., канд. физ.-мат. наук (Республика Казахстан)
Веденев А. В., канд. техн. наук
Вильмицкий Д. С., канд. техн. наук
Власов А. В., канд. техн. наук
Востров Д. О., канд. физ.-мат. наук
Высоцкая С. А., канд. техн. наук
Гаврилов Р. С., канд. техн. наук
Гамаюнова Т. В., канд. хим. наук
Гвоздарёв Р. С., канд. техн. наук
Голиков В. Ф., д-р техн. наук, проф. (Республика Беларусь)
Гольянский М. Ю., канд. техн. наук
Громов Д. С., канд. техн. наук
Гульшин В. А., канд. техн. наук, доц.
Доронин В. В., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.
Дружин А. В., канд. физ.-мат. наук
Дружин С. В., канд. техн. наук
Дусь Т. Э., канд. пед. наук, доцент
Езерский В. В., д-р техн. наук, проф.
Ерошин С. Е., канд. техн. наук
Ершов А. М., канд. техн. наук
Жеглов М. А., канд. техн. наук
Зенин В. А., канд. техн. наук
Зиновьева Е. С., канд. физ.-мат. наук
Зотов А. В., канд. техн. наук
Иванов А. М., канд. техн. наук
Иванов С. Н., канд. техн. наук
Ивашов С. И., канд. техн. наук
Исаков М. А., канд. физ.-мат. наук
Каляев И. А., д-р техн. наук, акад. РАН
Караванов Я. С., канд. техн. наук
Кауфман Г. В., д-р техн. наук
Кисляков В. И., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Койтов С. А., д-р техн. наук
Колчин С. А., канд. техн. наук
Комаров М. В., канд. техн. наук
Комягин Р. В., канд. техн. наук, доц.
Кондрашов В. В., канд. техн. наук
Костров Б. В., д-р техн. наук, проф.
Кузнецов В. С., канд. техн. наук
Кузнецов П. С., канд. техн. наук
Кулаков А. В., д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН
Куликов А. А., канд. техн. наук
Ластовецкий А. Е., канд. техн. наук
Левихин А. А., канд. техн. наук
Лейман Д. В., канд. хим. наук
Леманский Д. А., канд. техн. наук, доц.
Лемешко Н. В., д-р техн. наук
Мазур Н. З., д-р экон. наук, доц.
Матюгин С. Н., канд. физ.-мат. наук
Миронов М. В., канд. техн. наук
Мирталибов Т. А., д-р техн. наук, проф.
Михеев К. В., канд. техн. наук
Наумов С. В., канд. техн. наук
Нагорных И. Л., канд. физ.-мат. наук
Окулов Р. А., канд. техн. наук
Парамонова А. А., канд. техн. наук
Панфилов С. В., канд. физ.-мат. наук
Пирязев М. С., канд. экон. наук
Плешанова Ю. А., канд. техн. наук
Плужников А. Д., д-р техн. наук, проф.
Подгорнов А. А., канд. техн. наук
Пономарёв О. П., д-р техн. наук, доц.
Ратынский М. В., д-р техн. наук
Рожков А. А., канд. техн. наук
Сайбель А. Г., д-р техн. наук, доц.
Самохина Е. А., канд. техн. наук
Сафин Н. Р., канд. техн. наук
Светухин В. В., д-р физ.-мат. наук, проф.
Смирнов А. Г., канд. техн. наук, доц.
Сигов А. С., д-р физ.-мат. наук, проф., акад. РАН
Синани А. И., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Смирнов А. С., д-р техн. наук
Смирнов В. Л., канд. техн. наук
Смирнов Е. П., канд. техн. наук
Соколов П. А., д-р техн. наук, проф.
Страхов А. Ф., д-р техн. наук, проф.
Судаков М. К., канд. техн. наук, доц.
Сычушкин И. В., канд. техн. наук
Таричко В. И., канд. техн. наук
Теляков Р. Ф., канд. техн. наук
Терентьев М. А., канд. физ.-мат. наук
Тигетов Д. Г., канд. техн. наук
Тимашева Т. Г., канд. техн. наук
Устинов А. Н., канд. техн. наук
Фарбер В. Е., д-р техн. наук, проф.
Феокистов А. Ю., канд. техн. наук
Фёдоров Д. А., канд. техн. наук
Филимонов В. И., д-р техн. наук, проф.
Фридман Л. Б., д-р техн. наук
Халиков З. А., канд. физ.-мат. наук
Царев И. Е., канд. техн. наук
Шевцов А. А., канд. техн. наук
Шентябин А. Н., канд. воен. наук
Шимкин П. Е., канд. техн. наук
Щеглов Д. К., канд. техн. наук
Янцевич М. В., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

СОДЕРЖАНИЕ



Обращение к читателям заместителя главного редактора
Д. Ю. Большакова 3

Входя в мировую науку
Большаков Д. Ю. 4

Объявление благодарности отличившимся рецензентам 6

Организация и управление



Обучение персонала принципам бережливого производства
в системе дистанционного обучения на предприятии
оборонно-промышленного комплекса
Андреев И. А. 8

Электроника. Радиотехника



Методы оценки и исследование зависимости точности
целеуказания бортовому локатору ракеты от ошибок
определения координат цели и ракеты наземным локатором
Созинов П. А., Горевич Б. Н. 22

Повышение точности АЦП
с промежуточным преобразованием в частоту
Добрынин В. В. 42

Космические исследования и ракетостроение



Перспективные методы организации тепловой защиты
гиперзвуковых летательных аппаратов
Аронов Д. И., Клягин В. А. 52

Управление изменением поверхности горения зарядов твердого
топлива за счет применения теплопроводных элементов
Савельев С. К., Щеглов Д. К. 67

Машиностроение



Автоматизация процесса анализа отказов, оценки надежности
и эффективности доработок изделий
Афанасьев В. Б., Воробьев Т. К., Мамаев В. А.,
Медведев В. М., Тихменев Н. В. 76



Внесение конструкторских данных
в проектное решение и их модификация в задачах
геометрического моделирования
Цыганков Д. Э., Шайхеева Г. Р., Горбачев И. В.

85

Математика



Некоторые результаты экспериментального исследования
прототипа автономной инфракрасной системы распознавания
наземных объектов
**Мальцев А. И., Откупман Д. Г., Осташенкова В. К.,
Останин М. В.**

93

Информатика



Сеть-на-кристалле нового поколения микропроцессоров
с архитектурой «Эльбрус»
Кожин Е. С., Кожин А. С.

103

Информация



Правила приема и оформления рукописей,
направляемых для публикации в журналах «Вестник
Конcerna ВКО «Алмаз – Антей» и «Специальный
вестник Конcerna ВКО «Алмаз – Антей»

110

Решением Министерства образования и науки Российской Федерации научно-технический журнал «Вестник Конcerna ВКО «Алмаз – Антей» вошел в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по специальностям научных работников:
05.02.09 – технологии и машины обработки давлением (технические науки);
05.02.22 – организация производства (по отраслям) (технические науки);
05.07.01 – аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов (технические науки);
05.07.02 – проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (технические науки);
05.07.03 – прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки);
05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки);
05.12.07 – антенны, свч-устройства и их технологии (технические науки);
05.12.13 – системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки);
05.12.14 – радиолокация и радионавигация (технические науки).

Редакция

121471, Москва, ул. Верейская, д. 41
Тел.: +7 (495) 276-26-13
Факс: +7 (495) 276-29-81
E-mail: PRESS@almaz-antey.ru
Сайт: <http://www.almaz-antey.ru>

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-65830 от 27.05.2016 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

ISSN 2542-0542

<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1>

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Роспечать» – 79162

Учредитель

АО «Конcern ВКО «Алмаз – Антей»
121471, Москва, ул. Верейская, д. 41

Издатель

ООО «НЭИКОН ИСП»
115114, Москва, ул. Летниковская, д. 4, стр. 5

Подписано в печать 17.02.2021

Формат 60×90/8. Печ. л. 13,75

Тираж 400 экз. Заказ № 21-Z-0214

Свободная цена

Типография

ООО «Медиколор»
127273, Москва, Сигнальный проезд, д. 19, БЦ «Вэздан»

© АО «Конcern ВКО «Алмаз – Антей», 2021

Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”

Scientific and technical journal
The journal has been published since 2009
4 issues per year

Editorial office

121471, Russian Federation, Moscow, Vereyskaya str., 41
Tel.: +7 (495) 276-26-13
Fax: +7 (495) 276-29-81
E-mail: PRESS@almaz-antey.ru
Website: <http://www.almaz-antey.ru>

Registered at the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor) under the number ПИ № ФС77-65830, 27.05.2016

ISSN 2542-0542

<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1>

Subscription index in the catalogue “Rospechat” – 79162

Founder

“Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation, JSC
121471, Russian Federation, Moscow, Vereyskaya str., 41

Publisher

“NEICON ISP” LLC
115114, Russian Federation, Moscow, Letnikovskaya str., 4, building 5

Passed for printing 17.02.2021

Circulation 400 copies

Free price

Printing office

“Mediacolor” LLC
127273, Russian Federation, Moscow, Signalnyi proezd, 19,
Business Center “Veldan”

© “Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation,
Joint Stock Company, 2021



Уважаемые читатели!

Интерес к научно-техническому журналу «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» и тематика публикуемых статей растут с каждым годом. По данным Российского индекса научного цитирования, уже больше десяти лет новые авторы составляют две трети всех авторов.

Редакция журнала постоянно работает над повышением качества журнала. И именно отличное качество как главную ценность публикации отметила половина подписчиков в ходе прошлогоднего опроса.

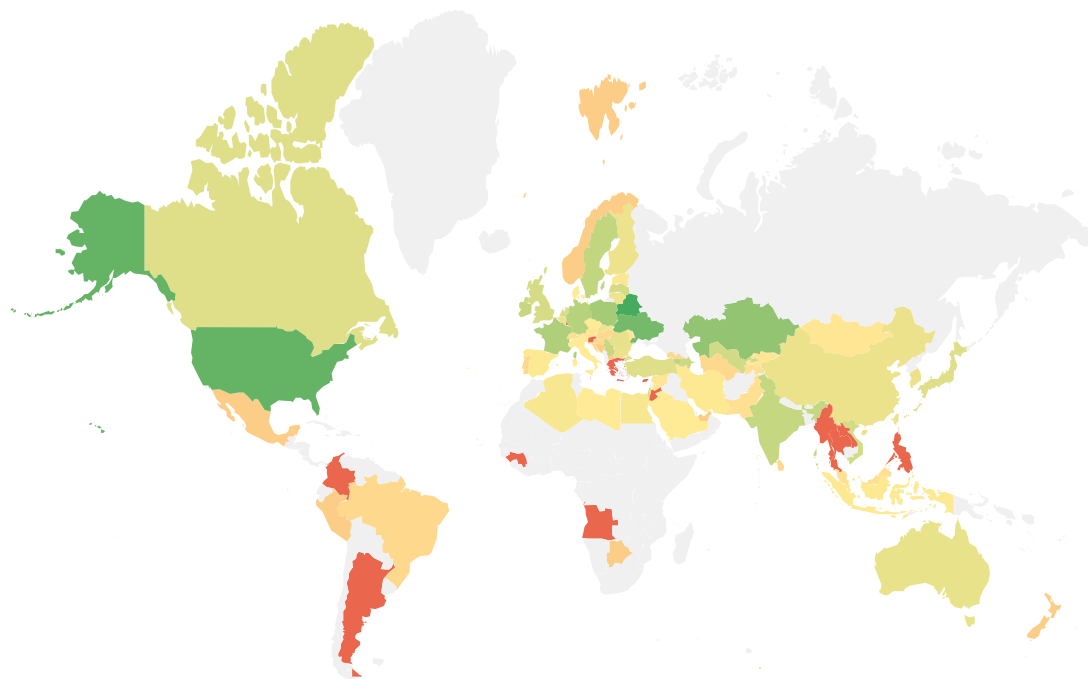
Вопросы по поводу публикации присылайте на мой электронный адрес press@almaz-antey.ru или по телефону +7 (495) 276-26-13. Напоминаю, что статьи принимаются от организаций России и зарубежья (публикация бесплатная), а на сайте журнала <http://journal.almaz-antey.ru> предоставлена возможность оформить бесплатную подписку на e-mail рассылку электронной версии издания.

Заместитель главного редактора

Денис Большаков



Подписка
на рассылку



Д. Ю. Большаков

Входя в мировую науку

С октября 2020 года «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» переводится на английский язык. Англоязычная версия доступна на сайте журнала <http://journal.almaz-antey.ru>. Перевод архивных номеров с 2015 года станет доступным до конца 2021 года. Уверен, что это повысит видимость исследований авторов в мировом научном сообществе. Следует отметить, что результаты уже есть. Так, например, на рисунке 1 показан рост иностранного трафика на сайт журнала с момента размещения первой англоязычной версии.

Как видно из графика, рост с сентября по январь 2021 года более чем двукратный, хотя на момент написания заметки было переведено только 8 выпусков из 23.

Переводные версии статей уже индексируются в англоязычных поисковых системах Google и Yahoo. Причем, как видно из графика на рисунке 1, поисковый трафик составляет две трети от общего, то есть информацию о статьях наших авторов ищут в поисковых системах и находят на сайте журнала.

Для анализа распределения по возрасту наших иностранных читателей построена диаграмма на рисунке 2.

Следует отметить, что распределение по возрасту для российских посетителей журнала имеет примерно такое же распределение, как показано на рисунке 2. То есть почти 70 % посетителей сайта старше 25 лет.

Страны, которые отмечаются на сайте журнала, приведены в облаке слов на рисунке 3 и в начале этой заметки на карте мира.

Как видно из рисунка 3, география наших читателей составляет всю Западную

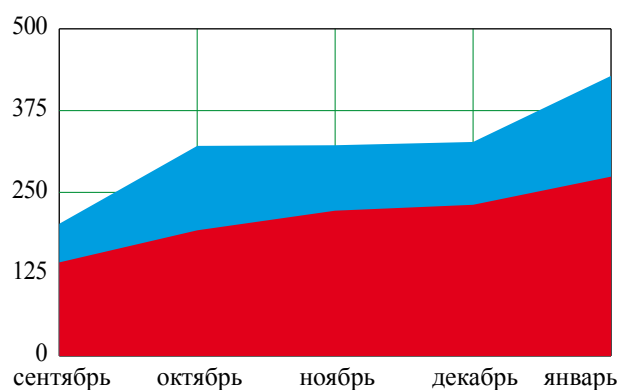


Рис. 1. Рост иностранного трафика
■ – весь трафик, ■ – поисковый трафик

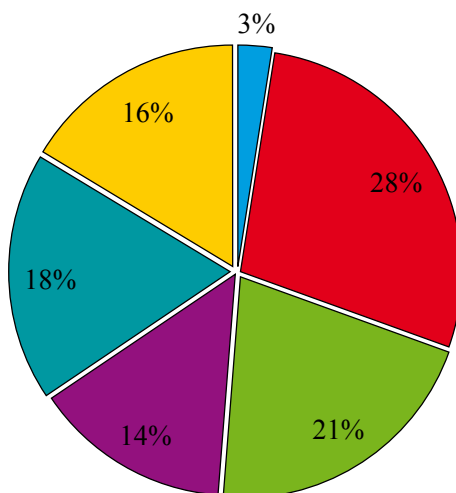


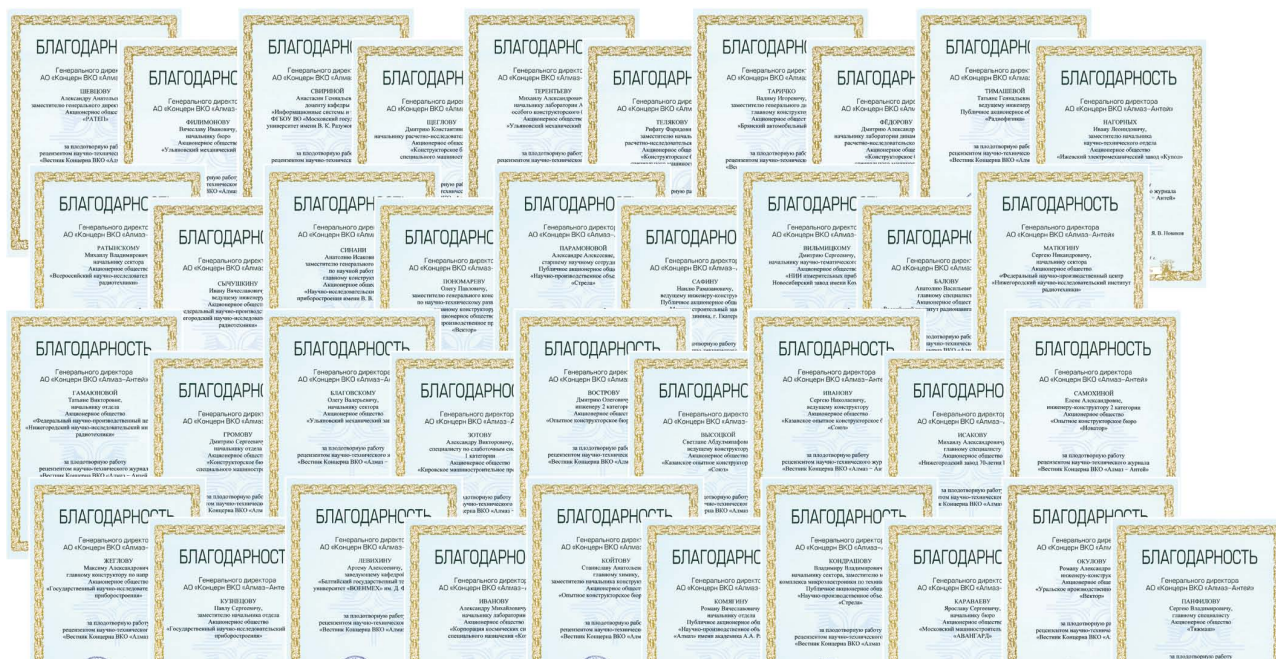
Рис. 2. Распределение по возрасту иностранных посетителей сайта журнала

■ – младше 18 лет, ■ – 18–24 года, ■ – 25–34 года, ■ – 35–44 года, ■ – 45–54 года, ■ – 55 лет и старше

и Восточную Европу, Северную Америку, Азию и Океанию.

Редакция журнала открыта для диалога с читателями. Предложения по расширению рассылки журнала, продвижению

в Интернете, социальных сетях и международных реферативных базах, улучшению качества и наполнению направляйте на электронный почтовый ящик редакции: press@almaz-antey.ru



Объявление благодарности отличившимся рецензентам

В 2020 году в научно-технический журнал «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» вошли более ста статей, каждая из которых прошла двойное «слепое» рецензирование. Большая часть этой ответственной работы выполнена 38 экспертами, профессионализм которых обеспечил высокий уровень публикаций журнала. 25 января 2021 года генеральным директором Концерна подписан приказ № 22 об объявлении благодарности наиболее отличившимся специалистам предприятий Концерна и сторонних организаций, принявших активное участие в работе по рецензированию статей:

ведущему специалисту АО «РИРВ»
Балову Анатолию Васильевичу;

начальнику сектора АО «УМЗ»
Благовскому Олегу Валерьевичу;

начальнику научно-тематического отделения АО «НПО НИИИП-НЗиК» Вильмицкому
Дмитрию Сергеевичу;

инженеру 2 категории АО «ОКБ
«Новатор» Вострову Дмитрию Олеговичу;

ведущему конструктору АО «Казанское ОКБ «Союз» Высоцкой Светлане Абдулмянафовне;

начальнику отдела АО «ФНПЦ «ННИИРТ» Гамаюновой Татьяне Викторовне;

начальнику отдела АО «КБСМ» Грозову
Дмитрию Сергеевичу;

главному конструктору по направлению АО «ГосНИИП» Жеглову Максиму Александровичу;

специалисту по слаботочным системам 1 категории АО «КМП» Зотову Александру Викторовичу;

начальнику лаборатории АО «Корпорация «Комета» Иванову Александру Михайловичу;

ведущему конструктору АО «Казанское ОКБ «Союз» Иванову Сергею Николаевичу;

главному специалисту АО «НЗ 70-летия Победы» Исакову Михаилу Александровичу;

начальнику бюро АО «ММЗ «АВАНГАРД» Караеву Ярославу Сергеевичу;



заместителю начальника конструкторского отдела АО «ОКБ «Новатор» Койтову Станиславу Анатольевичу;

начальнику отдела ПАО «НПО «Алмаз» Комягину Роману Вячеславовичу;

начальнику сектора, заместителю начальника комплекса микроэлектроники по технике и технологии ПАО «НПО «Стрела» Кондрашову Владимиру Владимировичу;

заместителю начальника отдела АО «ГосНИИП» Кузнецову Павлу Сергеевичу;

заведующему кафедрой БГТУ «ВОЕНМЕХ» Левихину Артему Алексеевичу;

начальнику сектора АО «ФНПЦ «ННИИРТ» Матюгину Сергею Никандровичу;

заместителю начальника научно-технического отдела АО «ИЭМЗ «Купол» Нагорных Ивану Леонидовичу;

инженеру-конструктору АО «УПП «Вектор» Окулову Роману Александровичу;

главному специалисту АО «Тяжмаш» Панфилову Сергею Владимировичу;

старшему научному сотруднику ПАО «НПО «Стрела» Парамоновой Александре Алексеевне;

заместителю генерального конструктора по научно-техническому развитию – главному конструктору АО «УПП «Вектор» Пономареву Олегу Павловичу;

начальнику сектора АО «ВНИИРТ» Ратынскому Михаилу Владимировичу;

инженеру-конструктору 2 категории АО «ОКБ «Новатор» Самохиной Елене Александровне;

ведущему инженеру-конструктору ПАО «МЗиК» Сафину Наилу Рамазановичу;

доценту кафедры «Информационные системы и технологии» ФГБОУ ВО «МГУТУ им В.К. Разумовского» (ПКУ) Свириной Анастасии Геннадьевне;

заместителю генерального директора по научной работе, главному конструктору АО «НИИП имени В.В. Тихомирова» Синани Анатолию Исаковичу;

ведущему инженеру АО «ФНПЦ «ННИИРТ» Сычушкину Ивану Вячеславовичу;

заместителю генерального директора – главному конструктору АО «БАЗ» Таричко Вадиму Игоревичу;

заместителю начальника расчетно-исследовательского отдела АО «КБСМ» Телякову Рифату Фаридовичу;

начальнику лаборатории АФУ особого конструкторского бюро АО «УМЗ» Терентьеву Михаилу Александровичу;

ведущему инженеру ПАО «Радиофизика» Тимашевой Татьяне Геннадьевне;

начальнику лаборатории АО «КБСМ» Фёдорову Дмитрию Александровичу;

начальнику бюро АО «УМЗ» Филимонову Вячеславу Ивановичу;

заместителю генерального директора по качеству АО «РАТЕП» Шевцову Александру Анатольевичу;

начальнику отделения АО «КБСМ» Щеглову Дмитрию Константиновичу.

Благодарим всех членов редакционной коллегии за участие в работе по изданию журнала и повышению качества публикуемого материала. Рассчитываем на дальнейшее плодотворное сотрудничество.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-8-21>

УДК 338.36:005:658.51

Обучение персонала принципам бережливого производства в системе дистанционного обучения на предприятии оборонно-промышленного комплекса

И. А. Андреев^{1,2}

¹ Общество с ограниченной ответственностью «СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Акционерное общество «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрено применение методов и инструментов бережливого производства, направленное на сокращение издержек при организации обучения работников предприятия оборонно-промышленного комплекса, затрачиваемых ранее на перемещения и ожидание, отрыв от производства, а также в связи с обострившейся эпидемиологической обстановкой.

Ключевые слова: бережливое производство, дистанционное обучение, система дистанционного обучения, эпидемиологические ограничения, промышленное предприятие, оборонно-промышленный комплекс, Обуховский завод, СЗРЦ

Для цитирования: Андреев И. А. Обучение персонала принципам бережливого производства в системе дистанционного обучения на предприятии оборонно-промышленного комплекса // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 1. С. 8–21. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-8-21>

For citation: Andreev I. A. Personnel training in the sphere of lean production as part of a distance learning system for a military-industrial company // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 1. P. 8–21. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-8-21>

Поступила 30.11.2020 Отрецензирована 04.12.2020 Одобрена 14.01.2021 Опубликована 17.02.2021

Введение

За последние годы требования к кадрам в организациях оборонно-промышленного комплекса (далее – ОПК) сильно возросли. Динамично меняются виды выпускаемой продукции, повышаются ее характеристики и возрастает добавленная ценность. Роботизация, автоматизация, аддитивные технологии активно вытесняют «традиционное» ручное производство, отсюда сокращается потребность в низкоквалифицированном труде рабочих и увеличивается спрос на сотрудников с высокими компетенциями и квалификацией. Специфика предприятий ОПК такова, что готовых специалистов на рынке труда недостаточно, а для производства высокотехнологичной и наукоемкой продукции требуется

высококвалифицированный персонал, который должен постоянно повышать свой уровень развития. Результатом сильной кадровой подготовки является непрерывное развитие всех процессов организации ОПК, которые можно условно разделить на четыре основные группы, представленные на рисунке 1.

- Основные процессы – создают добавленную стоимость продукции, которые производит организация ОПК.

- Обеспечивающие процессы – поддерживают протекание основных процессов и инфраструктуру организации ОПК.

- Процессы управления – управляют организацией ОПК, поддерживают и координируют основные и обеспечивающие процессы.

- Процессы развития – совершенствуют все виды процессов и, как следствие, организацию ОПК.

© Андреев И. А., 2021



Рис. 1. Типовые процессы организации ОПК

Принципы бережливого производства

С целью совершенствования всех процессов организации, реализации системы непрерывных улучшений и раскрытия творческого потенциала кадров в АО «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» – Обуховский завод» (далее – Обуховский завод) идет всеобъемлющее внедрение и развитие системы менеджмента бережливого производства (далее – СМБП). Основной целью СМБП является построение и развитие всех процессов организации на основе принципов бережливого производства, то есть правил, применение которых позволит построить бережливое предприятие и производить продукцию с требуемым качеством, сокращая время протекания потоков/процессов/операций и снижая стоимость производства, как следствие, увеличивая производительность труда. Методы бережливого производства применяются и к процессам обучения персонала, поскольку для реализации улучшений требуется постоянно развивать кадровый потенциал организации, организовывать стажировки и ротации, демонстрировать лучшие мировые и отечественные практики, проводить конкурсы профессионального мастерства и т.д. Компетенции в рамках СМБП определяются знаниями, умениями и навыками сотрудников использовать в своей работе принципы БП. Рассмотрим 5 базовых

принципов БП, изложенных с учетом современных требований рынка и специфики организаций ОПК, которым обучаются все сотрудники, и уровень знаний и применения учитывается для определения степени квалификации персонала в рамках аттестаций.

1. Определение ценности для заказчика.

Любой заказчик, покупая что-либо, платит за ценность, принесенную в продукцию или услугу. Для примера: военный представитель заказчика платит за нормируемую и оцененную трудоемкость, поскольку именно вложенные нормо-часы работников определяют ценность готовой продукции или услуги. Определение ценности каждого продукта, которые производит организация ОПК, важно для процессов развития, ведь только так можно выявить явные и скрытые потери. Данный принцип определяет необходимость обучения сотрудников основным понятиям ценности продукта и способам ее выявления.

2. Описание и формализация потоков/процессов/операций организации.

В рамках обучения сотрудников данный принцип позволяет научить формализовывать и проводить анализ каждого потока, процесса и операции в организации с точки зрения присутствия в них действий, добавляющих ценность продукции и потерь. Потери присутствуют всегда и везде в разном соотношении, и основной задачей БП является их



сокращение. Потери можно разделить на две категории:

- которые присутствуют и не могут быть устранены полностью в силу сложившейся ситуации в организации, а лишь минимизированы. Например: размещение цехов на расстоянии друг от друга приводит к потерям на транспортировку деталей и перемещению сотрудников;
- которые присутствуют и могут быть устранены полностью.

При устранении и снижении влияния ненужных этапов или операций высвобождаются резервы производства для роста производительности труда в части своевременного выполнения государственного оборонного заказа (далее – ГОЗ), диверсификации производства и выпуска конкурентоспособной гражданской продукции.

Для выявления потерь и дальнейшей оптимизации потоков/процессов/операций необходимо детально описать все действия, используя инструменты бережливого жизненного цикла сложных технических систем (имитационное моделирование, построение цифровых двойников производства, статистические методы качества, картирование потока создания ценности, кросс-функциональная диаграмма, диаграмма перемещений, диаграмма взаимодействий и т.д.).

3. Обеспечение непрерывности и балансировка потоков/процессов/операций организации.

Обучение персонала и дальнейшее применение этого принципа в работе позволяют обеспечить бесперебойное протекание всех потоков/процессов/операций организации без прерываний и задержек. Для реализации непрерывности существуют разные стратегии и тактики, которые включают в себя: разделение труда и перенастройку этапов производства, выравнивание и балансировку нагрузки на персонал и оборудование, создание проектного офиса и межфункциональных рабочих групп, обучение сотрудников с использованием матриц компетенций, и другое. Цель принципа: увеличить добавленную ценность продукции, сокращая используемые ресурсы. В организациях ОПК

следование данному принципу позволяет планомерно обеспечивать и эффективно загружать производство, сокращать незавершенное производство и ускорять оборачиваемость финансов, сырья и запасов. В настоящее время применение данного принципа ставится во главу угла во многих организациях ОПК при диверсификации и выходе на внешний рынок, поскольку только бережное отношение к ресурсам и правильное их распределение дает возможность конкурировать с окружающей средой. Достигнуть максимальной эффективности в применении данного принципа позволяет цифровизация, работа по времени такта и автоматизация производства.

4. Эффективная система управления.

Обучая персонал, необходимо обращаться к лучшим мировым и отечественным практикам. Традиционное бережливое производство, построенное в компании «Тойота», признает только принцип вытягивания, который в свое время заменил систему тщательного и скрупулезного планирования сырья, материалов и продукции, перемещаемой по внутренним потребителям организации. В связи с единичностью и мелкосерийностью производств большинства организаций ОПК, сложностью с системой договорной политики и спецификой выполнения ГОЗ принцип вытягивания в традиционном понимании не работает. Отсюда система работает по смешанному принципу, исходя из заключенных договоров и требований военного заказчика, в заказе присутствуют единичные и серийные изделия. В части единичного производства система работает по выталкивающему принципу, поскольку создание инфраструктуры для вытягивания займет больше времени и ресурсов и окажется неэффективным. Так создается общий цикловой график, на котором указываются конструкторско-технологические сроки подготовки, подготовка производства, закупка сырья и материалов, производство, испытания и другое. Система работы с серий и массовое производство зачастую строятся на принципах вытягивания, где обеспечение внутренних клиентов производства происходит по потребностям конечных. Вытягивание позволяет осуществлять доставку и производство точно



в срок, когда продукция создается в то время, когда она необходима, и только в требуемом количестве. Данный принцип крайне важен с точки зрения понимания систем персоналом, так как решение о применении может быть принято как директивно на уровне всей организации, так и локально, т.е. внутри линейного подразделения.

5. Непрерывное совершенствование.

Этот принцип позволяет постоянно стремиться к развитию всех потоков/процессов/операций в организации и формировать организационную культуру. Каждый сотрудник в организации должен следовать принципам БП, стремиться к совершенству и стараться ежедневно оптимизировать свою работу. Организация должна стать обучающейся и саморазвивающейся. Обучить данному принципу невозможно, можно лишь воспитать данную культуру в каждом сотруднике. Для этого существуют инструменты, позволяющие проводить в организации ОПК политику, направленную на раскрытие творческого потенциала работников.

Обучая сотрудников предприятий ОПК данным принципам и требованиям применения их на практике, удалось достигнуть значительного эффекта в рамках увеличения производительности труда, сокращения непроизводительных потерь, эффективности использования оборудования и др. Одним из таких предприятий ОПК является дочернее общество Концерна ВКО «Алмаз-Антей» – Обуховский завод.

Направления обучения персонала на Обуховском заводе

Обуховский завод – одно из старейших промышленных предприятий Санкт-Петербурга, в мае 2020 года отметил 157-летие, а в ноябре – 200-летие со дня рождения основателя завода Павла Матвеевича Обухова. За последние десять лет предприятие полностью перестроили: новые просторные, чистые здания и корпуса основного и вспомогательного производства, обновленный станочный парк и современное оборудование. Завод шагнул далеко вперед в плане модернизации основных средств производства, однако сознание работников зачастую не так быстро

восприимчиво к переменам, и поэтому новые возможности используются далеко не в полном объеме, возникают различные потери, и главная из них – это потери, связанные с нежеланием изменений у работников и отсутствием мотивации к улучшениям. Коренная причина этого – недообученность. Отсюда возникает потребность в создании фундаментальной системы корпоративного обучения с целью организации эффективной работы всех подразделений. Наиболее оптимально строить систему, основанную на принципах БП.

На Обуховском заводе корпоративная система обучения является важнейшим компонентом СМБП и главным из четырех направлений развития [1], представленных на рисунке 2.

Построение корпоративной системы обучения персонала принципам БП должно обеспечить вовлечение слушателей в проводимые на Обуховском заводе преобразования и изменение личностных установок персонала, поэтому это фундамент и опора, на которую опираются другие составляющие СМБП [2]. Систему обучения, построенную на принципах БП, можно сравнить с системой орошения в аграрной промышленности. Раньше в ирригации применялось фронтальное орошение, когда огромные механизмы медленно перемещались по полю, заливая целиком его водой. Подача воды шла одинаково для всех растений,



Рис. 2. Составляющие СМБП



и это приводило к эрозии почвы, болезням растений, медленному созреванию урожая, большим затратам на воду.

Для сокращения потерь перешли к бережливому капельному орошению. В этом случае вода подается непосредственно в корневую часть выращиваемых растений, причем в именно том объеме, который нужен, и тогда, когда нужно. В итоге культуры растут, созревают раньше, меньше эрозии почвы и болезней растений. Ценностью в данном примере является объем воды, доставленный к корню растения точно в нужное время и в нужном объеме. Любое отклонение от ценности, например увеличение подачи воды или орошение после дождя, приведут к потерям и навредят растению.

По аналогии с данным примером можно отметить, что обучение должно быть построено на принципах БП и к каждому обучаемому должен быть применен «капельный» подход.

Обучение сотрудников бережливости включает в себя несколько видов.

1. Вводное обучение всех вновь принятых сотрудников. Целью данного обучения является предварительное ознакомление всех новых работников Обуховского завода с основами БП. В рамках данного обучения идет формирование первичного понимания деятельности БП, объяснение основных терминов и понятий, передача первичных знаний об инструментах БП, видах мотивации за участие в развитии предприятия. Статистика по вводному обучению за 2017–2019 гг. представлена на рисунке 3.

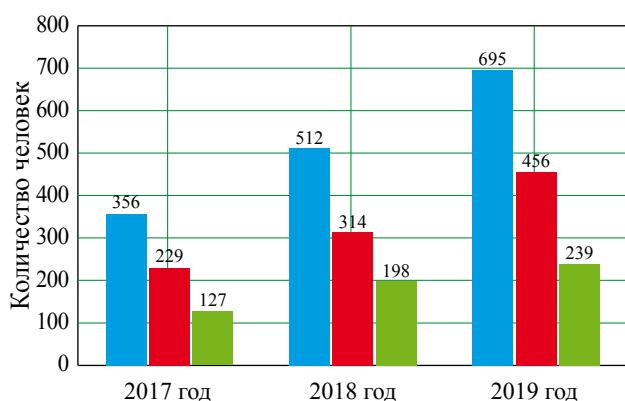


Рис. 3. Статистика по вводному обучению
■ – общее, ■ – ОПР, ■ – ИТР

2. Проектное обучение членов рабочих групп для достижения уникальных целей и реализации проектов по улучшениям. Задачами данного обучения являются: формирование компетенций у членов рабочих групп для последовательной реализации проекта как в теории, так и на практике, знакомство с методами наблюдения и анализа текущей ситуации, правильного целеполагания, инструментами изменения сложившейся ситуации, информирование о способах реализации мероприятий плана проекта и мотивации по завершению проекта. Статистика по проектному обучению за 2017–2019 гг. представлена на рисунке 4.

3. Специальное обучение нацелено на формирование определенных компетенций исходя из стратегических и тактических целей организации, выполнения программ долгосрочного развития и повышения операционной эффективности, потребностей подразделений, достижения целей СМБП и другого.

Корпоративная система обучения персонала является объектом постоянных улучшений, и поскольку процессы обучения на Обуховском заводе достаточно трудоемки и длительны, их также необходимо развивать и оптимизировать.

Анализ опыта организации процесса обучения бережливому производству на Обуховском заводе

Процесс обучения, как и любой другой, например производственный, содержит в себе множество потерь, которые необходимо сокращать или устранять полностью. Для понимания

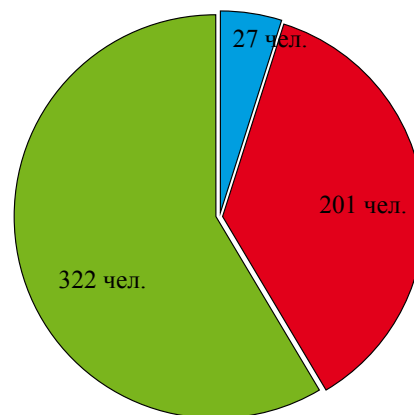


Рис. 4. Статистика по проектному обучению
■ – 2017 год, ■ – 2018 год, ■ – 2019 год

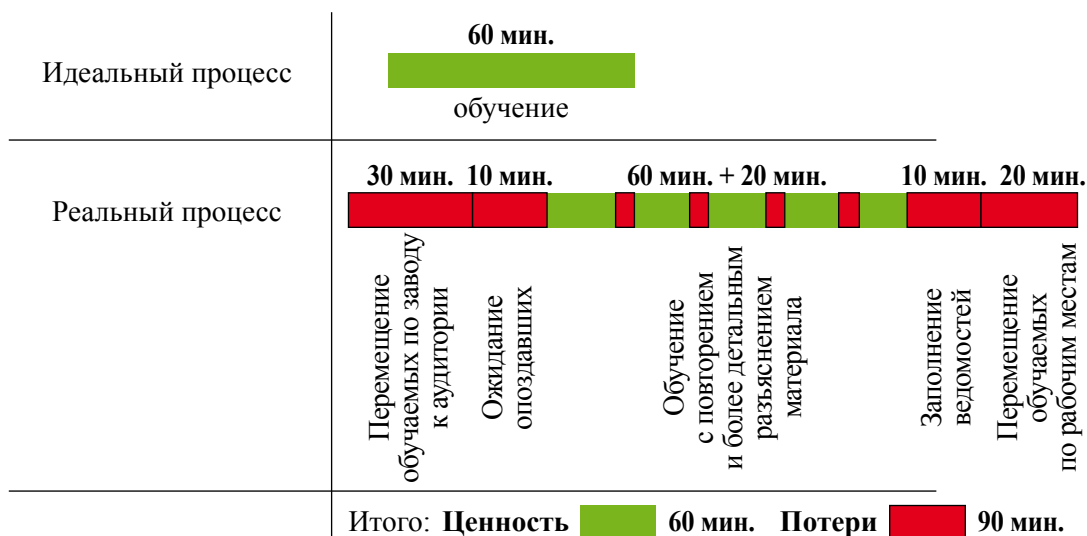


Рис. 5. Формализованный процесс вводного обучения БП со стороны обучаемых

соотношения ценность/потери в процессе обучения и значимости потерь необходимо детально описать процесс. Для примера возьмем обязательное для всех новых сотрудников вводное обучение по бережливому производству, организованное на Обуховском заводе 2 раза в месяц в установленные даты и время. Рабочей группой 3 раза был проведен детализированный хронометраж процесса обучения и проведена аппроксимация данных, представленная на рисунке 5. Сначала показан идеальный процесс, состоящий из 60 минут впитывания знаний обучаемыми, однако этот процесс не представляется возможным при обыденных подходах к его организации, отсюда получается реальный процесс, включающий в себя помимо ценности еще и потери, которые в итоге в 1,5 раза больше действий, создающих ценность.

Представив результаты обучения по месяцам, можно определить ежегодный прирост обучаемых, а также трудоемкость реализации образовательной программы по вводному обучению.

Для визуализации количества потерь при организации вводного обучения следует соотнести количество обучившихся (рис. 6) и статистику ценность/потери (рис. 5). Данные представлены в таблице 1.

Поскольку прогноз на 2020 год показал рост числа обучаемых и стало понятно, что в связи с интеграцией ООО «СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей» и АО

«Обуховский завод» прирост новых сотрудников увеличится ориентировочно на 42 %, а временные потери, связанные с очным обучением сотрудников, составляли 60 % от общего времени, затрачиваемого на обучение (перемещение сотрудников до места обучения, ожидание, заполнение документации и другое), было принято решение об оптимизации процесса вводного (потом – проектного и специальных) обучения БП и запуска пилотного проекта по созданию системы дистанционного обучения (далее – СДО).

Помимо потерь в процессе обучения обоснованием для открытия проекта стали постоянные отвлечения сотрудников отдела бережливого производства для преподавания

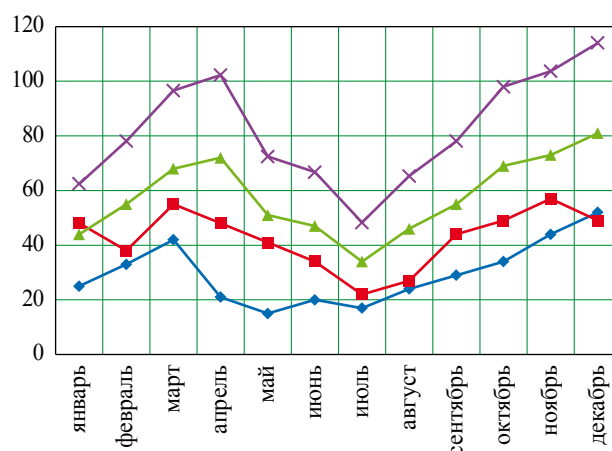


Рис. 6. Статистика и прогноз по количеству обученных вводному обучению БП
— 2017 год, — 2018 год, — 2019 год, — 2020 год (прогноз)



Таблица 1

Статистика по вводному обучению БП

Период	Численность обучаемых сотрудников, чел.	Временные затраты сотрудников на вводное обучение по БП (включая потери), час	Время обучения, час	Временные потери, включая отвлечение сотрудников от работы и потери (перемещение до места обучения, ожидание и др.), час
2017	356	890	356	534
2018	512	1280	512	768
2019	695	1737,5	695	1042,5
Общее	1563	3907,5	1563	2344,5
2020 (прогноз)	986	2467	986	1480

Таблица 2

Статистика по потерям на вводное обучение

Период	Отвлечение сотрудников отдела БП на преподавание и занятость аудитории, час	Вопросы и жалобы на разное преподнесение информации, час	Использование материалов обучения на практике, % от обучаемых	Временные потери, включая отвлечение сотрудников от работы и потери (перемещение до места обучения, ожидание и др.), час
2017	61,5	3	5	534
2018	61,7	5	7	768
2019	62,1	1	9	1042,5
Общее	185,3	9	8 (среднее)	2344,5
2020 (прогноз)	62	10	8	1480

(рис. 7), разное преподнесение информации (в зависимости от лектора), необходимость выделения аудитории под занятия, потребность в единой базе знаний на всей площадке СЗРЦ, а также рост числа заболевших новой коронавирусной инфекцией и запрет на массовые скопления сотрудников в одном месте. Сводное количество потерь представлено в таблице 2.

Пути совершенствования системы дистанционного обучения

Целью проекта являлась организация единой цифровой платформы обучения за 6 месяцев

для оптимизации временных затрат на обучение сотрудников с высвобождением около 1500 часов потерь на 2020 год на перемещения к местам обучения, различные ожидания и прохождение обучающей программы по вводному обучению (в дальнейшем и других программ).

Чтобы выполнить цель в точно установленный промежуток времени, необходимо создать межфункциональную рабочую группу для тщательной проработки и декомпозиции цели на задачи [3]. В рабочую группу вошли: разработчики СДО из отдела конструкторского сопровождения производства (далее – ОКСП) и управления информационных технологий

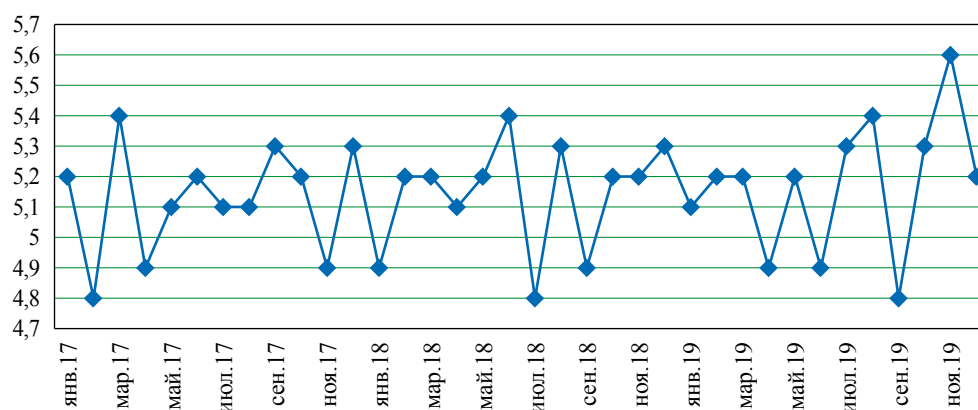


Рис. 7. Статистика по временным потерям преподавателя на вводное обучение

— Отвлечение сотрудников отдела БП на преподавание и занятость аудитории, часов

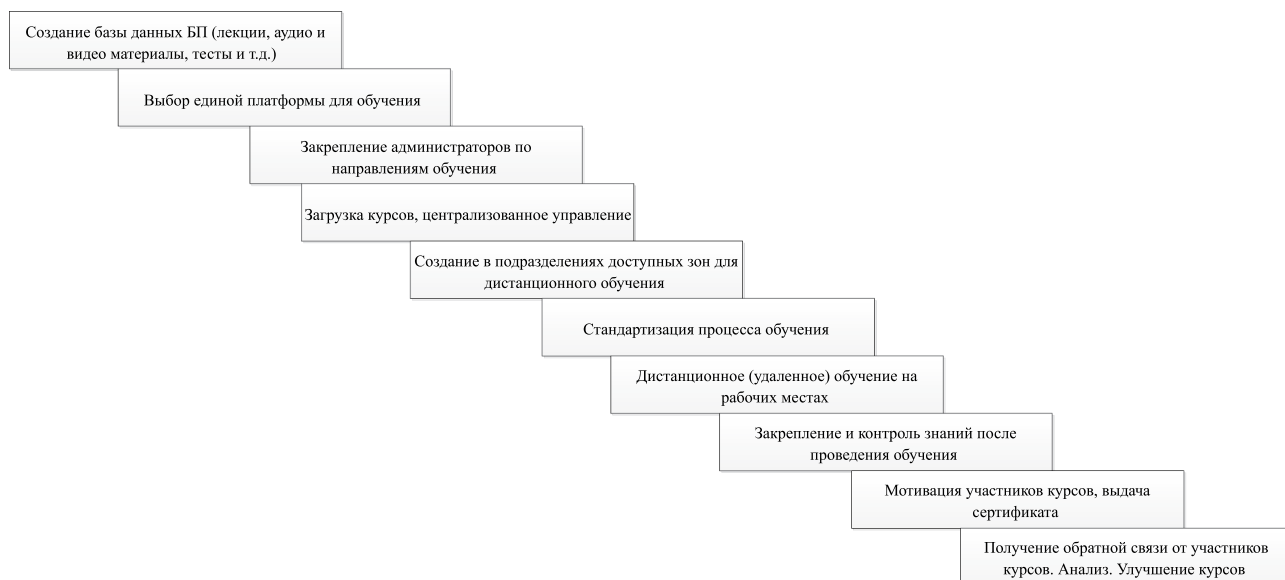


Рис. 8. Задачи проекта

(далее – УИТ); разработчики курса из отдела бережливого производства (далее – ОБП); представители отдела управления персоналом и руководители других подразделений.

Собравшись, рабочая группа выделила следующие укрупненные задачи проекта, представленные на рисунке 8.

Каждая задача была декомпозирована и разбита на более мелкие, которые вошли в базовый план проекта в виде отдельных мероприятий, на каждое из которых назначили ответственного исполнителя, установили сроки и результат [4].

Первично встал вопрос о выборе платформы для СДО. Среди претендентов были: iSpring, WebTutor, Teachbase, GetCourse и Moodle. Выбор единогласно лег на единую платформу для обучения, которой была выбрана модульная объектно-ориентированная динамическая учебная среда Moodle, объединяющая в себе все возможности для эффективной организации дистанционного обучения в рамках закрытого контура Обуховского завода. Основным преимуществом СДО Moodle является возможность ее бесплатного использования, при этом ее функциональность не уступает коммерческим аналогам. Также важным преимуществом СДО Moodle является то, что она распространяется в открытом исходном коде, данное решение позволяет адаптировать ее под специфику конкретных задач любого предприятия. Встроенные

в СДО Moodle инструменты и средства разработки позволяют снизить трудоемкость и стоимость разработки учебного контента.

СДО Moodle предоставляет огромные возможности в части обучения, мониторинга знаний, тестирования, аттестации и мотивации сотрудников. Пока участники рабочей группы с ОКСП и УИТ подготавливали инфраструктуру для СДО, сотрудники ОБП активно вели разработку материалов и в итоге создали базу данных по направлениям обучения БП (вводное, проектное, специальные). Для тестирования системы необходимо было определить новую схему работы с СДО, включающую работу с компетенциями сотрудников, администрирование системы, координацию работ и другое. Схема представлена на рисунке 9.



Рис. 9. Схема функционирования СДО



По определению системы работы возникла необходимость с обеспечением инфраструктуры (рабочие места, компьютеры, принтеры) подразделений для прохождения обучений. Если с офисными работниками проблем не возникло, поскольку у каждого есть компьютер, то для рабочих цехов необходимо было выделить место, где каждый в удобное время мог зайти в СДО и пройти обучение. Руководители производственных подразделений оперативно выполнили просьбу и создали рабочие места с СДО.

Курс вводного обучения БП был запущен в опытную эксплуатацию. Он состоял из лекционного материала (презентация), нормативных документов (ГОСТ, СТО, МИ), видеоматериалов, творческих задач в ходе презентации, промежуточного и финального контроля знаний (тестирование), возможности выдачи обратной связи и анкетирования. Один из слайдов представлен на рисунке 10.

Как в любом новом проекте, со стороны работников возникло множество вопросов и непониманий, которые оперативно решались рабочей группой. По мере накопления вопросов, создания реестра и их ранжирования рабочей группой была разработана детализированная инструкция по работе с СДО. Опытная эксплуатация завершилась

успешным прохождением вводного обучения 100 сотрудников Обуховского завода из разных подразделений и тестированием системы единовременной загрузки более 1000 человек. Было принято решение о переводе системы в промышленную эксплуатацию и наполнении СДО различными обучающими материалами. На сегодня в СДО содержится более 10 курсов по БП (представлено на рисунке 11), 3 курса по конструкторскому сопровождению производства, несколько курсов по 3D-моделированию, изучению офисных программ, презентационных материалов с форумов, выставок, конференций и конкурсов и другое.

В качестве дополнительной мотивации каждый сотрудник помимо полученных знаний после изучения всех материалов курса и успешного их прохождения получает именную сертификат с подписью разработчика курса и Генерального директора.

Основные результаты внедрения системы дистанционного обучения

Тщательное начальное планирование дорожной карты и оценка рисков дали значительное преимущество, и проект был реализован и завершен в установленные сроки и без ощутимых финансовых вложений.

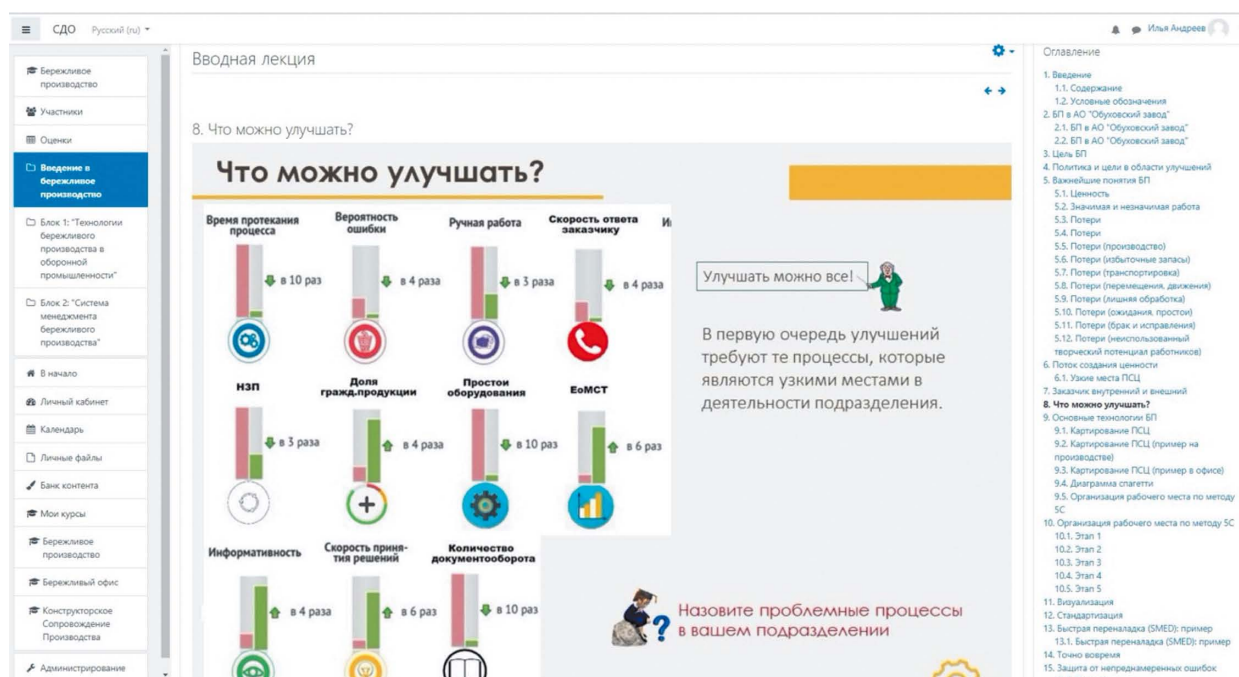


Рис. 10. Вводное обучение по БП в СДО

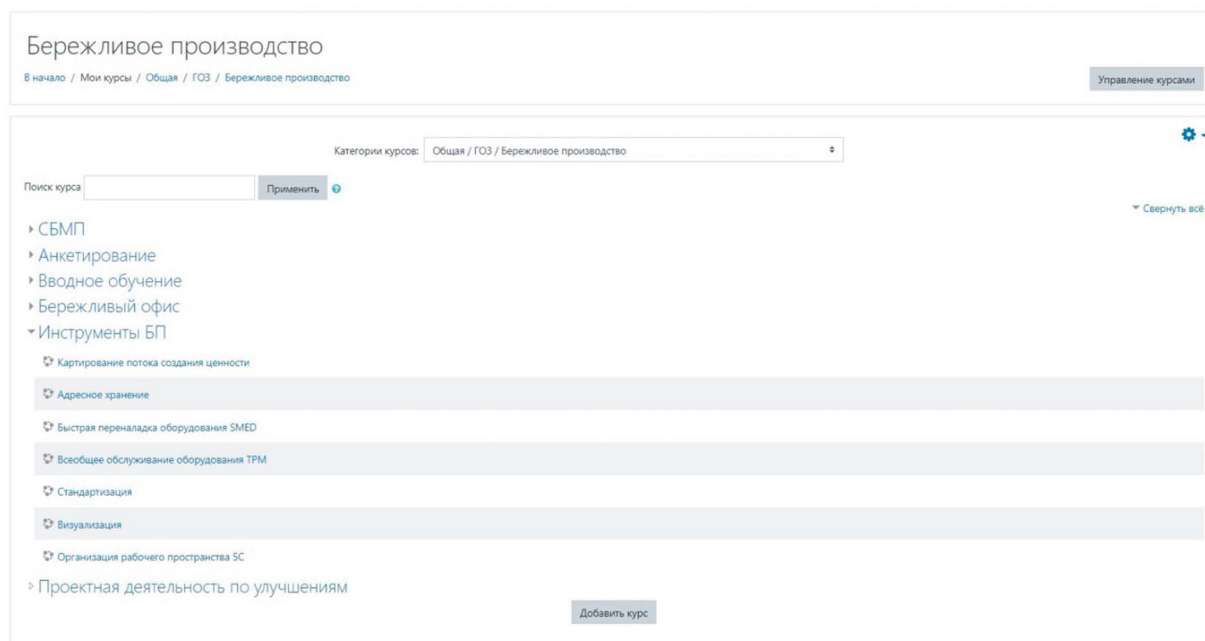


Рис. 11. Виды обучений по БП в СДО

В результате практически все потери в процессе вводного обучения по БП были устранены полностью, итог представлен в таблице 3.

Последний вид потерь, связанных с анализом ответов тестов и решений заданий, занимал много времени преподавателя, информация прорабатывалась вручную, далее с ней было сложно работать и собирать общую статистику для улучшения очного обучения и каждого конкретного курса. С помощью СДО появилась возможность работать с большим объемом информации (в несколько раз больше очного). Анализ ответов тестирований и анкетирование помогают улучшать программу каждого обучения и вносить в нее изменения, понимая тонкие и непонятные для аудитории места, а также совершенствовать СДО в целом.

Для оценки финансово-экономических эффектов от реализации мероприятий в области БП по проекту приняты данные с вводного обучения по БП. Финансово-экономический эффект, связанный с улучшением потока создания ценности, выравниванием потока и высвобождением трудовых ресурсов, возник прежде всего:

1) в результате исключения временных потерь на перемещение и ожидание сотрудников, так как обучение проводится на рабочих местах;

2) в результате сокращения временных затрат на обучение при внедрении

инновационного динамичного подхода к обучению и появлению у сотрудников возможности изучать материалы в удобном для них темпе;

3) в результате внедрения СДО предприятию удалось практически не прерывать процесс обучения в 2020 году, несмотря на карантинные меры и запрет массовых мероприятий.

Полученные данные демонстрируют положительную динамику сокращения временных потерь, возникающих при реализации вводного обучения БП с 2017 по 2021 год с учетом прогноза (табл. 4).

В 2019 году временные затраты на обучение основных производственных рабочих (ОПР) в количестве 695 человек составили 1737,5 часа, в 2021-м при численности большей чем в 2 раза – 1500 часов.

Исходя из представленных данных финансово-экономический результат при высвобождении трудовых ресурсов вычисляют по формуле [5]:

$$\Delta Z_{\text{тр}} = Z_{\text{тр}1} - Z_{\text{тр}2} = \sum_{i=1}^N ((T_{i1} - T_{i2}) \times C_i) \times K_{\text{ст}} \times A, \quad (1)$$

где $\Delta Z_{\text{тр}}$ – финансово-экономический результат при высвобождении трудоемкости, руб.;

$Z_{\text{тр}1}$, $Z_{\text{тр}2}$ – затраты на оплату труда производственных работников за рассматриваемый период времени до и после реализации мероприятий в области БП, руб.;



Таблица 3

Результат сокращения потерь по вводному обучению БП с внедрением СДО

Вид потерь	Ситуация до внедрения СДО	Фактическое исполнение	Эффект
Низкое усвоение информации обучаемыми	Трудоемкость обучения зависела от количества обучаемых; чем больше количество, тем ниже эффективность обучения. Оптимальный состав группы от 15 до 20 человек	Трудоемкость обучения не зависит от количества обучаемых, одновременно курс может проходить более 1000 сотрудников завода (ограничение СДО). Масштабирование курса на другие обучения по БП и другим специальностям	Удобство и эффективность в прохождении обучения всеми сотрудниками
Лишние перемещения и ожидания	Время на перемещение сотрудников на очное обучение в аудиторию и обратно в подразделение, а также ожидания около 1000 часов в год (общее), или 1,5 часа на каждого сотрудника	В каждом подразделении созданы места для прохождения дистанционного обучения. Временем на перемещение можно пренебречь (около 2–3 минут на каждого сотрудника)	Экономия в 2020 году составила 1500 часов, или 1,5 часа на каждого сотрудника
Отвлечение сотрудников от работы	Регламентированные даты прохождения обучения 2 раза в месяц (1-й и 3-й четверг) и время обучения (с 8:30 до 10:00). Около 2,5 часа (включая потери) тратил каждый сотрудник на вводное обучение	Выбор времени на прохождение курсов остается на усмотрение обучающихся и их руководителей, по проведенному анализу временной статистики – это до- и послеобеденное время, когда сотрудник выполнил основную работу. Минимальное отвлечение от работы. Ежедневное использование СДО в нерабочее время работниками завода	Сокращение на 90 % (2300 часов на 2020 год) потерь на отвлечение сотрудников от работы
Зависимость полученной на обучении информации от личности преподавателя	Разное преподнесение информации (в зависимости от квалификации, настроения и качеств лектора). Разность в понимании сотрудников и потери на повторное обучение около 30 % сотрудников, или (1000 часов на 2020 год)	Единое и детализированное получение информации всеми обучаемыми; при необходимости уточнения частных вопросов есть возможность обращения к создателю курса и получения пояснений в трудных материалах или вопросах. При необходимости можно пройти курс повторно	Сокращение около 30 % времени на повторное обучение (около 1000 часов на 2020 год)
Загрузка аудитории	Необходимость выделения аудитории под занятия	Высвобождение площадей под кабинеты сотрудников, ранее задействованных под аудиторию	Высвобождение 100 кв. м площадей под другие нужды. Экономия электроэнергии
Отсутствие базы знаний	Отсутствие единой базы знаний на всей площадке СЗРЦ по материалам обучений	Создана общая база знаний, где в настоящее время созданы разделы для всех предприятий, входящих в СЗРЦ	Сокращены потери на поиск нужной информации, дублирование обучений
Отсутствие мотивации на обучение у сотрудников	Низкий уровень мотивации у сотрудников на прохождение различных обучений очно, сопротивление изменениям	После изучения всех материалов курса и успешного прохождения теста выдается сертификат с подписью Генерального директора и возможность прохождения других курсов СДО	Потери устранены на 90 %, обучаемые с интересом проходят курсы
Обработка данных	Сложность для преподавателя работы с большим объемом данных по тестированию на бумаге после очных обучений (около 2 часов после каждого обучения). Потери времени на обработку информации около 50 часов в год	После прохождения сотрудниками контрольного теста все ответы на вопросы и результаты заносятся в базу данных, к которой имеют доступ учителя и администраторы, что позволяет осуществлять сбор статистики и контроль выполнения заданий	Сокращены потери преподавателя на 100 %, или около 50 часов в год, на анализ информации тестов



Таблица 4

Общегодовой результат сокращения потерь по вводному обучению БП

	Пе- риод	Числен- ность обучаемых	Временные затраты на вводное обучение по бережливому произ- водству (включая потери), час	Временные потери на перемещение и ожидание сотрудников, час
До реализации мероприятий в области БП	2017	356	890	534
	2018	512	1280	768
	2019	695	1737,5	1042,5
После реализации мероприятий в области БП	2020	986	1006	20
	2021	1500	1500	0

Таблица 5

Экономический эффект от сокращения потерь по вводному обучению БП

Период	Численность обучаемых	Реальный ожидаемый экономический эффект, руб.	Потенциальный экономический эффект, руб.
2020	986	327 776	5 086 760
2021	1500	498 645	7 681 007

T_{i1} , T_{i2} – общее число человеко-часов (нормо-часов) для i -го вида работы до и после реализации мероприятий в области БП, нормо-часов;
 C_i – стоимость одного человеко-часа (нормо-часов) i -го вида работы, необходимой для производства единицы продукции, до и после реализации мероприятий в области БП, руб./час;
 $K_{ст}$ – отчисления на страховые взносы, %;
 A – объем производства продукции в натуральных единицах за рассматриваемый период времени, шт.

Также необходимо оценить потенциальный рост прибыли от продаж при увеличении объемов производства за счет высвобожденных ресурсов.

Потенциальный финансово-экономический результат за счет увеличения объемов производства рассчитывается на основе:

1) данных о возможной производительности высвобожденных ресурсов в случае их максимальной загрузки (сокращение временных затрат на обучение ОНР в среднем – 760 часов);

2) цены продукции, которую можно производить с помощью высвобожденных ресурсов (стоимость 1 н/ч товарной продукции исходя из сведений о нормативах и экономических показателях для определения цен на товары, работы, услуги по ГОЗ на 2021 г.).

При данных условиях финансово-экономический результат рассчитывается по формуле [5]:

$$\Delta P_{гМ} = P \times Z, \quad (2)$$

где $\Delta P_{гМ}$ – потенциальное изменение прибыли от продаж за счет загрузки высвобожденных ресурсов новыми заказами, руб.;

P – максимальная производительность по новой продукции высвобожденных ресурсов, в натуральных единицах;

Z – цена продукции, потенциально производимой в рамках новых заказов, руб.;

ΔVC – общее изменение переменных затрат, руб. (в данном варианте неизменны).

Общий экономический эффект от реализации проекта по вводному обучению БП представлен в таблице 5.

Дальнейшее развитие системы на площадке Обуховского завода видится в развитии как других курсов БП, так и всеобщей системы корпоративных обучений, начиная с истории завода, которую изучают молодые специалисты, и заканчивая конструкторским и технологическим сопровождением производства, инструментами цифровизации, аддитивными технологиями, искусственным интеллектом и десятками других курсов завода и научно-образовательного центра. Загружая в СДО курс за курсом, предприятие избегает потерь и не останавливает обучающую деятельность, что очень важно в условиях пандемии и соблюдения режима изоляции, исключая массовые сборы. Прогноз экономического эффекта при внедрении других обучений представлен на рисунке 12.

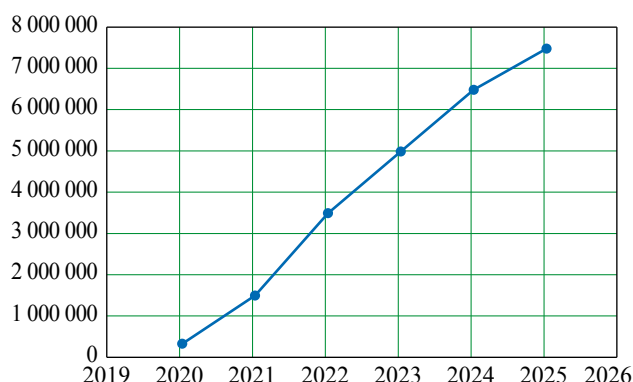


Рис. 12. Прогнозный экономический эффект при масштабировании СДО на другие обучения

Краткие выводы

Принципы БП доказывают свою эффективность не только в применении к стадиям жизненного цикла продукции, но и в развитии кадрового потенциала, что является решающим в эру цифровизации. Благодаря внедрению и развитию СДО удалось устранить множество потерь и в разы приумножить экономический эффект, представленный в статье. Отдел управления персоналом совместно с руководителями подразделений регулярно оценивает компетенции сотрудников, используя различные инструменты, например матрицу компетенций, и находят у работников слабые места или возможности для развития, направляя их на повышение квалификации. СДО делает эту систему более гибкой и удобной в анализе информации по компетенциям и пройденному материалу. Отчетность и результативность поступает в отдел управления персоналом, где проводится общая аналитика и ведется статистика. Сотрудники Обуховского завода ежедневно посещают платформу СДО, изучают лекции, нормативно-техническую базу,

отвечают на вопросы контрольных тестов, участвуют в анкетировании. СДО доступна в течение любого времени, что позволяет изучить новый или повторить уже пройденный материал, посетив при этом интересующий курс в базе знаний.

Для дальнейшего развития СДО планируется расширение спектра тематик, доступных для обучения, частичное привлечение к созданию курсов внешних обучающих организаций (вузов, лицеев и др.).

Список литературы

1. Андреев И. А. и др. Учебное пособие для руководителей и специалистов структурных подразделений организации. Бережливое производство. Базовый курс. СПб.: АО «Обуховский завод», 2019. 30 с.
2. Андреев И. А. Сокращение издержек предприятия оборонно-промышленного комплекса при вовлечении персонала в концепцию бережливого производства // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2019. № 3. С. 7–12.
3. Грей К. Ф., Ларсон Э. У. Управление проектами: Практическое руководство / Пер. с англ. – М.: Издательство «Дело и Сервис», 2007. 528 с.
4. ГОСТ Р 54869-2011 Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом. 2011. 11 с.
5. СТ ИС Концерн ВКО 02.2-125-2019. Система менеджмента бережливого производства и операционной эффективности. Оценка финансово-экономических эффектов от мероприятий в области бережливого производства. М.: АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», 2019. 61 с.

Об авторе

Андреев Илья Андреевич – аспирант научно-образовательного центра Общества с ограниченной ответственностью «СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей», заместитель начальника управления развития – начальник отдела организационного развития Акционерного общества «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Область научных интересов: организация производства, бережливое производство, технологическая и конструкторская подготовка производства.



Personnel training in the sphere of lean production as part of a distance learning system for a military-industrial company

Andreev I. A.^{1,2}

¹ *Scientific and Educational Centre, Almaz – Antey Northwestern Regional Centre, St. Petersburg, Russian Federation*

² *Obukhovsky plant of the Almaz – Antey Northwestern Regional Center, St. Petersburg, Russian Federation*

The article considers the application of methods and tools of lean production to reduce expenses when organizing personnel training at a military-industrial company, which are typically associated with commuting and day release, as well as in connection with the aggravated epidemiological situation.

Keywords: lean production, distance learning, distance learning system, epidemiological restrictions, industrial company, military-industrial complex, Obukhovsky plant, Northwestern Regional Centre.

Information about the author

Andreev Ilya Andreevich – Postgraduate Researcher, Scientific and Educational Centre, Almaz – Antey Northwestern Regional Centre, Deputy Head of the Development Department, Head of the Organizational Development Department, Obukhovsky plant of the Almaz – Antey Northwestern Regional Center, St. Petersburg, Russian Federation.

Research interests: organization of production, lean production, technological and design preparation of production.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-22-41>

УДК 621.396.96

Методы оценки и исследование зависимости точности целеуказания бортовому локатору ракеты от ошибок определения координат цели и ракеты наземным локатором

П. А. Созинов, Б. Н. Горевич

Акционерное общество «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», Москва, Российская Федерация

Показано наличие зависимости точности целеуказания бортовому локатору, выдаваемого наземной РЛС на основании измеряемых ею координат цели и ракеты, от относительного положения ракеты (относительно РЛС и цели).

Предложены методы, позволяющие имитационным и расчетным способами оценить точность целеуказания по углу наблюдения, дальности и скорости цели при известных ошибках измерения наземным локатором координат цели и ракеты с учетом относительного положения ракеты.

Исследовано влияние ошибок измерения координат цели и ракеты и относительного положения ракеты на точность целеуказания. Сформулирована задача поиска оптимальной траектории наведения ракеты на цель при совместном учете ошибок целеуказания бортовому локатору и других влияющих факторов.

Ключевые слова: радиолокационная станция (РЛС), зенитная управляемая ракета (ЗУР), бортовой локатор, ошибки определения координат

Для цитирования: Созинов П. А., Горевич Б. Н. Методы оценки и исследование зависимости точности целеуказания бортовому локатору ракеты от ошибок определения координат цели и ракеты наземным локатором // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 1. С. 22–41. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-22-41>

For citation: Sozinov P. A., Gorevich B. N. Dependence between the accuracy of target designation to an onboard missile radar station and errors related to determination of the target and missile coordinates by a ground radar system // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 1. P. 22–41. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-22-41>

Поступила 20.10.2020 Отрецензирована 18.11.2020 Одобрена 20.01.2021 Опубликована 17.02.2021

Введение. Постановка задачи

Общая характеристика проблемы. В настоящее время решается задача обновления системы зенитного ракетного вооружения войсковой ПВО. Возможные принципы построения и некоторые аспекты создания новой системы вооружения описаны в [1, 2]. Среди основных причин, требующих обновления вооружения, выделяются появление новых типов целей – баллистических ракет средней дальности (цели – боеголовки ракет), а также существенное усложнение фоно-целевой обстановки,

в которой должны функционировать образцы вооружения.

Для обеспечения поражения боеголовок ракет (представляющих собой высокоскоростные малоразмерные цели), в том числе за счет их кинетического перехвата в условиях применения мер противодействия (ложных целей и помех), к вооружению предъявляются высокие требования – прежде всего по точности наведения ЗУР и селекции цели бортовым локатором. Для выполнения этих требований, учитывая небольшой мидель ракеты, бортовой локатор должен работать в миллиметровом или оптическом диапазоне волн. При этом вследствие высокой динамики процесса

© Созинов П. А., Горевич Б. Н., 2021



перехвата и отсутствия времени на поиск цели локатор должен осуществлять гарантированный (беспоисковый) захват цели по угловым координатам, что достаточно проблематично ввиду узкого поля зрения в выбранном диапазоне волн. Кроме этого, с учетом возможности применения противником мер противодействия, бортовой радиолокатор должен обладать высокой селективностью по дальности и скорости (частоте Доплера), при этом точность целеуказания ему должна обеспечивать высокие требования по селективности.

В связи с повышением требований к создаваемому вооружению возникает ряд задач, которые ранее, при работе в более длинноволновых диапазонах и при меньшей степени противодействия противника, не имели столь большой значимости. К ним относятся:

- определение потребной точности координатной поддержки бортового локатора наземным локатором для обеспечения гарантированного захвата цели по углу и высокоточной селекции цели по дальности и скорости в условиях противодействия обнаружению цели;
- определение наличия и оценка степени зависимости точности целеуказания (ЦУ) от относительного положения ракеты (относительно РЛС и цели);
- определение предпочтительной (рациональной) траектории движения ЗУР при наличии зависимости точности ЦУ от относительного положения ракеты;
- обеспечение компромисса между ошибками целеуказания по углам, дальности и скорости в процессе наведения ракеты с учетом взаимной зависимости этих ошибок и др.

Постановка задачи. Рассматривается процесс наведения ЗУР на цель. На начальном этапе полета ракеты ее наведение осуществляется по данным наземной РЛС, сопровождающей ракету и цель, при этом для оценки местоположения ракеты возможно также использование данных бортовой инерциальной навигационной системы (БРИНС). При приближении ракеты к цели на некотором расстоянии от нее включается бортовой локатор. Дальность включения локатора определяется его потенциалом применительно к конкретной цели и условиями функционирования.

Определяющими условиями функционирования являются наличие радиоэлектронных помех и ложных целей. Бортовой локатор должен захватить цель на автосопровождение (АС) и осуществлять ее сопровождение в процессе дальнейшего высокоточного наведения на цель.

Для обеспечения захвата бортовым локатором цели на АС на основе измеренных наземным радиолокатором координат цели и ракеты вырабатывается информация целеуказания (с учетом данных БРИНС) в виде относительных координат цели (угловых координат, дальности и скорости), рассчитанных относительно текущего положения ракеты. *Точность целеуказания характеризуется ошибками оценок относительных координат цели (их среднеквадратичными отклонениями (СКО) от истинных значений).*

Далее показано, что относительные координаты цели определяются с ошибками, зависящими как от ошибок измерения координат цели и ракеты (с учетом данных БРИНС), так и от относительного положения ракеты.

При создании системы наведения ракеты для *гарантированного* захвата цели по угловым координатам и высокоточной селекции принимаемого локатором сигнала цели по дальности и скорости (частоте Доплера) необходимо оценивать степень зависимости точности ЦУ от относительного положения ракеты. В связи с этим ставится задача разработки методов и оценки точности целеуказания бортовому локатору в зависимости от ошибок оценки координат цели и ракеты наземным локатором и от относительного положения ракеты (относительно РЛС и цели).

Результаты таких исследований в конечном счете могут использоваться для определения рациональной траектории вывода ракеты в точку захвата цели.

1. Физический смысл ошибок целеуказания и расчет координат целеуказания

1.1. Физический смысл ошибок целеуказания

Для пояснения сущности задачи и содержания поставленных выше вопросов рассмотрим физический смысл ошибок целеуказания

бортовому локатору применительно к целеуказанию по углу и дальности в вертикальной плоскости. Поясняющая схема приведена на рисунке 1.

Вследствие наличия ошибок измерения наземным локатором угловых координат и дальности цели и ракеты, положения цели и ракеты относительно РЛС характеризуются эллипсами рассеивания оценок их координат (если быть точнее, что важно для последующих детальных исследований, – эллипсообразными дугами рассеивания). Соответственно, целеуказание локатору, формируемое на основе координат цели и ракеты, измеренных с ошибками, также имеет ошибку, обусловленную как ошибками измерения локатором координат

ракеты и цели, так и переносом точки отсчета координат цели из точки стояния РЛС в точку нахождения ракеты, и, в связи с этим, относительным положением ракеты.

Для наглядности демонстрации сущности ошибок целеуказания на рисунке 1 показаны два предельных случая местоположения ракеты при ее наведении навстречу цели: случай а) – когда ракета находится на линии «РЛС – цель», и случай в) – ракета находится на линии, ортогональной линии «РЛС – цель». Другие возможные варианты нахождения ракеты при наведении ее на приближающуюся цель лежат в основном между двумя указанными линиями. Для примера приведена точка б), характеризующая такой промежуточный вариант положения ракеты. Все три положения ЗУР показаны на рисунке 1 равноудаленными от цели, что будет использоваться в дальнейшем при оценке ошибок целеуказания локатору.

Ошибка целеуказания локатору по дальности статистически определяется разбросом расстояний между отдельными точками дуги рассеивания оценок координат ракеты и точками дуги рассеивания оценок координат цели, а ошибка целеуказания по углу – разбросом угловых направлений между точками дуг рассеивания относительно среднего.

Расстояния между отдельными точками дуг рассеивания на рисунке 1 показаны оранжевыми отрезками (они отражают возможные направления оси поля зрения локатора на момент начала захвата цели на АС). Ошибка ЦУ по дальности определяется разбросом длин этих отрезков, ошибка ЦУ по углу – разбросом их угловых направлений.

Как следует из рисунка, при одинаковой точности измерения координат ракеты и цели для случаев а) и в) ошибка ЦУ по дальности в случае а) будет меньше, чем в случае в), ввиду меньшего разброса расстояний между точками дуг рассеивания координат ракеты и цели. Напротив, ввиду растянутого по углу вида дуг рассеивания целеуказание по углу при нахождении ракеты в положении в) значительно точнее, чем в положении а) (ширина пучка оранжевых отрезков к цели из положения ракеты в) существенно меньше, чем из положения а)).

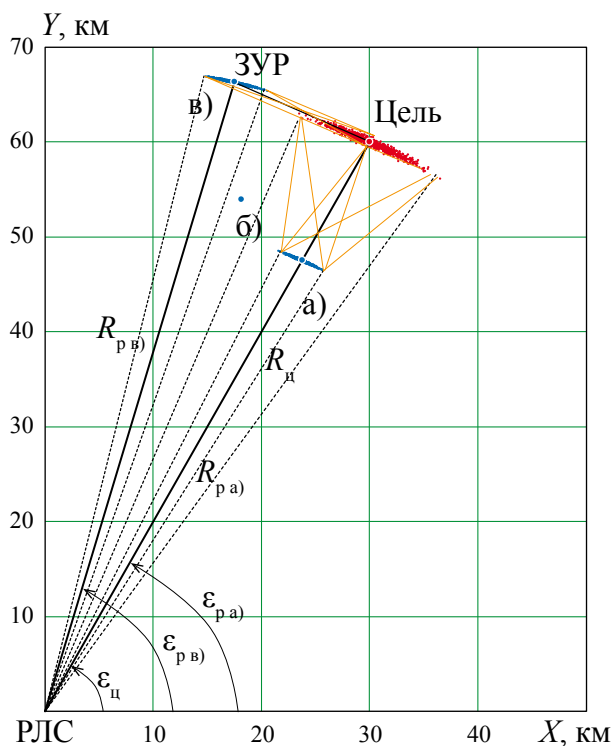


Рис. 1. Дуги рассеивания оценок координат ЗУР (синий цвет) и цели (красный цвет) и связи отдельных точек дуг рассеивания (оранжевый цвет). Показаны три положения ЗУР – а), б), в). Дуги рассеивания являются результатом статистического моделирования нормально распределенных координат цели и ракеты: количество модельных повторений $n_m = 1000$ при СКО оценок дальности и угла цели и ракеты соответственно: $\sigma_{R_{ц}} = 200$ м, $\sigma_{R_p} = 40$ м, $\sigma_{\epsilon_{ц}} = 2^\circ$, $\sigma_{\epsilon_p} = 0,8^\circ$. (Для наглядности СКО координат завышены по сравнению с реально возможными. СКО координат ракеты меньше СКО координат цели с учетом использования информации БрИНС.) Пунктирными линиями показаны границы угловых диапазонов $\pm 3\sigma_{\epsilon_{ц}}$, $\pm 3\sigma_{\epsilon_p}$ для цели и двух положений ракеты – а) и в)



Для других вариантов расположения ракеты и цели ошибки целеуказания бортовому локатору также будут зависеть как от ошибок измерения координат цели и ракеты, так и от относительного положения ракеты, при этом значения ошибки целеуказания по дальности и углу ориентировочно будут находиться в пределах, соответствующих рассмотренным на рисунке 1 случаям а) и в).

Приведенное описание физического смысла ошибок целеуказания с использованием двухмерной схемы, представленной на рисунке 1, справедливо и для трехмерного случая с использованием трехмерных дуг (эллипсоидов) рассеивания координат цели и ракеты. В трехмерном случае ошибки ЦУ также зависят как от ошибок измерения координат цели и ракеты, так и от относительного положения ракеты, и характер этой зависимости по каждому из углов и дальности аналогичен двухмерному случаю. В связи с этим далее рассматривается двухмерный случай.

1.2. Расчет координат целеуказания

Целеуказание бортовому локатору является результатом пересчета координат цели и ракеты из системы координат РЛС в систему координат ракеты. При этом ошибки целеуказания определяются видом эллипсов рассеивания координат цели и ракеты и их взаимной ориентацией.

В реализованных на практике системах наведения ракеты на цель для выработки

целеуказания осуществляется многократное преобразование координат. Наземная РЛС, как правило, измеряет координаты цели и ракеты в сферической или биконической системе координат, наведение ракеты осуществляется в скоростной системе координат, а бортовой локатор работает в собственной антенной системе координат [3]. Такая особенность выработки целеуказания определяется особенностями реализуемых способов физического измерения координат на борту ракеты.

Для исследования собственно сущности ошибок целеуказания рассмотрим простейший случай формирования целеуказания с пересчетом координат цели из сферической системы координат РЛС непосредственно в сферическую систему координат бортового локатора, считая этот способ формирования координат эквивалентным многократному преобразованию координат.

Схема связей координат РЛС, цели и ракеты на момент захвата цели на АС приведена на рисунке 2.

Положение всех объектов рассматривается в прямоугольной системе координат xOy с началом в точке O размещения РЛС.

РЛС измеряет сферические координаты цели и ракеты – их дальности $R_{ц}$, R_p , отсчитываемые от точки стояния РЛС, и углы места $\varepsilon_{ц}$, ε_p , отсчитываемые относительно оси Ox , направленной горизонтально. На их основе рассчитываются сферические координаты целеуказания: дальность ракета – цель $R_{p-ц}$,

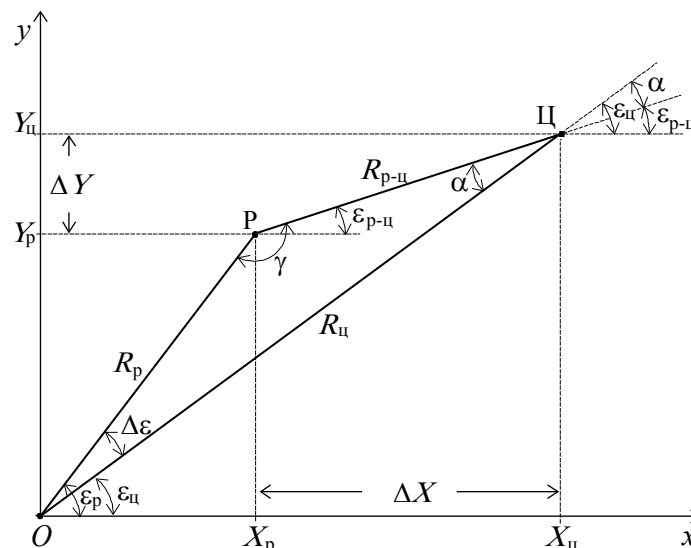


Рис. 2. Схема связей координат РЛС, цели и ракеты на момент захвата цели на АС



отсчитываемая от точки нахождения ракеты, и угол места ракета – цель $\varepsilon_{p-ц}$, отсчитываемый относительно горизонта.

Координаты цели и ракеты определяются с ошибками, которые характеризуются СКО соответствующих координат от своих истинных значений $\sigma_{R_{ц}}$, σ_{R_p} , $\sigma_{\varepsilon_{ц}}$, σ_{ε_p} . Заметим, что ошибки определения координат ракеты (СКО σ_{R_p} , σ_{ε_p}) могут быть существенно меньше ошибок определения координат цели (СКО $\sigma_{R_{ц}}$, $\sigma_{\varepsilon_{ц}}$) вследствие учета информации БРИНС, а также ввиду использования при локации ракеты активного ответа.

Таким образом, положение ракеты и цели характеризуется случайными векторами дальностей цели $R_{ц}$ и ракеты R_p с известными значениями СКО их сферических координат. Решаемая задача оценки точности целеуказания при этом состоит в оценке СКО сферических координат вектора целеуказания $R_{p-ц}$, который является разностью указанных векторов

$$R_{p-ц} = R_{ц} - R_p. \quad (1)$$

Сферические координаты вектора целеуказания $R_{p-ц}$ определяются по формулам

$$R_{p-ц} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} = \sqrt{R_{ц}^2 + R_p^2 - 2R_{ц}R_p \cos(\varepsilon_{ц} - \varepsilon_p)}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{p-ц} = \arcsin \frac{\Delta Y}{R_{p-ц}}, \quad (3)$$

где $\Delta X = X_{ц} - X_p$, $\Delta Y = Y_{ц} - Y_p$ – проекции разностей координат цели и ракеты на оси Ox , Oy ; $X_{ц} = R_{ц} \cos \varepsilon_{ц}$, $X_p = R_p \cos \varepsilon_p$, $Y_{ц} = R_{ц} \sin \varepsilon_{ц}$, $Y_p = R_p \sin \varepsilon_p$.

Учитывая, что локатор ракеты работает в сферической системе координат с началом в точке нахождения ЗУР, требуется на основе известных параметров $\sigma_{R_{ц}}$, σ_{R_p} , $\sigma_{\varepsilon_{ц}}$, σ_{ε_p} векторов $R_{ц}$ и R_p найти СКО сферических координат целеуказания $\sigma_{R_{p-ц}}$, $\sigma_{\varepsilon_{p-ц}}$.

Для выполнения дальнейших построений приведем также формулы вычисления некоторых промежуточных величин – углов, представленных на рисунке 2.

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_p - \varepsilon_{ц}, \alpha = \varepsilon_{ц} - \varepsilon_{p-ц}, \gamma = \pi - \Delta \varepsilon - \alpha, \quad (4)$$

и дальности ракеты, вычисляемой с учетом этих углов

$$R_p = \frac{R_{ц} \sin \alpha}{\sin \gamma}. \quad (5)$$

2. Методы оценки точности целеуказания

2.1. Оценка точности целеуказания

методом статистического моделирования

Метод заключается в многократном (общем случае n_m раз) выполнении на ЭВМ численных опытов, имитирующих определение (измерение) случайных координат цели и ракеты $R_{ц}$, R_p , $\varepsilon_{ц}$, ε_p с заданными законами распределения, вычисление в каждом опыте по формулам (2), (3) координат целеуказания, формировании таким образом выборки значений случайных величин $R_{p-ц}$, $\varepsilon_{p-ц}$ объема n_m и расчете на основе этой выборки известными методами математической статистики значений СКО $\sigma_{R_{p-ц}}$, $\sigma_{\varepsilon_{p-ц}}$.

Для анализа влияния на величину СКО $\sigma_{R_{p-ц}}$, $\sigma_{\varepsilon_{p-ц}}$ точности определения координат цели и ракеты и относительного положения ракеты, выполним практические расчеты с использованием метода статистического моделирования.

Положим, что оценки координат цели и ракеты, полученные локатором (для ракеты, в том числе с учетом данных БРИНС), распределены нормально и известны их математические ожидания $R_{ц}$, R_p , $\varepsilon_{ц}$, ε_p и СКО $\sigma_{R_{ц}}$, σ_{R_p} , $\sigma_{\varepsilon_{ц}}$, σ_{ε_p} . Рассмотрим случай положения цели, представленный на рисунке 1: $X_{ц} = 30$ км, $Y_{ц} = 60$ км, ($R_{ц} \approx 67,1$ км), $\varepsilon_{ц} = 63,4^\circ$.

Пусть точность оценки координат цели характеризуется величинами $\sigma_{R_{ц}} = 0,5$ м, $\sigma_{\varepsilon_{ц}} = 0,05^\circ$. Предположим, что захват локатором данной цели на АС (с учетом потенциала локатора) возможен на расстоянии $R_{p-ц} = 14$ км.

Рассмотрим (в соответствии с рисунком 1) три положения ракеты на момент получения целеуказания для захвата цели на АС на расстоянии 14 км:

а) Ракета находится на линии «РЛС – цель» ($\alpha = 0^\circ$):

$\varepsilon_p = \varepsilon_{ц}$, $\Delta \varepsilon = 0^\circ$, $R_p = R_{ц} - R_{p-ц} \approx 53,1$ км $\approx 0,8R_{ц}$, $X_p \approx 23,7$ км, $Y_p \approx 47,5$ км;

б) Ракета находится в промежуточном положении ($\alpha \approx 22,2^\circ$):

$\varepsilon_p \approx 69^\circ$, $\Delta \varepsilon \approx 5,58^\circ$, $R_p \approx 54,4$ км, $X_p \approx 19,5$ км, $Y_p \approx 50,7$ км;



Таблица 1

Результаты оценки точности целеуказания для различных вариантов исходных данных по ракете методом статистического моделирования при $n_m = 10\,000$

Точность оценки координат ЗУР	Положение ЗУР	Точность целеуказания	
		$\sigma_{R_{p-ц}}$, м	$\sigma_{\epsilon_{p-ц}}$, град
$\sigma_{R_p} = 0,5$ м, $\sigma_{\epsilon_p} = 0,05^\circ$	а)	0,759	0,3030
	б)	31,309	0,2807
	в)	83,390	0,0490
$\sigma_{R_p} = 0$ м, $\sigma_{\epsilon_p} = 0^\circ$	а)	0,517	0,2400
	б)	22,100	0,2212
	в)	58,380	0,0021

в) Ракета находится на линии, ортогональной линии «РЛС – цель» ($\alpha = 90^\circ$):
 $\epsilon_p \approx 75,2^\circ$, $\Delta\epsilon \approx 11,8^\circ$, $R_p \approx 68,5$ км, $X_p \approx 17,5$ км,
 $Y_p \approx 66,3$ км.

Для каждого положения ракеты используем два варианта точности оценки ее координат:

1) величины СКО оценок координат ракеты такие же, как для цели: $\sigma_{R_p} = 0,5$ м, $\sigma_{\epsilon_p} = 0,05^\circ$;

2) ошибки определения положения ракеты пренебрежимо малы, $\sigma_{R_p} = 0$ м, $\sigma_{\epsilon_p} = 0^\circ$.

Для обеспечения высокой точности оценок выполним большое количество численных опытов, равное $n_m = 10\,000$.

Результаты оценки точности целеуказания в соответствии с описанным выше методом статистического моделирования для различных вариантов исходных данных приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы, точность целеуказания существенно зависит как от ошибок оценки координат цели и ракеты, так и от относительного положения ракеты.

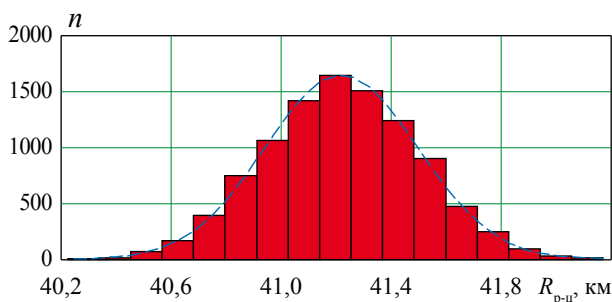
Расчеты подтвердили описанную выше физику ошибок целеуказания – СКО дальности

целеуказания $\sigma_{R_{p-ц}}$ растет по мере увеличения углов $\Delta\epsilon$, α , характеризующих относительное положение ракеты; СКО угла целеуказания $\sigma_{\epsilon_{p-ц}}$ при этом, напротив, уменьшается.

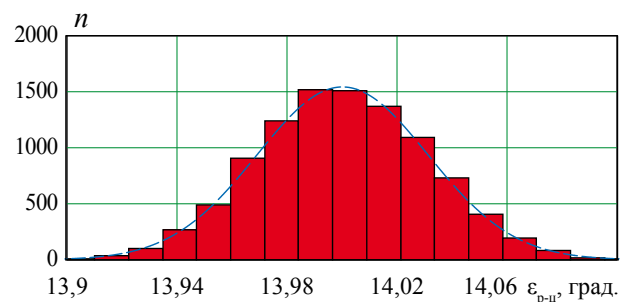
Моделирование показывает, что случайные координаты целеуказания $R_{p-ц}$, $\epsilon_{p-ц}$, рассчитанные по формулам (2), (3) на основе нормально распределенных координат ракеты и цели, имеют законы распределения близкие к нормальному. На рисунке 3 в качестве примера приведены гистограммы величин $R_{p-ц}$, $\epsilon_{p-ц}$ для промежуточного положения ЗУР (вариант б). Здесь же показаны графики плотности нормального распределения, имеющие такие же значения среднего и СКО, как и полученные гистограммы. Из рисунка видно хорошее согласование гистограмм с графиком плотности нормального закона распределения.

2.2. Аналитическая оценка точности целеуказания

Метод статистического моделирования является более точным по сравнению с методом аналитической оценки ошибок целеуказания (при достаточном количестве экспериментов), однако аналитический метод при приемлемой



а



б

Рис. 3. Гистограммы случайных величин $R_{p-ц}$, $\epsilon_{p-ц}$ для положения б) ракеты и графики плотности нормального распределения (штриховая линия). Расчеты выполнены для $\sigma_{R_p} = 0,5$ м, $\sigma_{\epsilon_p} = 0,05^\circ$, $n_m = 10\,000$



точности позволяет сократить время вычислений, а главное, он позволяет получить функциональные зависимости показателей точности целеуказания от ошибок измерения координат с учетом относительного положения ракеты.

Аналитическую оценку точности целеуказания построим на основе известного в теории вероятностей метода линеаризации функции случайных аргументов [4]. Метод не требует знания законов распределений аргументов. В соответствии с методом функцию случайных аргументов следует разложить в ряд Тейлора в области значений

математических ожиданий аргументов – второй член ряда определит дисперсию исходной функции. В случае если статистические и аналитические оценки дисперсии функции сильно расходятся, для повышения точности оценки рекомендуется дополнительно использовать третий член ряда [4].

В нашем случае линеаризации подлежат функции $R_{p-ц}$, $\varepsilon_{p-ц}$ (формулы (2), (3)) случайных аргументов $R_{ц}$, R_p , $\varepsilon_{ц}$, ε_p с известными СКО.

Согласно методу, дисперсия целеуказания по дальности $R_{p-ц}$ (формула (2)) в общем виде определяется формулой

$$\sigma_{R_{p-ц}}^2 = \left(\frac{\partial R_{p-ц}}{\partial R_{ц}} \right)^2 \sigma_{R_{ц}}^2 + \left(\frac{\partial R_{p-ц}}{\partial R_p} \right)^2 \sigma_{R_p}^2 + \left(\frac{\partial R_{p-ц}}{\partial \varepsilon_{ц}} \right)^2 \sigma_{\varepsilon_{ц}}^2 + \left(\frac{\partial R_{p-ц}}{\partial \varepsilon_p} \right)^2 \sigma_{\varepsilon_p}^2.$$

Выполняя дифференцирование и упрощая, получим в явном виде:

$$\sigma_{R_{p-ц}}^2 = \frac{(R_{ц} - R_p \cos(\Delta\varepsilon))^2 \sigma_{R_{ц}}^2 + (R_p - R_{ц} \cos(\Delta\varepsilon))^2 \sigma_{R_p}^2 + (R_{ц} R_p \sin(\Delta\varepsilon))^2 (\sigma_{\varepsilon_p}^2 + \sigma_{\varepsilon_{ц}}^2)}{R_{p-ц}^2}. \quad (6)$$

Аналогично: дисперсия целеуказания по углу $\varepsilon_{p-ц}$ (формула (3)) имеет общий вид:

$$\sigma_{\varepsilon_{p-ц}}^2 = \left(\frac{\partial \varepsilon_{p-ц}}{\partial R_{ц}} \right)^2 \sigma_{R_{ц}}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_{p-ц}}{\partial R_p} \right)^2 \sigma_{R_p}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_{p-ц}}{\partial \varepsilon_{ц}} \right)^2 \sigma_{\varepsilon_{ц}}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_{p-ц}}{\partial \varepsilon_p} \right)^2 \sigma_{\varepsilon_p}^2.$$

Дифференцируя, получаем в явном виде:

$$\sigma_{\varepsilon_{p-ц}}^2 = \frac{(R_p \sin(\Delta\varepsilon))^2 \sigma_{R_{ц}}^2}{R_{p-ц}^4} + \frac{(R_{ц} \sin(\Delta\varepsilon))^2 \sigma_{R_p}^2}{R_{p-ц}^4} + \left(\frac{R_{ц} \sin \varepsilon_{ц}}{\Delta Y} - \frac{R_{ц} R_p \Delta X \sin(\Delta\varepsilon)}{\Delta Y R_{p-ц}^2} \right)^2 \sigma_{\varepsilon_{ц}}^2 + \left(\frac{R_p (R_{p-ц}^2 \sin \varepsilon_p - R_{ц} \Delta X \sin(\Delta\varepsilon))}{\Delta Y R_{p-ц}^2} \right)^2 \sigma_{\varepsilon_p}^2. \quad (7)$$

С использованием полученных формул (6), (7) выполнены расчеты оценки точности углового целеуказания для исходных данных расчетов, выполненных в п. 2.1.

Результаты приведены в таблице 2. Здесь же приведены значения отклонений от результатов, полученных в п. 2.1 методом статистического моделирования.

Таблица 2

Результаты оценки точности целеуказания аналитическим методом для различных вариантов исходных данных по ракете

Точность оценки координат ЗУР	Положение ЗУР	Точность целеуказания			
		$\sigma_{R_{p-ц}}$, м	отклонение, %	$\sigma_{\varepsilon_{p-ц}}$, град	отклонение, %
$\sigma_{R_p} = 0,5$ м, $\sigma_{\varepsilon_p} = 0,05^\circ$	а)	0,707	-6,80	0,3050	0,78
	б)	31,310	0,003	0,2805	-0,07
	в)	82,780	-0,73	0,0500	0,24
$\sigma_{R_p} = 0$ м, $\sigma_{\varepsilon_p} = 0^\circ$	а)	0,500	-3,30	0,2390	-0,86
	б)	22,140	0,23	0,2218	0,26
	в)	58,540	0,27	0,0020	-0,66



Проведенные расчеты показывают хорошую согласованность статистического и аналитического моделирования, что позволяет считать метод линеаризации приемлемым для оценки точности целеуказания.

2.3. Вероятности селекции и захвата цели локатором

Вероятность селекции цели бортовым локатором по каждой из координат целеуказания определим на основе получаемых оценок СКО этих координат в предположении их нормального распределения (приемлемость предположения подтверждена выше результатами статистического моделирования).

Обозначим в общем случае X – случайную координату целеуказания (угловое направление цели $\varepsilon_{p-ц}$, ее дальность $R_{p-ц}$ или скорость $V_{p-ц}$). Известны математическое ожидание μ и СКО σ величины X (для координат $R_{p-ц}$ и $\varepsilon_{p-ц}$ математические ожидания определяются соответственно по формулам (2), (3), а СКО – одним из приведенных выше методов. Для скорости $V_{p-ц}$ формулы (14), (15) вычисления математического ожидания и СКО обоснованы ниже).

Вероятность попадания значений X в интервал $\mu \pm l$ (вероятность селекции цели в указанном диапазоне) определяется по формуле [4]:

$$P(|X - \mu| < l) = 2\Phi(l/\sigma), \quad (8)$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа.

Возможность гарантированной селекции цели и гарантированного захвата цели на АС будем оценивать с помощью критерия «3 σ »:

$$P(|X - \mu| < 3\sigma) > 0,9973.$$

Критерий «3 σ » позволяет определить минимальную ширину зоны селекции по координате X исходя из ошибок целеуказания: если ложные цели имеют параметры, выходящие из зоны $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$, то цель гарантированно выделяется.

Одновременно критерий «3 σ » определяет возможность беспойскового захвата цели: цель может быть гарантированно захвачена на АС по координате X без допояска, если величина зоны захвата перекрывает диапазон $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$.

Так, если поле зрения оптического локатора равно $\Delta\theta = 2^\circ$, то исходя из соотношения

$$3\sigma_{\varepsilon p-ц} < \Delta\theta/2, \quad (9)$$

величина СКО $\sigma_{\varepsilon p-ц}$ должна быть менее 1/3 град.

Условие (9) выполняется для всех представленных в таблицах 1 и 2 исходных данных по ракете, однако степень его выполнения существенно зависит от относительного положения ЗУР и от значений СКО $\sigma_{\varepsilon p-ц}$. Если ЗУР находится на линии РЛС – цель, то уже при незначительном увеличении ошибок измерения координат по сравнению с представленными в таблицах 1 и 2 РЛС не сможет обеспечить необходимую точность целеуказания для гарантированного захвата оптическим локатором цели по углу. Фактически же влияние опущенных в настоящем исследовании некоторых факторов, таких как, например, инструментальные ошибки углового ориентирования бортового локатора, может привести к невозможности гарантированного захвата цели.

Исследуем влияние относительного положения ракеты и ошибок оценки координат цели и ракеты на точность целеуказания.

3. Исследование угловой ошибки целеуказания

Исследование выполним аналитическим методом и методом статистического моделирования.

Для выяснения физики формирования ошибки целеуказания и ее зависимости от относительного положения ракеты рассмотрим вначале два введенных ранее крайних положения ракеты: ЗУР находится на линии РЛС – цель и ЗУР находится на нормали к этой линии и два случая: когда положение ракеты известно точно и когда положение ракеты определяется с ошибками.

3.1. ЗУР находится на линии РЛС – цель

Для случая, когда положение ракеты известно точно ($\sigma_{Rp} = 0$ м, $\sigma_{\varepsilon p} = 0^\circ$), с учетом того, что $\Delta\varepsilon = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$, из формулы (7) получаем выражение для величины ошибки углового целеуказания:

$$\sigma_{\varepsilon p-ц} = \frac{R_{ц}}{R_{p-ц}} \sigma_{\varepsilon ц}. \quad (10)$$

Полученная формула соответствует физическому смыслу угловой ошибки целеуказания, а именно (см. рис. 4а): длина дуги рассеивания координат цели в пределах угла наблюдения, ограниченного значениями $\pm\sigma_{\text{ец}}$, равна $2\sigma_{\text{ец}}R_{\text{ц}}$; бортовой локатор ракеты, находящейся на линии РЛС – цель на дальности от цели $R_{\text{р-ц}}$, получает координаты цели с угловыми ошибками целеуказания $\sigma_{\text{ер-ц}}$. Тогда справедливо равенство

$$2\sigma_{\text{ер-ц}}R_{\text{р-ц}} = 2\sigma_{\text{ец}}R_{\text{ц}},$$

откуда следует (10).

Из формулы (10) следует, что при нахождении ракеты на линии РЛС – цель ошибка углового целеуказания пропорциональна отношению дальностей до цели от РЛС и от ракеты. Чем ближе к цели бортовой локатор получает информацию целеуказания для захвата цели на АС по углу, тем меньше точность этой информации. И чем на большей дальности $R_{\text{ц}}$ осуществляется обстрел цели, тем меньше точность информации целеуказания. При этом также дополнительно нужно учитывать, что величина ошибки локатора $\sigma_{\text{ец}}$ в общем случае возрастает с увеличением дальности до цели $R_{\text{ц}}$ ввиду снижения отношения сигнал/шум на входе приемника РЛС.

Если бортовой локатор имеет малое поле зрения $\Delta\theta$, не позволяющее осуществить гарантированный захват цели, необходимо увеличить потенциал локатора и осуществлять захват с больших дальностей $R_{\text{р-ц}}$ и при меньших дальностях $R_{\text{ц}}$.

При оценке возможности гарантированного захвата в соответствии с критерием « 3σ » в формуле (10), соответственно, следует использовать значение $3\sigma_{\text{ец}}$.

На рисунке 5 приведены графики, рассчитанные по формуле (10), иллюстрирующие возможность гарантированного захвата цели по углу по критерию « 3σ » в зависимости от дальностей цели до РЛС $R_{\text{ц}}$ и до локатора $R_{\text{р-ц}}$.

Из рисунка следует, что если поле зрения оптического локатора равно $\Delta\theta = 2^\circ$, то исходя из соотношения (9) гарантированный захват цели, находящейся на расстоянии от локатора $R_{\text{ц}} = 70$ км, обеспечивается при расстоянии между локатором и целью $R_{\text{р-ц}}$ не менее 10 км (если позволяет потенциал локатора), а для $R_{\text{ц}} = 140$ км – при $R_{\text{р-ц}} > 20$ км.

Для случая, когда положение ракеты определяется с ошибками, из формулы (7) получаем следующее выражение для дисперсии угла целеуказания:

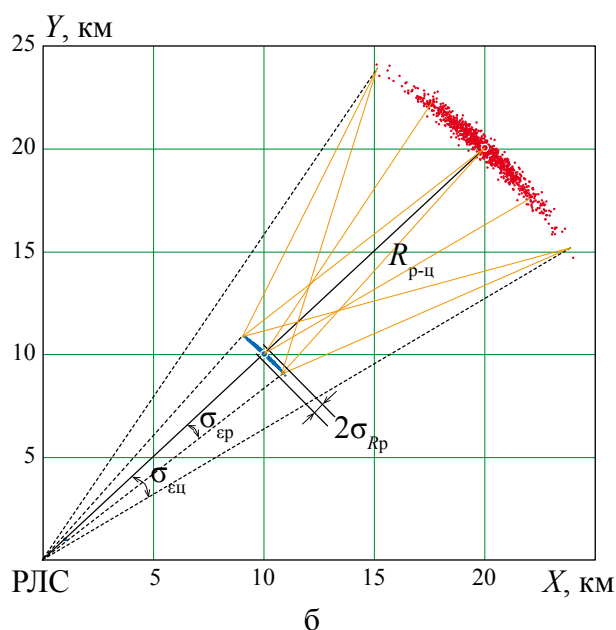
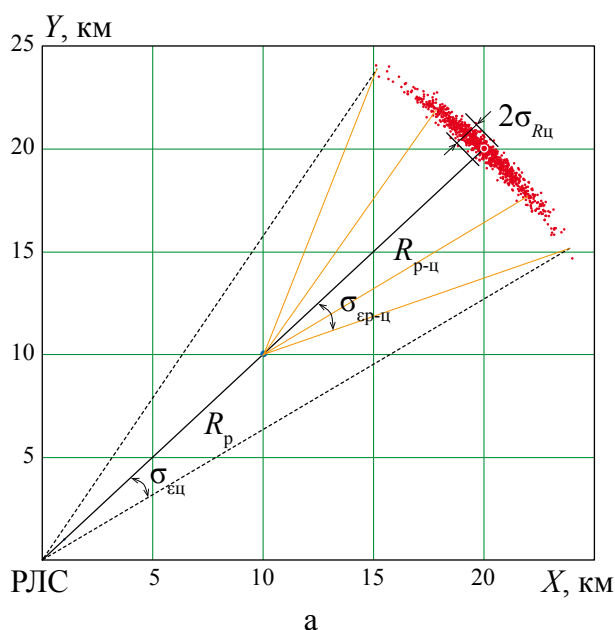


Рис. 4. Формирование угловой ошибки целеуказания при нахождении ракеты на линии РЛС – цель для случаев а) достоверно известного положения ракеты и б) когда положение ракеты известно с ошибками. Показаны дуги рассеивания оценок координат ракеты (синий цвет) и цели (красный цвет) и связи отдельных точек дуг рассеивания (оранжевый цвет)

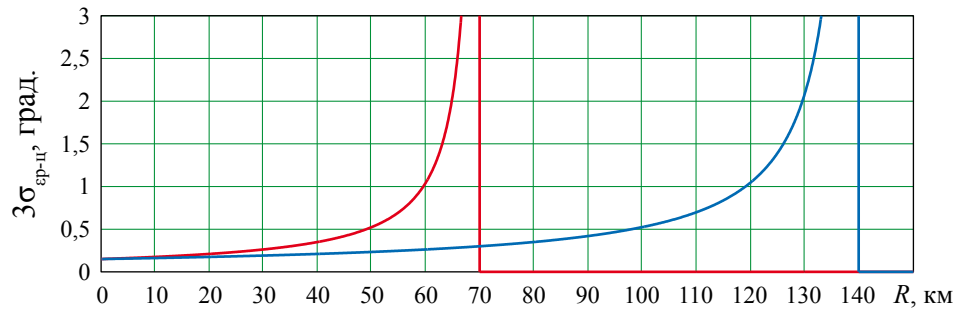


Рис. 5. Ошибки углового целеуказания при $\sigma_{\text{ер}} = 0^\circ$ для $\Delta\varepsilon = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$, $\sigma_{\text{ец}} = 3 \times 0,05^\circ$ и двух расстояний до цели: — $R_{\text{ц1}} = 70$ км и — $R_{\text{ц2}} = 140$ км

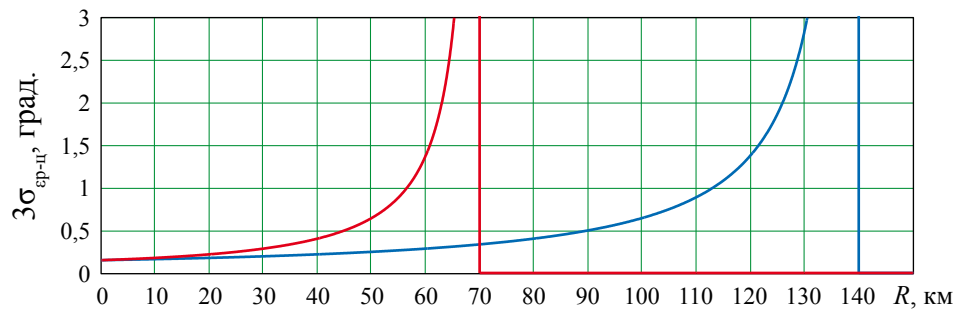


Рис. 6. Ошибки углового целеуказания при $\sigma_{\text{ер}} = 3 \times 0,05^\circ$ и прочих данных из рисунка 5

$$\sigma_{\text{ер-ц}}^2 = \left(\frac{R_{\text{ц}}}{R_{\text{р-ц}}} \right)^2 \sigma_{\text{ец}}^2 + \left(\frac{R_{\text{р}}}{R_{\text{р-ц}}} \right)^2 \sigma_{\text{ер}}^2. \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{ер-ц}} = \frac{\sigma_{R_{\text{ц}}}}{R_{\text{р-ц}}}. \quad (12)$$

Физический смысл полученной формулы поясняет рис. 4б). Фактически формула характеризует среднее угловое отклонение от направления на цель, отрезка, имеющего случайные положения своих концов, блуждающих в пределах дуг рассеивания координат цели и ракеты (реализации отрезка показаны оранжевым цветом).

Заметим, что формула (10) является частным случаем формулы (11).

На рисунке 6 приведены графики дальности гарантированного углового захвата цели на АС, рассчитанные в соответствии с (11) с использованием рассмотренных ранее исходных данных.

3.2. ЗУР находится на линии, ортогональной линии РЛС – цель

Для этого случая угол $\alpha = 90^\circ$, угол $\Delta\varepsilon$ и дальность ракеты $R_{\text{р}}$ определяются исходя из соотношений (4), (5).

Если положение ракеты известно точно ($\sigma_{R_{\text{р}}} = 0$ м, $\sigma_{\text{ер}} = 0^\circ$), из формулы (7) получаем величину ошибки углового целеуказания:

Физический смысл формулы (12) поясняет рисунок 7а: разброс измерений локатором дальности цели, характеризуемый величиной $\sigma_{R_{\text{ц}}}$, находится в секторе наблюдения локатора, равном $2\sigma_{\text{ер-ц}}R_{\text{р-ц}}$, то есть $2\sigma_{R_{\text{ц}}} = 2\sigma_{\text{ер-ц}}R_{\text{р-ц}}$. Отсюда следует формула (12).

Сравнивая формулы (10) и (12) для оценки ошибок углового целеуказания при разных относительных положениях ракеты, видим, что в силу того, что для локаторов всегда выполняется $\sigma_{\text{ец}}R_{\text{ц}} > \sigma_{R_{\text{ц}}}$ (угловое кросс-разрешение всегда хуже разрешения по дальности), при одном и том же расстоянии $R_{\text{р-ц}}$ целеуказание для ракеты, находящейся на линии РЛС – цель, всегда менее точно, чем целеуказание при нахождении ракеты на ортогональной линии.

Для случая, когда положение ракеты определяется с ошибками, из формулы (7) получаем выражение для дисперсии угла целеуказания:

$$\sigma_{\text{ер-ц}}^2 = \frac{\sigma_{R_{\text{ц}}}^2}{R_{\text{р-ц}}^2} + \left(\frac{\cos(\Delta\varepsilon)}{R_{\text{р-ц}}} \right)^2 \sigma_{R_{\text{р}}}^2 + \sigma_{\text{ер}}^2. \quad (13)$$

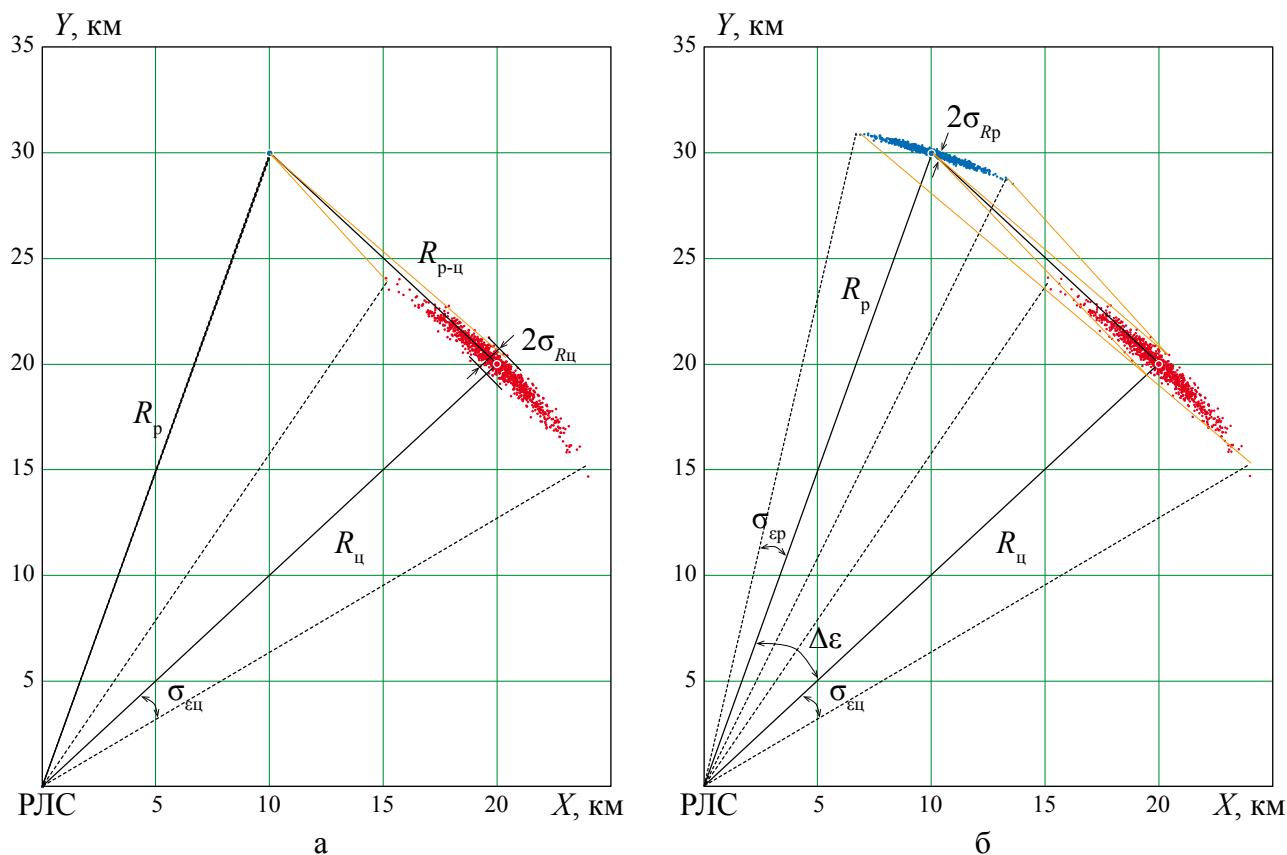


Рис. 7. Формирование угловой ошибки целеуказания при нахождении ракеты на линии, ортогональной линии РЛС – цель для случаев а) достоверно известного положения ракеты и б) когда положение ракеты известно с ошибками. Цвет дуг рассеивания оценок координат ракеты и цели соответствует рисунку 4

Вид полученной формулы определяется формой эллипсообразных дуг рассеивания оценок координат и их взаимной ориентацией. Физический смысл формулы поясняет рисунок 7б. Он такой же, как и раскрытый выше смысл формулы (11), с отличием в положении ракеты.

Формула (12) является частным случаем формулы (13).

Представляет интерес выявление характера изменения угловой ошибки целеуказания при различных промежуточных вариантах положения ракеты (между положением на линии РЛС – цель и на ортогональной линии), при изменении угла α в диапазоне от 0° до 90° и далее.

Расчеты по формуле (7), для случая, когда положение ракеты известно точно ($\sigma_{Rp} = 0$ м, $\sigma_{\epsilon p} = 0^\circ$), при последовательном изменении положения ракеты от нахождения на линии РЛС – цель ($\alpha = 0^\circ$) до нахождения на ортогональной линии ($\alpha = 90^\circ$) и далее (до значений $\alpha = 180^\circ$, соответствующих нахождению ракеты за целью относительно РЛС), при одном и том же

расстоянии между ракетой и целью $R_{p-ц}$, показывают, что ошибка углового целеуказания изменяется по закону косинуса, приобретая минимальное значение при $\alpha = 90^\circ$ и максимальное при $\alpha = 0^\circ$ и 180° (см. рис. 8).

Варьирование угла α для случая, когда положение ракеты определяется с ошибками ($\sigma_{Rp} \neq 0$ м, $\sigma_{\epsilon p} \neq 0^\circ$), при сохранении постоянным расстояния захвата $R_{p-ц}$, показывает, что ошибка углового целеуказания минимальна в районе значений $\alpha = 90^\circ$ (точнее, несколько меньше 90°) и максимальна при $\alpha = 0^\circ$ и 180° . Такая зависимость ошибки углового целеуказания определяется формой дуг рассеивания координат цели и ракеты и их взаимной ориентацией.

Наличие сильно выраженной зависимости ошибки углового целеуказания от относительного положения ракеты приводит к необходимости ставить и решать задачу определения наилучшей траектории ракеты, позволяющей в условиях ограниченного поля зрения локатора повысить вероятность захвата цели.

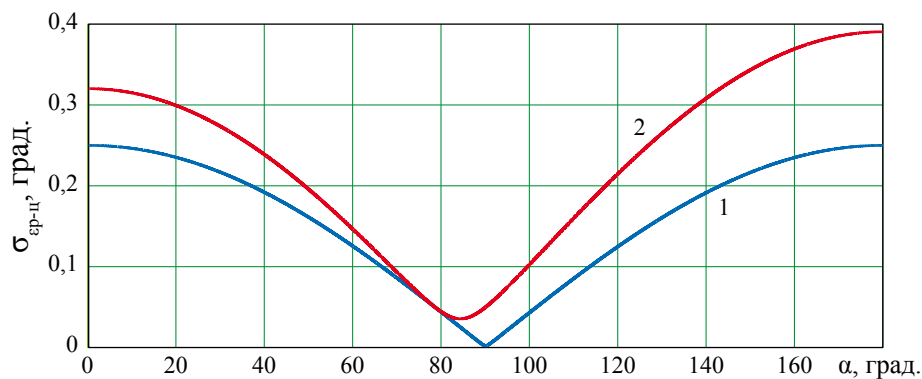


Рис. 8. Зависимость СКО углового целеуказания $\sigma_{\text{ер-ц}}$ от относительного положения ракеты (положение ракеты изменяется по окружности радиуса $R_{\text{р-ц}} = 14$ км вокруг цели) при $R_{\text{ц}} = 70$ км, $\sigma_{R_{\text{ц}}} = 0,5$ м, $\sigma_{\text{ец}} = 0,05^\circ$, для двух вариантов точности оценки координат ракеты: 1 – $\sigma_{R_{\text{р}}} = 0$ м, $\sigma_{\text{ер}} = 0^\circ$; 2 – $\sigma_{R_{\text{р}}} = 0,5$ м, $\sigma_{\text{ер}} = 0,05^\circ$

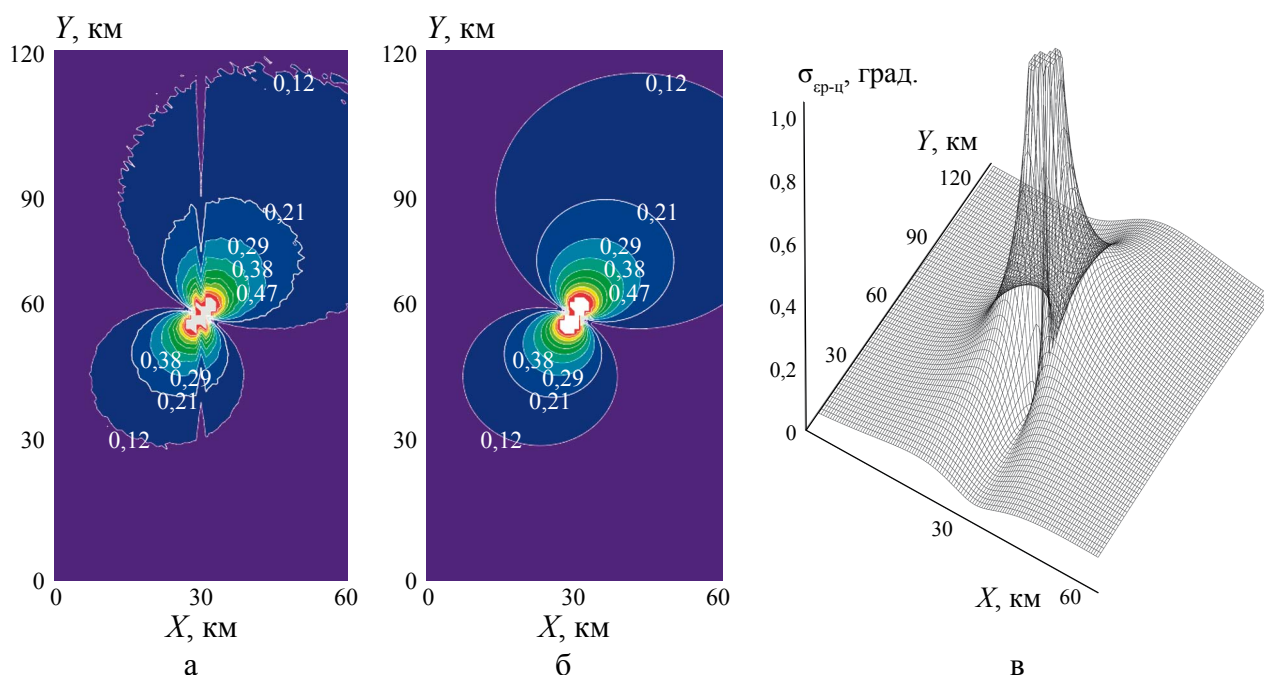


Рис. 9. Результаты вычисления СКО углового целеуказания (в градусах): а – статистическим методом, $n_{\text{м}} = 1000$; б – аналитическим методом. Исходные данные: $X_{\text{ц}} = 30$ км, $Y_{\text{ц}} = 60$ км, $\sigma_{R_{\text{р}}} = 0,5$ м, $\sigma_{\text{ер}} = 0,05^\circ$, $\sigma_{R_{\text{ц}}} = 0,5$ м, $\sigma_{\text{ец}} = 0,05^\circ$, рисунок в дает представление о трехмерном виде функции ошибок

3.3. Поле ошибок целеуказания по углу

С целью более полного представления зависимости ошибки углового целеуказания от положения ракеты выполним расчеты в широком диапазоне изменения координат ракеты при фиксированном положении цели.

Вычисления выполним двумя рассмотренными выше методами – статистическим и аналитическим (по формуле (7)).

Результаты расчетов в виде контурных карт поля угловых ошибок целеуказания в системе координат xOy РЛС для одного из вариантов положения цели представлены на рисунке 9.

Величина ошибки на рисунке характеризуется цветом – наименьшей ошибке соответствует фиолетовый цвет, наибольшей – красный; промежуточные цвета – от синих к красным соответствуют последовательному увеличению ошибки. Площадь, покрываемая одним цветом, характеризует определенный диапазон ошибок целеуказания.

Из рисунка следует, что положения ракеты, неблагоприятные для захвата цели по углу, при рассмотренных исходных данных сосредоточены в секторе приблизительно $\pm 30^\circ$ относительно линии, направленной от цели к РЛС.

На линии РЛС – цель угловая ошибка максимальна и возрастает по мере приближения ракеты к цели. Так, на расстоянии ~30 км до цели она составляет $\sigma_{\text{ер-ц}} \approx 0,12^\circ$, на расстоянии ~15 км $\sigma_{\text{ер-ц}} \approx 0,21^\circ$, на расстоянии ~5 км $\sigma_{\text{ер-ц}} \approx 0,38^\circ$.

Расчеты, выполненные статистическим и аналитическим методами, имеют хорошую согласованность, что позволяет отдать предпочтение аналитическому методу ввиду меньших затрат времени и большей наглядности.

4. Исследование ошибки целеуказания по дальности

Ввиду подобия данного исследования выполненному выше исследованию угловой ошибки целеуказания приведем сразу конечные результаты.

1. Случай, когда ЗУР находится на линии РЛС – цель ($\Delta\epsilon = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$).

Если положение ракеты известно точно ($\sigma_{R_p} = 0$ м, $\sigma_{\text{ер}} = 0^\circ$), то из формулы (6) получаем выражение для величины ошибки целеуказания:

$$\sigma_{R_p-\text{ц}} = \sigma_{R_{\text{ц}}}.$$

Если положение ракеты определяется с ошибками, то из формулы (6) получаем

$$\sigma_{R_p-\text{ц}}^2 = \sigma_{R_p}^2 + \sigma_{R_{\text{ц}}}^2.$$

Приведенные формулы имеют вполне понятный из рисунка 4 физический смысл.

2. Случай, когда ЗУР находится на линии, ортогональной линии РЛС – цель ($\alpha = 90^\circ$).

Если положение ракеты известно точно ($\sigma_{R_p} = 0$ м, $\sigma_{\text{ер}} = 0^\circ$), то из формулы (6) получаем:

$$\sigma_{R_p-\text{ц}} = R_{\text{ц}} \sigma_{\text{ец}}.$$

Если положение ракеты определяется с ошибками, то из формулы (6) получаем

$$\sigma_{R_p-\text{ц}}^2 = \sigma_{R_p}^2 \sin(\Delta\epsilon)^2 + R_{\text{ц}}^2 (\sigma_{R_{\text{ц}}}^2 + \sigma_{R_p}^2).$$

Физический смысл формулы может быть понят из рисунка 7.

Поле ошибок целеуказания по дальности построим для тех же исходных данных, какие использовались при построении приведенного выше (на рис. 9) поля ошибок целеуказания по углу. Результаты приведены на рисунке 10.

Как видно из рисунка, минимальная ошибка целеуказания по дальности для выбранных исходных данных обеспечивается при положении ракеты в узком секторе приблизительно $\pm 5^\circ$ относительно линии, направленной от цели к РЛС. Вне этого сектора ошибка резко возрастает.

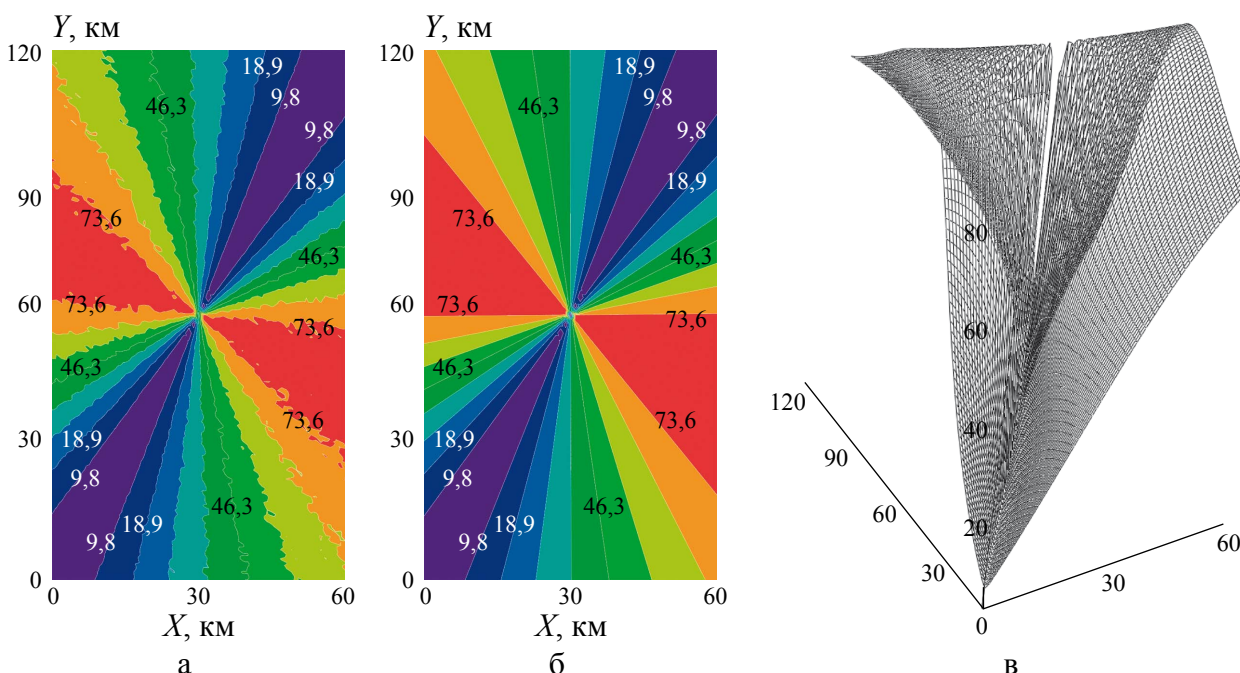


Рис. 10. Результаты вычисления СКО целеуказания по дальности (в метрах), в – трехмерный вид функции ошибок



В противоположность ошибке целеуказания по углу, максимальная ошибка целеуказания по дальности имеется при нахождении ракеты вблизи линии, ортогональной линии РЛС – цель.

По результатам исследования полей ошибок целеуказания по углу и дальности можно сделать следующие выводы:

1. Ошибки целеуказания для равноудаленных от цели точек нахождения ракеты существенно зависят от относительного положения ракеты. Характер этой зависимости для угла и для дальности диаметрально противоположен: при нахождении ракеты на линии РЛС – цель ($\epsilon_p = \epsilon_{ц}$) ошибка ЦУ по дальности минимальна, а угловая ошибка ЦУ максимальна; при нахождении ракеты вблизи направления на цель, ортогонального линии РЛС – цель, ошибка ЦУ по дальности максимальна, а угловая ошибка ЦУ минимальна. Причины этих свойств полей ошибок определяются формой дуг рассеивания оценок координат цели и ракеты.

2. По мере приближения к цели угловые ошибки целеуказания растут (особенно резко вблизи цели) за исключением направления, близкого к линии, ортогональной направлению РЛС – цель, где ошибка минимальна и изменяется незначительно. Из этого следует необходимость повышения потенциала бортового локатора для обеспечения возможности гарантированного захвата цели по угловым координатам на больших дальностях.

5. Определение ошибки целеуказания по скорости

Целеуказание по скорости цели (по частоте Доплера) так же, как и целеуказание по дальности и углу, является относительным, оно представляет собой скорость цели, рассчитываемую по данным измерений координат цели и ракеты относительно текущего положения ракеты. Соотношение векторов скорости ракеты и цели (V_p и $V_{ц}$) на момент захвата цели показано на рисунке 11. Разность проекций этих векторов на линию ракета – цель и представляет собой целеуказание по скорости $V_{p-ц} = V_{p,пр} - V_{ц,пр}$.

РЛС измеряет радиальные скорости ракеты и цели ($V_{p,РЛС}$ и $V_{ц,РЛС}$) по доплеровским добавкам частот принимаемых сигналов, однако на их основе нельзя определить значения проекций скоростей $V_{p,пр}$, $V_{ц,пр}$. В связи с этим используем траекторный метод расчета скорости цели $V_{p-ц}$: относительная скорость ракеты на интервале времени Δt оценивается по формуле

$$V_{p-ц}(t) = \frac{R_{p-ц}(t) - R_{p-ц}(t - \Delta t)}{\Delta t}, \quad (14)$$

где $R_{p-ц}(t)$ и $R_{p-ц}(t - \Delta t)$ – значения относительной дальности в соответствующие моменты времени, рассчитываемые по формуле (2) по результатам измерения координат цели и ракеты.

Величины $R_{p-ц}(t)$ и $R_{p-ц}(t - \Delta t)$ представляют собой независимые случайные величины

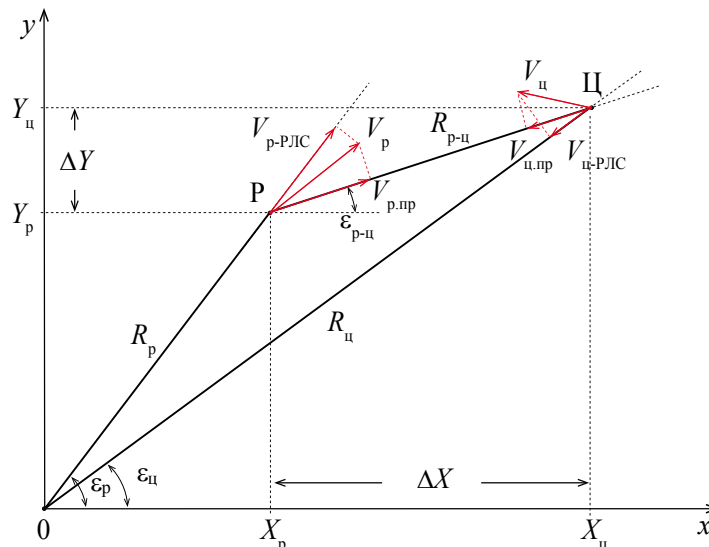


Рис. 11. Соотношение векторов скорости ракеты и цели на момент захвата

с дисперсиями соответственно $(\sigma_{R_{p-c}}(t))^2$ и $(\sigma_{R_{p-c}}(t - \Delta t))^2$, определяемыми по формуле (6).

Исходя из свойств дисперсии для независимых случайных величин, получаем дисперсию оценки относительной скорости цели [5, с. 333]:

$$(\sigma_{V_{p-c}}(t))^2 = \frac{(\sigma_{R_{p-c}}(t))^2 + (\sigma_{R_{p-c}}(t - \Delta t))^2}{\Delta t^2}. \quad (15)$$

Из полученной формулы следует, что зависимость ошибки целеуказания по скорости от положения ракеты такая же, как рассмотренная выше зависимость ошибки целеуказания по дальности: для принятых исходных данных в рассмотренных выше примерах ошибка целеуказания по скорости минимальна на линии РЛС – цель и принимает максимальные значения вблизи линии, ортогональной линии РЛС – цель.

6. Исследование ошибок целеуказания в зависимости от траектории полета ракеты

Все расчеты и выводы, представленные выше, получены для фиксированных положений ракеты и цели. Рассмотрим влияние на ошибки целеуказания фактора движения. Исследуем ошибки целеуказания локатору

вдоль траектории движущейся ракеты при ее наведении на цель, в качестве которой рассмотрим баллистическую цель, падающую в районе РЛС.

Выбраны следующие траекторные параметры цели (см. рис. 12): цель падает по навесной траектории и на момент пуска по ней ракеты имеет координаты $X_c = 60$ км, $Y_c = 120$ км и скорость 3000 м/с. При дальнейшем движении скорость цели снижается с ускорением $-2g$ (имитация атмосферного торможения); на момент встречи с ракетой она составляет 2420–2430 м/с (в зависимости от точки встречи).

Ракета стартует вертикально. Скорость движения ракеты задается переменной – имитируется работа разгонного двигателя и последующее движение с торможением (из-за действия сил гравитации и сопротивления воздуха). График скорости приведен на рисунке 13. Траектория ракеты, наводящейся на цель, строится с использованием метода пропорциональной навигации. Вид траектории ракеты определяется коэффициентом пропорциональности метода. На рисунке 12 приведены три траектории полета ракеты, соответствующие разным коэффициентам метода.

Перехват цели происходит в интервале времени 28,6–29 с (в зависимости от траектории

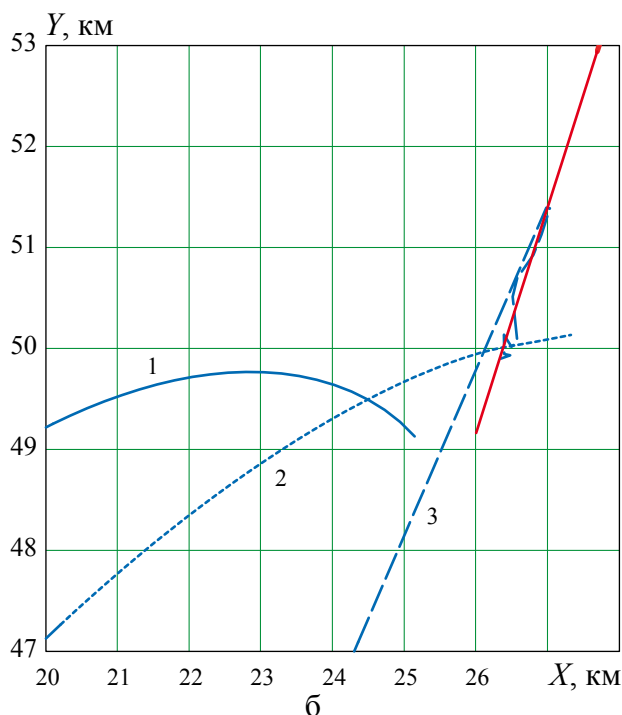
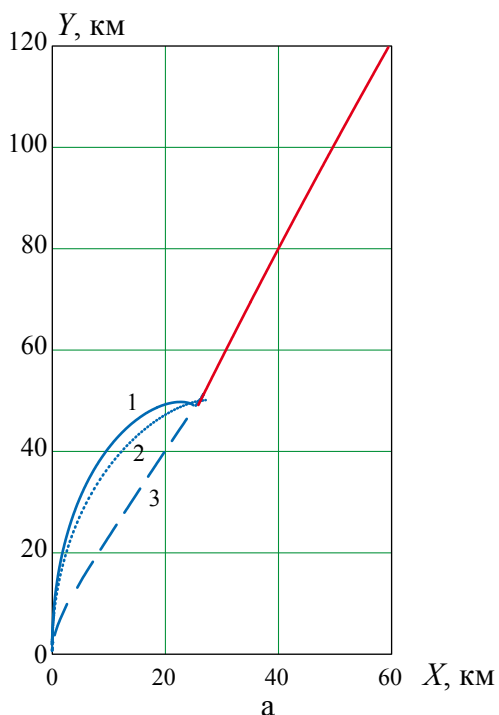


Рис. 12. а – траектория баллистической цели (красный цвет) и три траектории ракеты (синий цвет), б – траектории в точке встречи



наведения). При этом средняя скорость ракеты за время полета в точку встречи составляет $\sim 2,1$ км/с.

Для каждой траектории ракеты рассчитаем ошибки целеуказания по углу, дальности и скорости. При этом с учетом хорошей согласованности результатов статистического и аналитического методов оценки ошибок целеуказания ошибки оценим аналитическим методом (с использованием формул (6), (7), (15)).

Вначале выполним расчеты в предположении постоянных значений ошибок оценки координат цели в течение всего времени ее полета, независимо от дальности до цели.

СКО оценок координат цели примем равными $\sigma_{Rц} = 0,5$ м, $\sigma_{\epsilonц} = 0,05^\circ$. Ошибки определения координат ракеты примем на порядок меньшими: $\sigma_{Rp} = 0,05$ м, $\sigma_{\epsilon p} = 0,005^\circ$.

Результаты расчетов ошибок целеуказания в зависимости от текущих значений расстояний между целью и ракетой приведены на рисунке 14.

Расчеты выполнены путем численного интегрирования уравнений наведения ракеты с шагом 0,1 с, что можно интерпретировать как работу контура наведения и обновление информации по цели и ракете с частотой 10 Гц. Уменьшение периода интегрирования не приводит к видимому изменению результатов, за исключением величины ошибки целеуказания по скорости – она изменяется обратно пропорционально периоду интегрирования согласно зависимости (15).

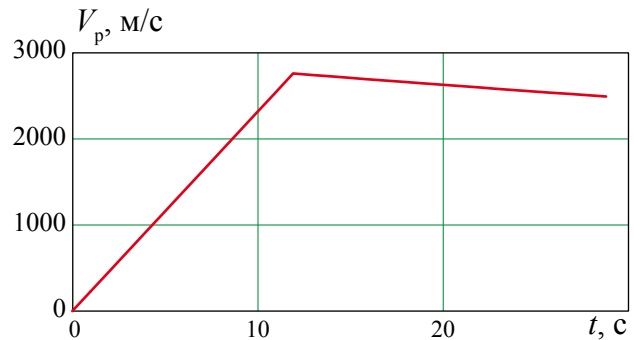


Рис. 13. График скорости ракеты

Как следует из полученных графиков (рис. 14), для принятых исходных данных движение ракеты по траектории, близкой к линии РЛС – цель (траектория 3), обеспечивает весьма низкие ошибки целеуказания по дальности и скорости в течение всего полета ракеты, что гарантирует высокоточную селекцию цели по этим координатам. При отклонении ракеты от линии РЛС – цель (траектории 1, 2) ошибки целеуказания по дальности и скорости становятся существенно больше и растут по мере приближения к цели, что обусловлено прохождением траектории ракеты вблизи линии, ортогональной линии РЛС – цель.

Ошибки целеуказания по углу менее зависят от траектории ракеты, но существенно зависят от расстояния до цели, в связи с чем величина потенциала локатора должна быть такова, чтобы обеспечивался захват цели на АС по углу на дальностях, согласованных с шириной поля зрения локатора для беспойскового захвата.

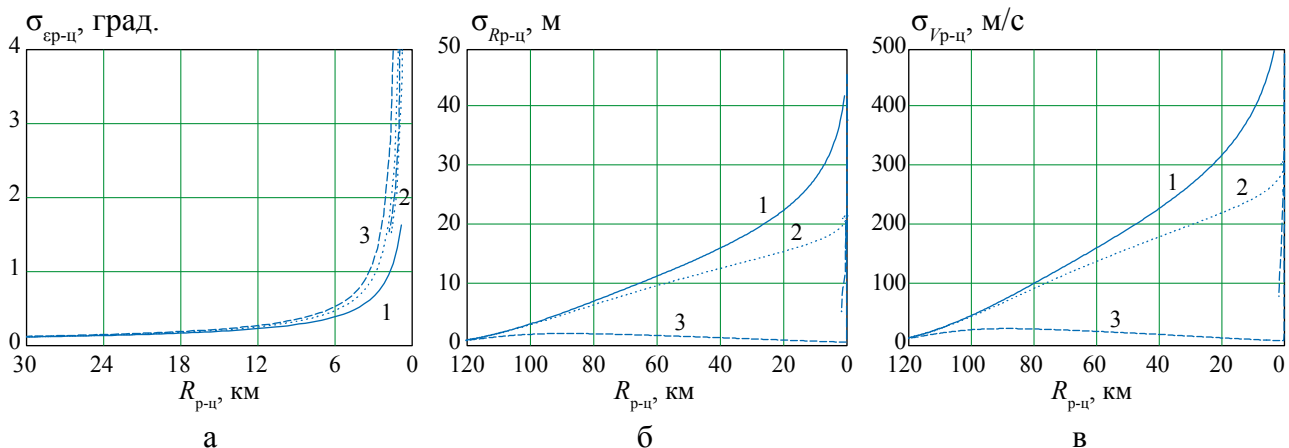


Рис. 14. Графики ошибок ЦУ в зависимости от расстояния между целью и ракетой для трех траекторий полета ракеты, приведенных на рис. 12, при постоянных значениях ошибок оценок координат $\sigma_{Rц} = 0,5$ м, $\sigma_{\epsilonц} = 0,05^\circ$, $\sigma_{Rp} = 0,05$ м, $\sigma_{\epsilon p} = 0,005^\circ$

Далее учтем, что по мере приближения цели к РЛС точность определения координат цели увеличивается за счет увеличения отношения сигнал/шум на входе приемника РЛС.

Известно [6], что величина СКО оценок координат обратно пропорциональна корню квадратному из отношения сигнал/шум на входе приемника РЛС. В свою очередь, при активной радиолокации величина сигнал/шум при прочих равных величинах (мощности сигнала, его длительности, размере апертуры антенны, коэффициенте шума приемника и др.) обратно пропорциональна дальности до цели в четвертой степени $R_{ц}^4$. Вследствие этого при изменении дальности цели СКО оценок ее координат изменяется пропорционально отношению квадратов дальностей.

В связи с этим при оценке точности координат приближающейся к РЛС цели для величин СКО $\sigma_{R_{ц}}$, $\sigma_{\varepsilon_{ц}}$ будем использовать множитель $k_{цR} = (R_{ц,оп}/R_{ц})^2$, где $R_{ц,оп}$ – опорная дальность, в качестве которой принимается дальность захвата РЛС цели на АС, $R_{ц}$ – текущая дальность цели, $R_{ц} \leq R_{ц,оп}$.

Графики ошибок целеуказания в зависимости от текущих значений расстояний между целью и ракетой, полученные с учетом уменьшения СКО оценок координат цели по мере приближения цели (пропорционально множителю $k_{цR}$), приведены на рисунке 15. При расчетах было принято, что при нахождении цели в начальной точке (на момент пуска по ней ракеты) значения СКО оценок ее координат равны $\sigma_{R_{ц}} = 2,85$ м, $\sigma_{\varepsilon_{ц}} = 0,285^\circ$. В точке встречи

ракеты с целью эти СКО за счет уменьшения дальности до цели снижаются до величин $\sigma_{R_{ц}} \approx 0,5$ м, $\sigma_{\varepsilon_{ц}} \approx 0,05^\circ$. СКО оценок координат ракеты приняты постоянными и равными $\sigma_{R_p} = 0,05$ м, $\sigma_{\varepsilon_p} = 0,005^\circ$.

Из полученных графиков видно, что соотношение ошибок целеуказания сохранилось, как и в рассмотренном ранее случае независимости ошибок оценки координат цели от дальности до нее. При этом ошибки целеуказания на больших дальностях увеличились из-за увеличения ошибок оценки координат цели ввиду малого отношения сигнал/шум.

Проведенные исследования показали существенную зависимость ошибок целеуказания от вида траектории ракеты, движущейся к цели. Это обстоятельство должно учитываться при оптимизации траектории ракеты, выводимой к цели с минимальным промахом. К наиболее значимым факторам, определяющим выбор вида траектории, наряду с рассматриваемыми ошибками целеуказания, относятся динамические и флуктационные ошибки наведения, обусловленные особенностями работы контура наведения ракеты, а также действие силы сопротивления воздуха при прохождении ракетой плотных слоев атмосферы на большой скорости.

Влияние различных факторов на выбор вида траектории ракеты в большинстве случаев находится в противоречии с влиянием ошибок целеуказания. Так, например, для снижения динамических ошибок наведения ракеты необходимо увеличивать частоту обновления

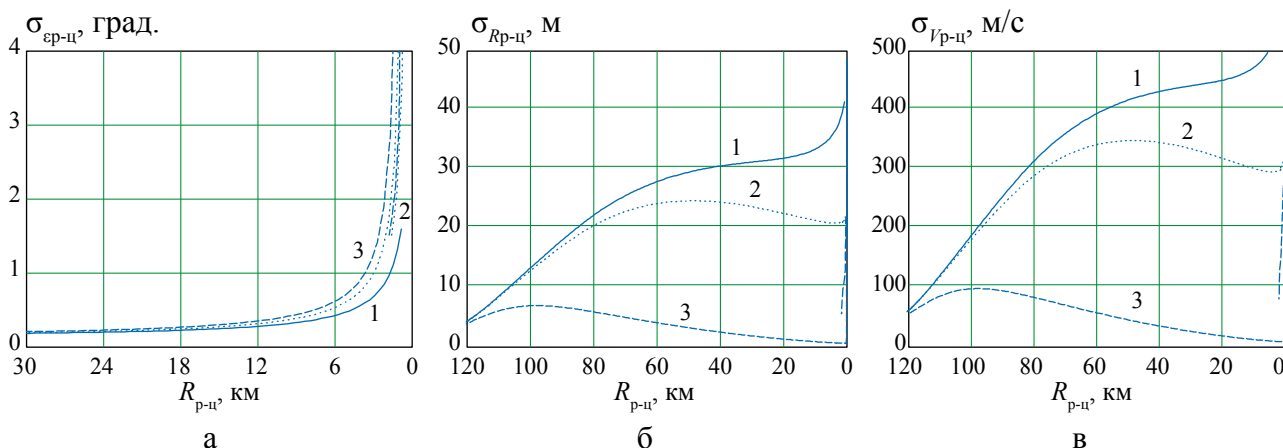


Рис. 15. Графики ошибок ЦУ в зависимости от расстояния между целью и ракетой для трех траекторий полета ракеты, приведенных на рисунке 12, с учетом зависимости СКО оценок координат от дальности до цели



информации по цели и ракете, однако при этом возрастает ошибка целеуказания по скорости. Или для снижения ошибок целеуказания по дальности необходимо увеличивать коэффициент метода пропорциональной навигации, что обеспечит быстрее вывод ракеты на линию РЛС – цель, но увеличение коэффициента требует расширения полосы пропускания контура наведения, при этом возрастают флюктуационные ошибки наведения.

В связи с этим выбор траектории должен определяться действием всей совокупности перечисленных факторов и их совместным влиянием на результирующие тактические показатели и критерии стрельбы, такие, например, как минимизация промаха, выделение цели бортовым локатором среди ложных целей, минимизация времени движения ракеты к цели и одновременно обеспечение ее поражения на максимальной дальности для увеличения пропускной способности огневого комплекса.

Заключение

В статье впервые выявлена и всесторонне исследована зависимость точности целеуказания бортовому локатору, выдаваемого наземной РЛС на основании измеряемых ею координат цели и ракеты, от относительного положения ракеты (относительно РЛС и цели).

Разработан математический аппарат (в виде двух методов – статистического и аналитического), позволивший установить и количественно оценить данную зависимость. В рамках аналитического метода получен ряд новых формул, описывающих указанную зависимость для дальности, угла и скорости цели. Полученные формулы доведены до инженерного вида для двух частных (предельных) случаев – когда ЗУР находится на линии РЛС – цель и когда она находится на линии, ортогональной линии РЛС – цель, что позволяет их использовать, например, для оценочных расчетов на этапе формирования облика системы наведения ЗУР. Исследован физический смысл полученных формул.

Наличие зависимости точности целеуказания бортовому локатору от относительного положения ракеты подтверждено как высокой

согласованностью результатов, полученных с применением статистического и аналитического методов при расчетах с варьированием исходных данных в широком диапазоне, так и наличием ясного физического смысла полученных формул для двух рассмотренных предельных случаев положения ракеты.

Основываясь на данных, близких к практическим, выполнены расчеты и показана высокая значимость учета точности целеуказания бортовому локатору в зависимости от относительного положения ракеты для обеспечения гарантированного (беспоискового) захвата цели по угловым координатам ввиду узкого поля зрения перспективных локаторов, работающих в миллиметровом или оптическом диапазоне волн.

С целью оценки характера зависимости точности целеуказания бортовому локатору от относительного положения ракеты построены поля ошибок целеуказания по различным координатам при фиксированном положении цели. Показано, что минимальная ошибка целеуказания по дальности и скорости достигается при нахождении ракеты на линии РЛС – цель, напротив, ошибка целеуказания по углу при этом максимальна. При нахождении ракеты вблизи направления на цель, ортогонального линии РЛС – цель, ошибка целеуказания по дальности и скорости максимальна, а угловая ошибка целеуказания минимальна. Причины этих свойств полей ошибок определяются формой дуг рассеивания оценок координат цели и ракеты.

По мере приближения ЗУР к цели угловые ошибки целеуказания растут (наиболее значимо – для положений ЗУР, близких к линии РЛС – цель), из чего следует необходимость повышения потенциала бортового локатора для обеспечения возможности гарантированного захвата цели по угловым координатам на больших дальностях.

Также исследован характер изменения ошибок целеуказания в динамике наведения ракеты на движущуюся цель с учетом особенностей траектории наведения ракеты и зависимости точности измерения координат цели и ракеты наземным локатором от расстояния до них. Показана необходимость



при оптимизации траектории полета ЗУР совместного учета ошибок целеуказания бортовому локатору и других влияющих факторов ввиду противоречивого характера их взаимного влияния.

Разработанные методы позволяют как оценивать точность целеуказания бортовому локатору ракеты при известных (заданных) ошибках измерения координат цели и ракеты наземным локатором, так и решать обратную задачу – определять требуемую точность измерения наземным локатором координат цели и ракеты для обеспечения беспойскового захвата цели по углам и требуемых возможностей по селекции цели по дальности и скорости в условиях противодействия противника.

Список литературы

1. Друзин С. В., Майоров В. В., Горевич Б. Н. Создание перспективной системы вооружения

войсковой ПВО нового облика // Вестник «Концерн ВКО «Алмаз – Антей». 2019. № 4. С. 7–18.

2. Друзин С. В., Горевич Б. Н. Методика формирования облика радиолокационных станций перспективной системы вооружения войсковой ПВО // Вестник «Концерн ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 2. С. 6–31.

3. Кринецкий Е. И. Системы самонаведения. М.: Машиностроение, 1970. 236 с.

4. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2000. 480 с.

5. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям. Пер. с англ. под ред. Вейсбейна М.М. М.: Сов. радио, 1976. 392 с.

6. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Ширмана Я. Д. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.

Об авторах

Созинов Павел Алексеевич – доктор технических наук, профессор, генеральный конструктор Акционерного общества «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: разработка научных основ построения и развития системы воздушно-космической обороны России.

Горевич Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор, руководитель проекта Акционерного общества «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: системный анализ, радиолокация.



Dependence between the accuracy of target designation to an onboard missile radar station and errors related to determination of the target and missile coordinates by a ground radar system

Sozinov P. A., Gorevich B. N.

JSC Almaz-Antey, Moscow, Russian Federation

This article investigates the dependence between the accuracy of target designation issued by a ground radar system to an onboard radar station based on the measured target and missile coordinates and on the relative missile position (relative to the radar and the target).

Simulation and calculation methods are proposed for estimating the accuracy of target designation in terms of the observation angle and the range and speed of the target taking into account both the errors in measuring the target and missile coordinates by a ground radar system and the relative position of the missile.

The influence of the errors in measuring the target and missile coordinates and the relative position of the missile on the target designation accuracy is investigated. The problem of tracing the optimal trajectory of missile guidance to the target is formulated taking into account the errors of target designation to an onboard radar station and other factors.

Keywords: radar station (radar), surface-to-air missile (SAM), on-board locator, position determination errors

Information about the authors

Sozinov Pavel Alekseevich – Dr. Sci. (Engineering), Professor, General Designer, JSC Almaz-Antey, Moscow, Russian Federation.

Research interests: development of scientific foundations for the construction and development of the aerospace defence system of Russia.

Gorevich Boris Nikolaevich – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Project Manager, JSC Almaz-Antey, Moscow, Russian Federation.

Research interests: systems analysis, radar.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-42-51>

УДК 621.317.18

Повышение точности АЦП с промежуточным преобразованием в частоту

В. В. Добрынин

Акционерное общество «Арзамасский приборостроительный завод им П.И. Пландина»,
Арзамас, Российская Федерация

В статье предложен способ повышения разрешающей способности интегрирующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с промежуточным преобразованием в частоту (ПНЧ). При частоте дискретизации 1 кГц достигнуто эффективное число разрядов АЦП (ENOB) от 12 до 16. Также предложен способ компенсации нелинейности преобразования напряжения в частоту. В диапазоне измеряемых напряжений от 100 мВ до 8 В достигнута погрешность измерения напряжения не более $\pm 0,025\%$, что соответствует пяти с половиной разрядному вольтметру. Предлагаемое устройство реализовано исключительно на серийно выпускаемых микросхемах. Шесть независимых каналов АЦП, реализованных на микросхемах ПНЧ 1316ПП1АУ, обслуживаются одним микроконтроллером 1986ВЕ91, при этом загрузка процессора поставленной задачей повышения точности составляет не более 10 %.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, сигма-дельта, разрешающая способность, преобразование напряжения в частоту.

Для цитирования: Добрынин В. В. Повышение точности АЦП с промежуточным преобразованием в частоту // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 1. С. 42–51. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-42-51>

For citation: Dobrynin V. V. Increasing the accuracy of an analogue-to-digital converter (ADC) with an intermediate voltage-to-frequency conversion // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 1. P. 42–51. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-42-51>

Поступила 08.12.2020 Отрецензирована 25.12.2020 Одобрена 16.01.2021 Опубликована 17.02.2021

Введение, актуальность проблемы

Точность электромеханических приборов определяется точностью датчиков первичной информации и электрических измерений. При постоянном повышении точности первых актуально также повысить точность и электрических измерений.

В настоящее время в мировой практике для получения оцифрованных с высокой точностью данных с датчиков обычно используются сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи (АЦП) с высокой разрядностью. К сожалению, в Российской Федерации имеются проблемы с серийным выпуском высокоточных сигма-дельта АЦП. Наряду с этим возможен вариант АЦП, основанного

на промежуточном преобразовании напряжения в частоту (ПНЧ). Например, нашей «рабочей лошадкой» в серийно выпускаемых изделиях является микросхема 1316ПП1АУ [1, 2]. У данной микросхемы имеются существенные недостатки:

- низкая разрешающая способность;
- наличие зоны нечувствительности в области перехода через ноль.

Влияние зоны нечувствительности на работу гироскопических приборов подробно проанализировано А. А. Захаровым [3].

В соответствии с последними современными тенденциями используемые датчики становятся все более и более интеллектуальными – в них начинают встраивать микроконтроллеры, тем самым расширяют функциональные возможности, вводят



компенсацию погрешностей, самоконтроль и т.д. Одновременно можно возложить на примененный микроконтроллер задачу «облагораживания» ПНЧ: подняв его разрешающую способность, введя калибровку и компенсацию присущей ему нелинейности.

В первой части статьи предложен способ одновременного повышения разрешающей способности микросхемы ПНЧ и устранения зоны нечувствительности. Этот способ защищен патентом на изобретение RU2731168.

Во второй части статьи предложен способ калибровки ПНЧ с компенсацией S-образной зависимости ошибки измерения от величины входного напряжения.

Повышение разрешающей способности АЦП на основе ПНЧ – «нониус»

Функциональная схема устройства приведена на рисунке 1.

Для понимания сути предлагаемого способа сначала рассмотрим работу АЦП на основе ПНЧ на примере микросхемы 1316ПП1АУ [2] без использования повышения разрешающей способности.

Входное напряжение непрерывно интегрируется. Напряжение на выходе интегратора сравнивается с опорными уровнями.

При превышении напряжения интегратора уровня U_{th+} формируются выходной счетный импульс и импульс сброса интегратора. При снижении выходного напряжения интегратора ниже уровня U_{th-} формируются вторые аналогичные импульсы. Во время действия импульса сброса на вход интегратора подается высокостабильный ток полярности, соответствующий противоположной полярности входного сигнала. Количество выходных импульсов сброса как положительной, так и отрицательной полярности подсчитывается реверсивным счетчиком.

Выходной код счетчика считывается по внешнему импульсу «Sample», и счетчик обнуляется.

Таким образом, масштабный коэффициент преобразования определяется опорными напряжениями и отношением сопротивлений резистора на входе интегратора к сопротивлению резисторов в цепи сброса интегратора.

Недостатками данного технического решения являются низкая разрешающая способность и наличие зоны нечувствительности в области перехода через ноль.

Приведем численный пример. Для микросхем ПНЧ при увеличении тактовой частоты уменьшается точность. В частности,

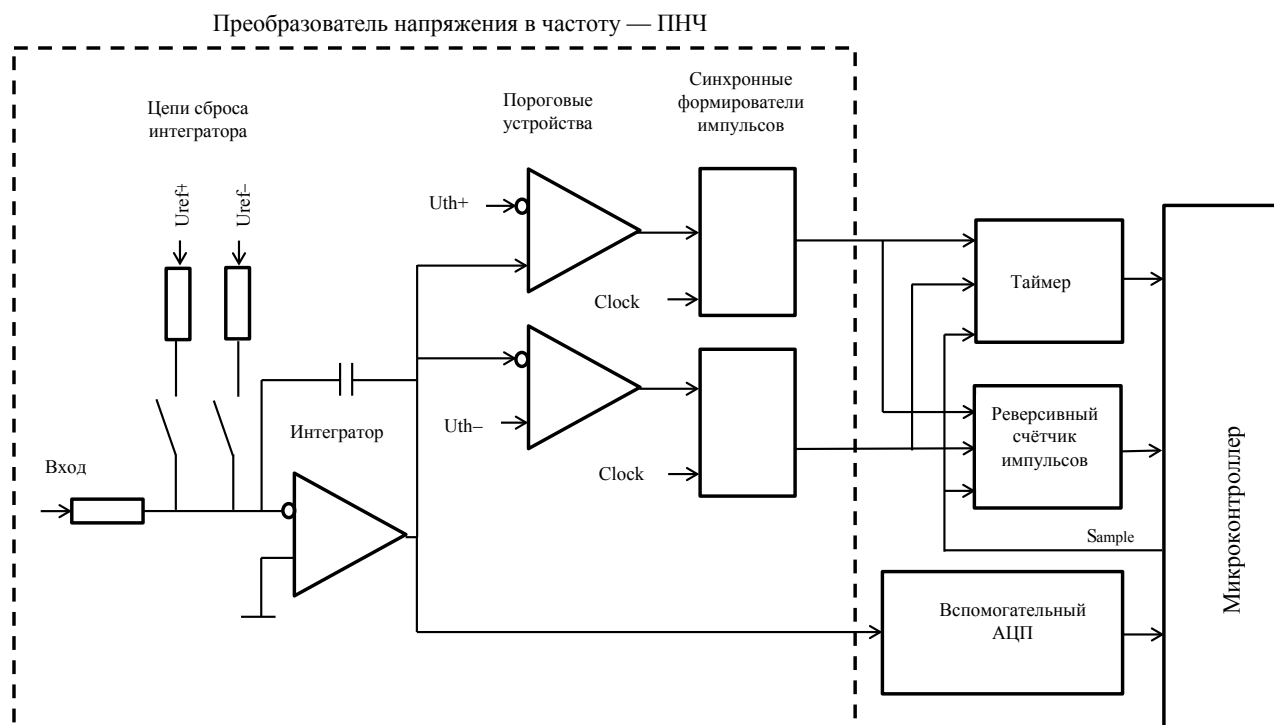


Рис. 1. Функциональная схема устройства

для микросхемы 1316ПП1АУ при $f_c = 8$ МГц, $K = 20$ Гц/мВ выходная частота при заземленном входе составляет 3 Гц, и, соответственно, напряжение смещения, приведенное к входу, составит 150 мкВ. При $f_c = 4$ МГц, $K = 10$ Гц/мВ, соответственно, 0,5 Гц, и напряжение смещения, приведенное к входу, составит 50 мкВ. Таким образом, для получения максимальной точности целесообразно выбирать $K = 10$ Гц/мВ. Следовательно, при частоте дискретизации раз в миллисекунду вес одного счетного импульса равен 100 мВ или более процента от максимальной измеряемой величины.

Давно известен способ повышения разрешающей способности – оцифровка напряжений на выходе интегратора, входящего в состав ПНЧ, во время импульса считывания вспомогательным АЦП. Из разности напряжения в начале и в конце периода дискретизации вычисляют доли счетных импульсов [4, 5, 9].

На рисунке 2 изображены осциллограммы напряжения на выходе интегратора ПНЧ. Если за период между двумя импульсами считывания не было ни одного счетного импульса, но напряжение на выходе интегратора изменилось, то по изменению напряжения на выходе интегратора определяется входное напряжение. Также с учетом разности напряжений

в начале и в конце интервала измерения поднимается разрешающая способность преобразователя.

Точное значение частоты следования счетных импульсов с учетом «нониуса» определяем по формуле:

$$F = \frac{Q_n + \frac{U_i - U_{i-1}}{U_h}}{T}, \quad (1)$$

где Q_n – количество счетных импульсов, или сколько раз за время T проходит сброс интегратора.

Но и этот способ имеет недостаток. Если импульс считывания «Sample» совпадает с временем действия импульса сброса интегратора, то напряжение, зафиксированное вспомогательным АЦП, не будет соответствовать тому, что изображено на рисунке 2, и, соответственно, получится сбойный результат. Осциллограммы напряжения для описываемого случая приведены на рисунках 3 и 4.

Для устранения этого недостатка измеряем время прихода счетных импульсов Δt . Если импульс считывания попадает на время сброса интегратора и счетный импульс был сосчитан, то рассмотрим рисунок 3.

Для того чтобы результат, полученный по формуле (1), был корректен, вместо



Рис. 2. Осциллограммы напряжения на выходе интегратора ПНЧ

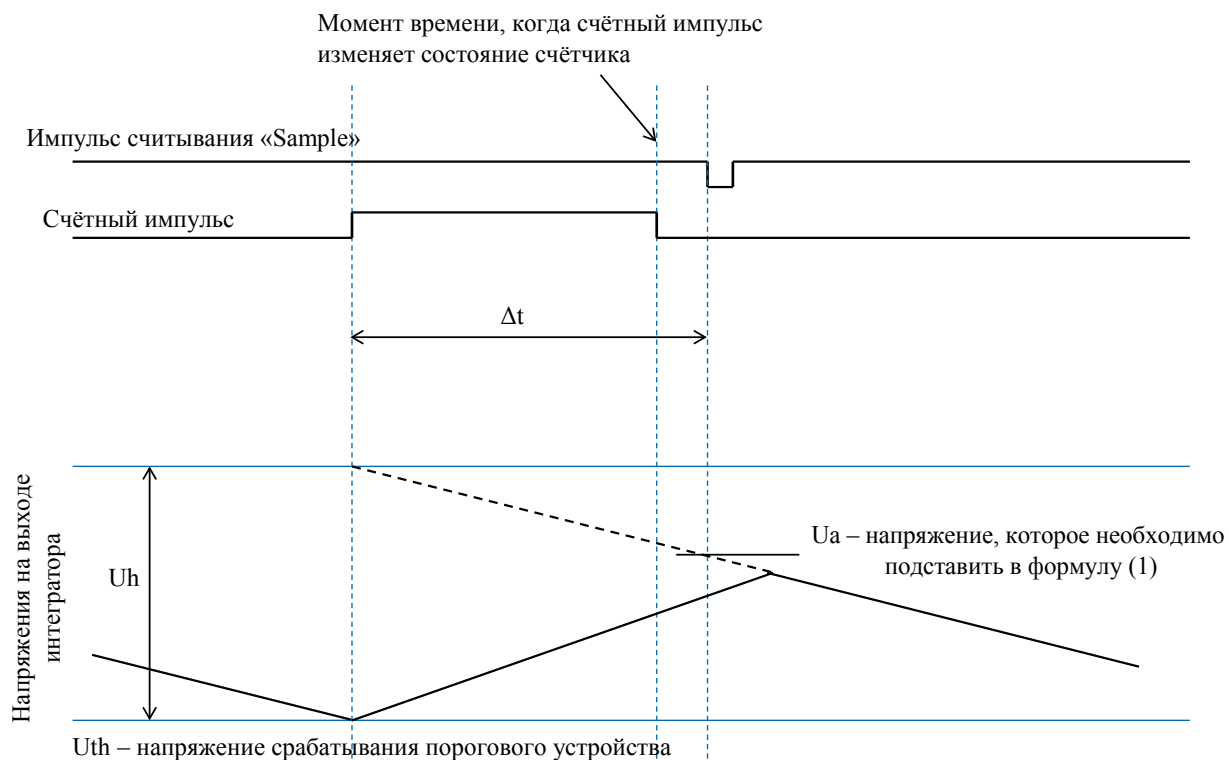


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на выходе интегратора ПНЧ, когда импульс считывания попадает на время сброса интегратора и счётный импульс сосчитан до прихода импульса считывания

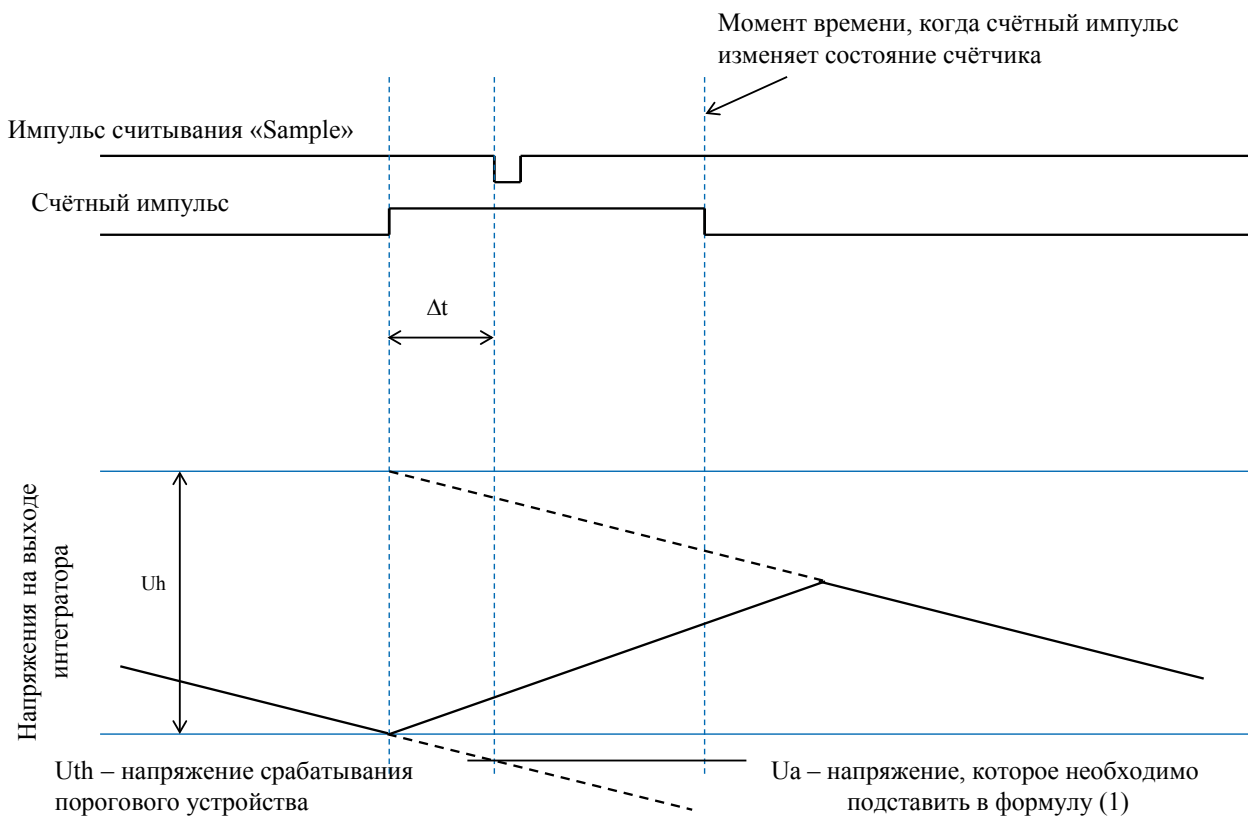


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на выходе интегратора ПНЧ, когда импульс считывания попадает на время сброса интегратора и счётный импульс не был сосчитан до прихода импульса считывания

показаний вспомогательного АЦП подставляем значение U_a , полученное по формуле (2):

$$U_a = U_{th} + U_h - \frac{U_h Q_n \Delta t}{T}. \quad (2)$$

В случае если счетный импульс не сосчитан, рассмотрим рисунок 4.

Аналогично вместо показаний вспомогательного АЦП подставляем значение U_{a1} , полученное по формуле (3):

$$U_{a1} = U_{th} - \frac{U_h Q_n \Delta t}{T}. \quad (3)$$

На предлагаемое техническое решение получен патент на изобретение № RU2731168.

Была разработана печатная плата, в которой к одному микроконтроллеру 1986BE91 было подключено 6 преобразователей 1316ПП1АУ. Дополнительное усложнение аппаратуры минимально и заключается всего лишь в согласовании диапазона выходных напряжений интегратора ± 5 В и входного диапазона вспомогательного АЦП от 0 до 3 В. В микроконтроллере была реализована программа, которая выполняет алгоритм повышения разрешающей способности. При опросе раз в 1 мс время выполнения программы составляет не более 10 % процессорного времени. Таким образом, в микроконтроллере остаются достаточные вычислительные мощности, которые можно использовать для других целей.

Для иллюстрации предлагаемого способа был проведен следующий эксперимент. На вход преобразователя 1316ПП1АУ подавался синусоидальный сигнал амплитудой 20 мВ и частотой 10 Гц. Информация с преобразователя снималась с периодом 1,024 мс и записывалась в файл. На рисунке 5 представлен фрагмент результатов за 100 отсчетов.

На рисунке 5а представлено количество счетных импульсов за каждый из отчетов. Это соответствует режиму работы без увеличения разрешающей способности «нониуса». Из рисунка 5а видно, что теряется всякая информация о реальной форме входного сигнала и имеется большая зона нечувствительности вблизи перехода через ноль.

На рисунке 5б представлено напряжение на выходе интегратора, входящего в состав преобразователя 1316ПП1АУ. Напряжение было оцифровано с помощью вспомогательного АЦП из состава микроконтроллера 1986BE91.

При входном сигнале положительной полярности напряжение на выходе интегратора

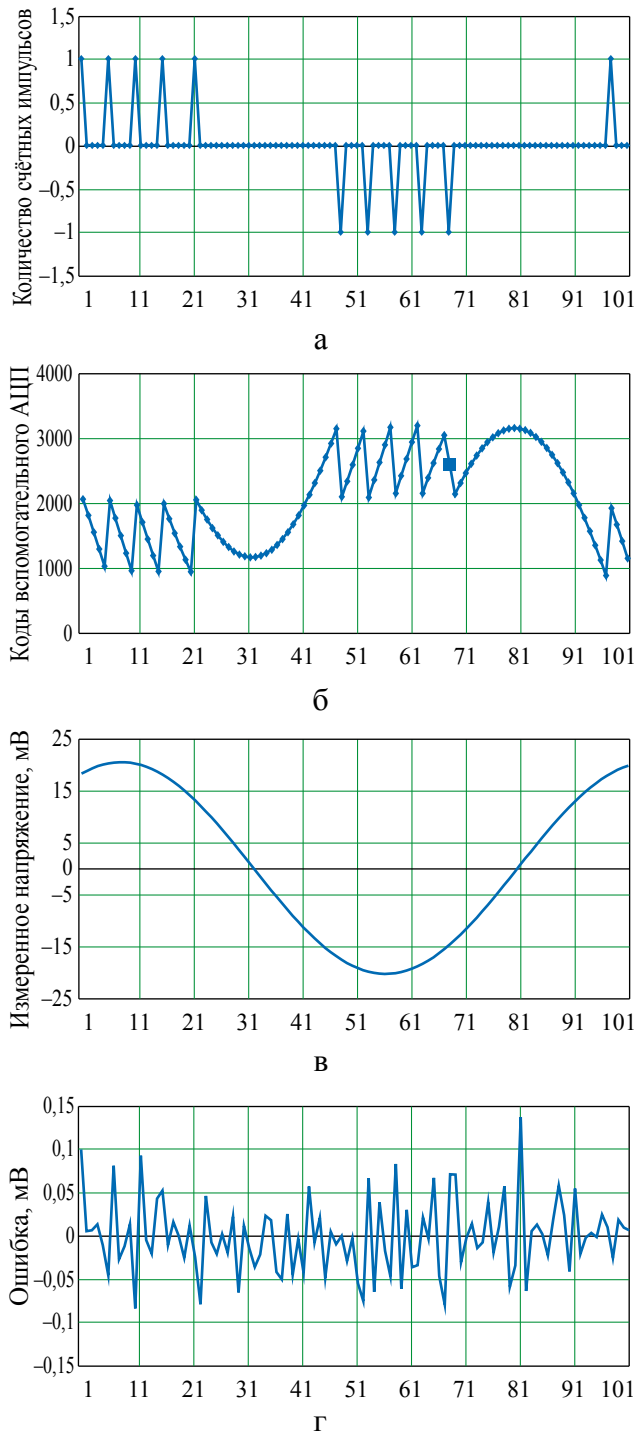


Рис. 5. Работа при синусоидальном сигнале 20 мВ, 10 Гц
а – количество счётных импульсов, б – коды вспомогательного АЦП, в – измеренное напряжение, мВ, г – ошибка, мВ



постепенно уменьшается со скоростью, пропорциональной входному напряжению. При достижении порогового напряжения происходит сброс интегратора и одновременно генерируется счетный импульс. В зоне перехода входного напряжения через ноль скорость изменения напряжения интегратора уменьшается и меняет знак после изменения полярности входного напряжения. После достижения второго порогового напряжения опять происходит сброс интегратора и, соответственно, генерируются счетные импульсы другой полярности.

Особо необходимо отметить отсчет, отмеченный на рисунке 5б большим квадратным маркером. В данный момент измерение вспомогательного АЦП происходило во время сброса интегратора.

На рисунке 5в представлен результат алгоритма измерения напряжения. Как видно, была восстановлена форма входного синусоидального сигнала. Особо необходимо подчеркнуть, что в случае, когда опрос совпал со сбросом интегратора, алгоритм заменил показания вспомогательного АЦП на информацию о времени прихода счетного импульса и в результате не произошло сбоя.

Для оценки зашумленности выходной сигнал методом наименьших квадратов был аппроксимирован идеальным синусоидальным сигналом. Из измеренного сигнала был вычтен идеальный, и их разность представлена на рисунке 5г. Как видно, ошибка существенно менее одного милливольт. Стандартное отклонение сигнала ошибки, представленного на рисунке 5г, составляет 50 мкВ,

что соответствует эквивалентному числу разрядов (ENOB) 16.

Также для оценки шумовых характеристик были записаны результаты при постоянном входном напряжении. На рисунке 6 представлен «нулевой» сигнал при коротком замыкании на входе. На рисунке 7 представлен сигнал при постоянном напряжении 8 В.

Из сравнения рисунка 7 с рисунками 6 и 5г видно, что при больших величинах входного напряжения абсолютная величина переменной составляющей увеличивается.

Для объяснения данной особенности рассмотрим механизмы возникновения шумов при разных режимах работы.

При малой величине входного напряжения в большинстве случаев результат в большей части находится на основании показаний вспомогательного АЦП. В редких случаях, когда импульс считывания попадает на время сброса интегратора, член, зависящий от Δt в формулах (2) и (3), мал. Следовательно, дискретность измерения Δt вносит малый вклад в общий шум.

При большой величине входного напряжения измеряемая частота велика и вероятность попадания импульса считывания на время сброса интегратора велика. Таким образом, в большинстве случаев будут применены формулы (2) или (3) и, как следствие, основной вклад в шум измерения будет вносить дискретность измерения Δt . В микросхеме 1316ПП1АУ время формирования счетных импульсов привязано к тактовой частоте 4 МГц.

Например, при измеряемом напряжении 8 В и частоте импульсов 80 кГц ошибка

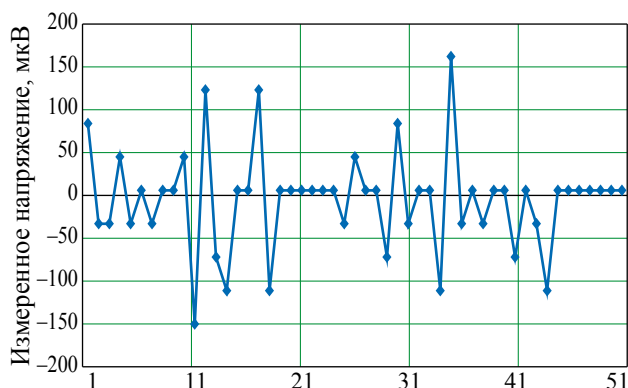


Рис. 6. «Нулевой» сигнал при коротком замыкании на входе

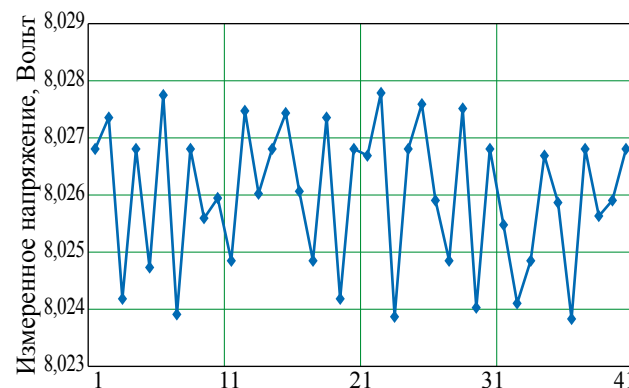


Рис. 7. Сигнал при постоянном напряжении 8 В



измерения Δt в 250 нс приведет ошибке измерения частоты 20 Гц.

Результаты, представленные на рисунке 7, подтверждают данные расчеты. Получено среднеквадратическое отклонение в 1 мВ и соответствующее эквивалентное число разрядов 12.

Шумовая ошибка, возникающая при работе предложенного алгоритма, характеризуется определенной статистической особенностью. При увеличении времени измерения в N раз ошибка измерения напряжения уменьшается в N же раз. Данная статистика проверена в диапазоне 1, 2, 4, 8 мс и сохраняется примерно до одной секунды.

Температурная стабильность компенсации «нониуса»

Основной вклад в нестабильность калибровочной константы U_h вносит изменение постоянной времени интегратора. Постоянная времени равна произведению емкости конденсатора на сопротивление резистора.

Типовой ТКС внутренних резисторов микросхемы 1316ПП1АУ –500 ppm. Нестабильность – не более 100 ppm. Для обеспечения максимальной стабильности исключаем температурные уходы внутреннего конденсатора интегратора и применяем внешний керамический конденсатор группы температурной стабильности МПО.

Если не вводить температурной компенсации, то изменение температуры от нормальных условий до минус 60 °С приведет к дополнительному шуму 4 % от 100 мВ, что составит 4 мВ. Если такой уровень дополнительного

шума недопустим, то можно выполнить дополнительную температурную калибровку U_h и свести его к минимуму.

Сравнение полученного результата с российскими и мировыми аналогами

Сравнение эффективного числа разрядов микросхем отечественного и импортного производства при частоте дискретизации 1 кГц приведено в таблице.

Охарактеризуем микросхемы, выпускаемые в Российской Федерации.

К сожалению, во вновь разрабатываемых многоканальных микросхемах ПНЧ 1316НХ035 [7] и 5400ТР065-012 [8] невозможно применить повышение разрешающей способности «нониус» по причине того, что необходимые для этого сигналы не выведены за пределы кристаллов.

В первой строчке таблицы для сравнения приведено эффективное число разрядов микросхемы 1316ПП1АУ без применения «нониуса».

Второй строчкой приведена микросхема трехканального ПНЧ 5400ТР065-012, параметры которого соответствуют параметрам 1316ПП1АУ.

Для микросхемы 1316НХ035, как и для 1316ПП1АУ, при увеличении тактовой частоты точность уменьшается. Поэтому для получения максимальной точности целесообразно выбирать минимальную частоту – $f_c = 8$ МГц и, соответственно, коэффициент преобразования 50 кГц/В. При частоте дискретизации 1 кГц, соответственно, вес одного импульса будет 20 мВ. При проведении

Таблица

Сравнение эффективного числа разрядов микросхем отечественного и импортного производства

Страна	Фирма-изготовитель	Технология	Тип микросхемы	Эффективное число разрядов
Российская Федерация	Миландр	ПНЧ	1316ПП1АУ	7,3
	ДЦ «Союз»	ПНЧ	5400ТР065-012	7,3
	Миландр	ПНЧ	1316НХ035	8,6
	НПО «СКТБ ЭС»	Сигма-дельта АЦП 24 разряда	1273ПВ1Р, 1273ПВ8Р, 1273ПВ9Р	10,5
	Миландр	Сигма-дельта АЦП 24 разряда	MLDR116	15,9
США	Analog Devices	Сигма-дельта АЦП 24 разряда	AD7710	10,5
	Texas Instruments	Сигма-дельта АЦП 24 разряда	ADS1248	17,2
	Texas Instruments	Сигма-дельта АЦП 31 разряда	ADS1283	20



эксперимента, результаты которого приведены на рисунке 5, для возможности сравнения была выбрана амплитуда сигнала именно 20 мВ.

В технических условиях на микросхемы 1273ПВ1Р, 1273ПВР, 1273ПВ9Р, в отличие от зарубежного аналога AD7710, не нормированы напряжения смещения, что делает затруднительными их применение для измерения постоянного напряжения. Кроме того, имеются большие сроки поставок данных микросхем.

На время написания статьи работы по проекту 24-разрядного сигма-дельта АЦП MLDR 116 приостановлены. Для справки приведены предварительные данные на MLDR 116.

Из сравнения с таблицей видно, что полученный результат лучше, чем у всех выпускающихся в Российской Федерации микросхем, и приближается к лучшим мировым образцам.

Устранение нелинейности

После реализации повышения разрешающей способности появилась возможность проводить точные измерения в течение небольшого времени, например за одну секунду. Это сделало актуальной работу по более точной калибровке преобразователя в качестве измерителя напряжения.

Интегрирующий преобразователь имеет нелинейную S-образную зависимость ошибки измерения от величины входного напряжения.

Основной причиной появления S-образной характеристики являются зависимость K_u в усилителе интегратора от выходного напряжения и изменение динамических характеристик усилителя.

Обнаружено, что характеристика хорошо аппроксимируется полиномами 2-й степени.

При проведении калибровки на вход платы последовательно подавался ряд напряжений в диапазоне 0,25; 0,5; 1...8 В. Результаты усреднялись в каждом из режимов в течение 1 секунды, и методом наименьших квадратов по критерию минимизации относительных ошибок в процентах находились коэффициенты полинома 2-й степени.

Калибровка повторялась как для положительной, так и для отрицательной полярности

входного напряжения. Для каждой полярности получался свой набор коэффициентов.

Результаты измерения напряжения для шести каналов приведены на рисунке 8а. Как видно, ошибка измерения напряжения укладывается в пределы $\pm 0,025\%$.

Сравнение результатов калибровки полиномами 1-й и 2-й степени приведено на рисунке 8б. Погрешности при калибровке полиномами 1-й степени имеют характерную S-образную форму и достигают величины нескольких милливольт. При калибровке полиномом 2-й степени остаются только случайные иррегулярные погрешности.

Выводы

Предложен способ повышения разрешающей способности интегрирующих АЦП с промежуточным преобразованием в частоту (ПНЧ). Применение предлагаемого способа позволяет получить разрешающую способность

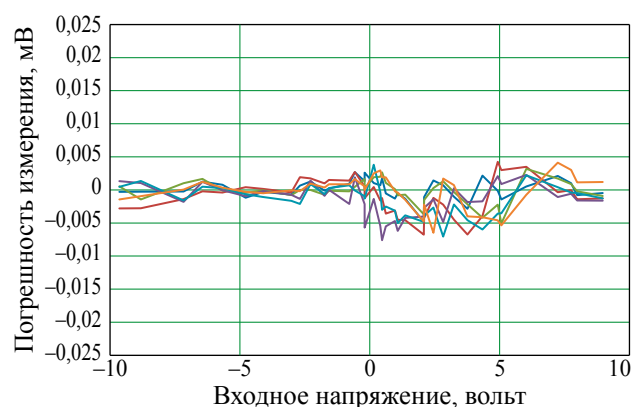


Рис. 8а. Зависимость относительной погрешности измерения от входного напряжения

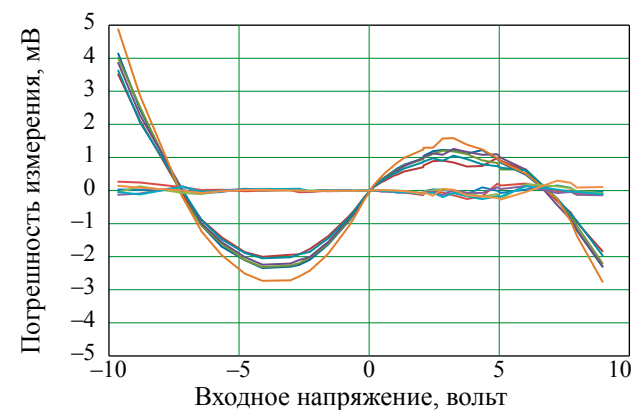


Рис. 8б. Сравнение абсолютных погрешностей измерения при калибровке полиномами 1-го и 2-го порядка



выше, чем у всех серийно выпускающихся в Российской Федерации микросхем, и приближается к лучшим мировым образцам. При времени дискретизации 1 мс эффективное число разрядов (ENOB) улучшено с 7,3 до 12–16. Для сравнения, лучшие российские прецизионные АЦП обеспечивают ENOB 10,5.

Также предложен способ калибровки АЦП полиномами 2-й степени с получением точности измерения напряжения в пределах $\pm 0,025\%$.

Реализация данного устройства возможна с использованием серийно выпускаемых микросхем. При этом дополнительное усложнение аппаратуры минимально (добавляются несколько резисторов и вводятся несколько дополнительных связей на печатной плате).

Предлагаемый способ также может быть использован во вновь разрабатываемых многоканальных микросхемах АЦП.

Список литературы

1. Агрич Ю.В., Лифшиц В.Б. Разработка прецизионного преобразователя напряжения в частоту // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2010. № 1. С. 521–526.
2. ТСКЯ.431321.001СП Микросхемы прецизионного интегрирующего преобразователя напряжения в частоту и параллельный двоичный код 1316ПП1АУ, К1316ПП1АУ, 1316ПП1БУ, К1316ПП1БУ. Спецификация. М.: АО «ПКК Миландр», 2019. 17 с.
3. Захаров А. А. Модель преобразователя двухполярного напряжения в частоту при его работе на малых напряжениях в условиях фоновой помехи и температурных изменений (совместно с компенсационным гиротахметром) [Эл. ресурс] // Труды МАИ. 2010. № 40. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/520/model-preobrazovatelya-dvukhpolyarnogo-napryazheniya-v-chastotu-pri-ego-rabote-na-malykh-napryazheniyakh-v-usloviyakh-fonovoy-pomekhi-i-temperaturnykh-izmeneniy-_sovmestno-s-kompensatsionnym-girotakhmetrom_.pdf (дата публикации: 01.03.2010).
4. Patent US5101206 USA, Integrating analog to digital converter / RIEDEL RONALD J; Applicant HEWLETT PACKARD CO. US19890446232; 05.12.1989; 31.03.1992.
5. Patent US5117227 USA, Continuously integrating high-resolution analog-to-digital converter / GOEKE WAYNE C; Applicant HEWLETT PACKARD CO. US19910767006; 27.09.1991; 26.05.1992.
6. Патент 2731168 Российская Федерация. МПКН03М1/60(2006.01). Прецизионный аналогово-цифровой преобразователь с промежуточным преобразованием в частоту и способ преобразования напряжения в цифровой код с промежуточным преобразованием в частоту / Добрынин В. В.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Арзамасский приборостроительный завод имени П. И. Пландина» – АО «АПЗ». – 2019123379; заявл. 25.07.2019; опубл. 31.08.2020 Бюл. № 25. – 16 с.
7. Прецизионный многоканальный преобразователь напряжения в частоту 1316НХ035 [Эл. ресурс] – URL: https://ic.milandr.ru/products/atsp_i_tsap/1316nkh035/ дата публикации: 10.08.2020.
8. 5400TP065-012. 3-хканальный преобразователь напряжения в частоту [Эл. ресурс] – URL: <https://dcsouyz.ru/search/art/1681> (дата публикации: 05.08.2020).
9. Integrating ADC [Эл. ресурс] – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Integrating_ADC#Continuously-integrating_converter

Об авторе

Добрынин Валерий Витальевич – инженер Акционерного общества «Арзамасский приборостроительный завод имени П.И. Пландина», Арзамас, Российская Федерация.

Область научных интересов: электромеханические приборы и преобразования.



Increasing the accuracy of an analogue-to-digital converter (ADC) with an intermediate voltage-to-frequency conversion

Dobrynin V. V.

Plandin Arzamas Design Plant, Arzamas, Russian Federation

The article proposes an approach to increasing the resolution of integrated analogue-to-digital (ADC) converters with intermediate voltage-to-frequency conversion (VFC). At sampling rate 1 kHz was achieved effective number of bits (ENOB) from 12 to 16. In addition, an approach to compensating for the non-linearity of voltage-to-frequency conversion was proposed. Across the range of measured voltages from 100 mV to 8 V, the voltage measurement error comprised no more than $\pm 0.025\%$, which corresponds to a five-and-a-half-bit voltmeter. The proposed device was implemented exclusively on mass-produced chips. The six independent ADC channels, implemented on 1316PP1AU VFCs, are serviced by a single 1986VE91 microcontroller, with the processor loading with the task of improving accuracy being no more than 10%.

Keywords: analog-digital converter, sigma delta, resolution, voltage-to-frequency conversion

Information about the author

Dobrynin Valery Vitalevich – Engineer, Plandin Arzamas Design Plant.

Research interests: electromechanical devices and transformations.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-52-66>

УДК 629.7.01

Перспективные методы организации тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов

Д. И. Аронов¹, В. А. Клягин^{1,2}

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

² Научно-исследовательское отделение ОКБ Сухого, Москва, Российская Федерация.

В статье на основе аналитических и экспериментальных данных представлены возможные уровни теплового нагружения гиперзвуковых многоразовых самолетов. Рассмотрены способы обеспечения теплового режима таких летательных аппаратов с использованием различных пассивных и активных средств теплозащиты. По результатам анализа научно-технического задела в части практической реализации данных средств сделан вывод об актуальности и целесообразности создания комплексной системы теплозащиты многоразового высокоскоростного ЛА.

Ключевые слова: высокоскоростной ЛА, гиперзвуковой ЛА, тепловая защита

Для цитирования: Аронов Д. И., Клягин В. А. Перспективные методы организации тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 1. С. 52–66. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-52-66>

For citation: Aronov D. I., Klyagin V. A. Advanced methods for organizing thermal protection of hypersonic aircrafts // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 1. P. 52–66. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-52-66>

Поступила 26.10.2020 Отрецензирована 13.01.2021 Одобрена 03.02.2021 Опубликована 17.02.2021

Сегодня одним из перспективных направлений создания авиационной техники являются многоразовые гиперзвуковые (или высокоскоростные) летательные аппараты (ГЛА). Интерес к подобной технике обусловлен желанием сократить временные параметры выполнения транспортной операции, например перевозки пассажиров на расстояние более 5000 км [1–3] или вывода на орбиту второй ступени многоразовой авиационно-космической системы (АКС).

Согласно совместному исследованию Airbus и Japan Aircraft Development Corporation, к 2030 г. наиболее востребованным стал бы 100-местный гиперзвуковой самолет (около 10 тонн полезной нагрузки) с крейсерской скоростью $M = 5$, способный выполнять в день

четыре рейса от взлета до посадки. Стоимость сегмента гражданского гиперзвукового авиационного к этому времени может составить 3,5 млрд евро [4]. Сроки появления первого опытного экземпляра гражданского высокоскоростного лайнера не называются, возможно, это произойдет не ранее 2035 года.

Для АКС наиболее рациональным мог бы стать вариант самолета-разгонщика с отделением второй ступени на скорости $M = 6–7$. При этом масса выводимой полезной нагрузки составила бы 10–15 тонн [5]. Применение гиперзвукового самолета в качестве первой ступени АКС позволило бы снизить запас топлива последующих ступеней АКС за счет высокой начальной энергетики и большой высоты их разделения. При этом экономия топлива может быть трансформирована либо в увеличение массы выводимой нагрузки, либо



в уменьшение стоимости ее выведения при постоянных параметрах груза.

Основные особенности концептуально-технического облика исследуемого типа ГЛА
Вне зависимости от того, является скоростной ЛА пилотируемым или беспилотным, основными факторами, влияющими на тепловое нагружение, являются:

- 1) характер траектории аппарата;
- 2) достигаемые высотно-скоростные параметры;
- 3) время полета.

На основе анализа ранее указанных возможных концепций ГЛА можно выделить два основных профиля полета после взлета с полосы:

- 1) набор крейсерской высоты и скорости с дальнейшим продолжительным полетом;
- 2) разгонная траектория для достижения точки старта второй ступени с борта ЛА и последующий возврат на аэродром.

Схемы данных профилей приведены на рисунке 1. С учетом того, что разгонный

участок характерен как для «маршевого» самолета, так и для аппарата-разгонщика, далее рассмотрим особенности тепловых режимов для первого варианта траектории.

До сих пор, согласно публикации [6], рекорд продолжительности крейсерского гиперзвукового полета принадлежит ракете *X-51 Waverider* – около 6 минут (май 2013 г.). По заявлениям руководства военно-воздушных сил США, аппарат пролетел 426 км и достиг скорости 5,1 Маха, при этом изначально расчетная дальность полета составляла не менее 1100 км. В настоящее время для одного из проектов гиперзвукового пассажирского самолета расчетный крейсерский участок полета составляет 5000 км [7]. При скорости 5 Махов на высоте 27 км преодоление этого расстояния займет около 55 минут, то есть в 9 раз дольше, чем достижение *X-51*.

Пример зависимости теплового нагружения пассажирского ГЛА со взлетной массой 236 тонн по профилю полета, аналогичного «маршевому» самолету, показан на рисунке 2 [8]. Суммарный тепловой поток Q зависит

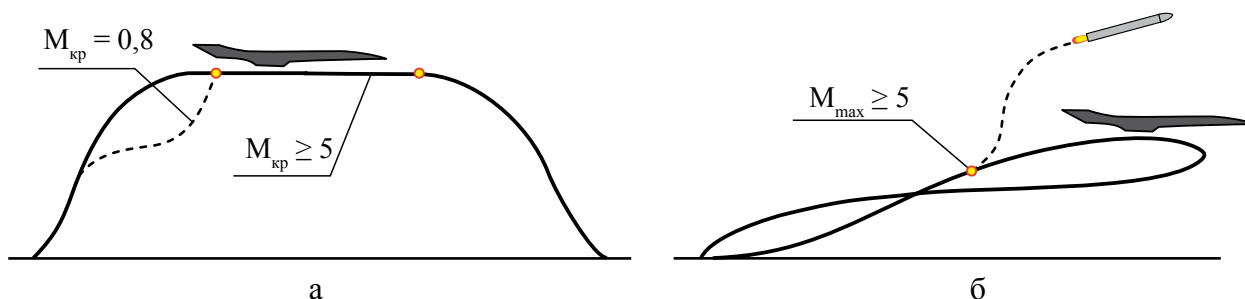


Рис. 1. Типовые профили для исследования теплового нагружения ГЛА
(а – гиперзвуковой «маршевый» самолет, б – гиперзвуковой «разгонный» самолет)

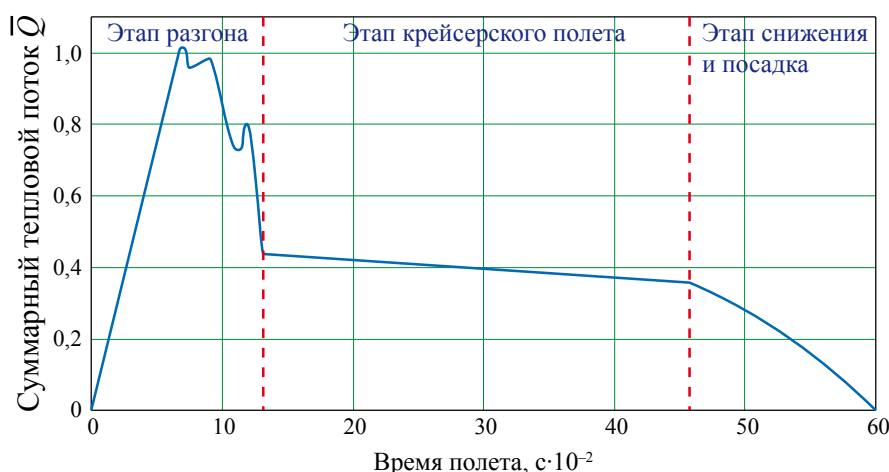


Рис. 2. Тепловой поток к пассажирскому ГЛА по профилю полета

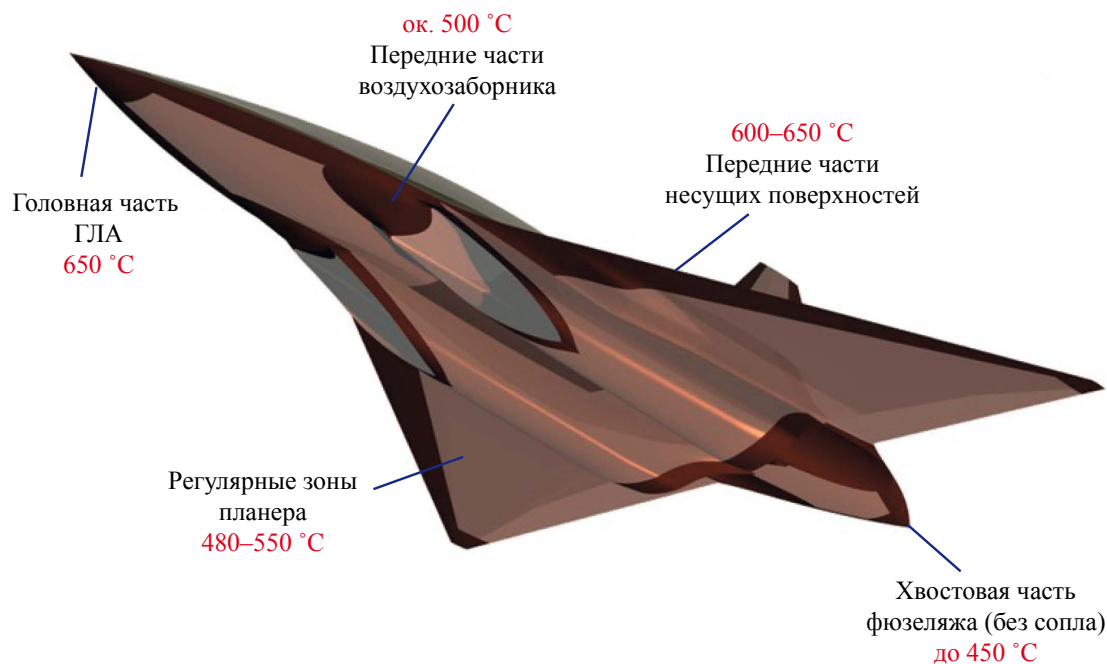


Рис. 3. Карта температур для скоростного ЛА с крейсерской скоростью полета $M_{кр} = 5$

от площади омываемой поверхности $Q_{\Sigma} = \sum q_i S_i$, где q_i – это поток к i -му элементу общей площади поверхности, S_i – площадь элемента. График дан для фюзеляжа пассажирского ГЛА, значение Q приведено в относительных величинах в сравнении с максимальным действующим тепловым потоком по траектории. На рисунке 3 приведены установившиеся температуры по поверхности высокоскоростного ЛА с крейсерским числом Маха $M_{кр} = 5$ [9]. По данным [10], на крейсерской скорости $M_{кр} = 6$ и высоте 30 км максимальная температура панели обшивки из сплава ЭП99 может составить до 700 °C. Математическим моделированием условий теплового нагружения скоростного ЛА с $M_{кр} = 7$ были получены установившиеся температуры на уровне 800 и 620 °C для головной части фюзеляжа и нижней регулярной зоны обшивки соответственно [11].

Внешняя поверхность гиперзвукового ЛА – не единственный элемент, испытывающий воздействие высоких температур. Боковые стенки газозвдушного тракта испытывают еще бóльшие тепловые нагрузки. Если для SR-71 эксплуатационные температуры в диапазоне 590–650 °C наблюдались в сопловой зоне мотогондол, то для концептуального облика 5-мачового ГЛА этой же фирмы, исследованного в начале 1990-х годов, аналогичные расчетные

значения были получены уже на неохлаждаемых панелях воздухозаборника.

Дополнительными элементами, вносящими значительный вклад в тепловой баланс ГЛА, являются внутренние источники тепла: камера сгорания и сопло прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД). Температурное нагружение ПВРД зависит от его тягово-геометрической размерности, используемого топлива и применяемых конструкционных материалов. В таблице 1 приведены результаты расчетных исследований теплового состояния двух вариантов камеры сгорания многорежимного гиперзвукового ПВРД [12].

На основе приведенной выше информации по уровням температур можно сделать вывод о том, что подобные условия функционирования гиперзвуковых самолетов беспрецедентны в сравнении с режимами полета существующих сверхзвуковых самолетов. Таким образом, для гиперзвукового ЛА потребуется обеспечить требуемый уровень тепловой защиты:

- 1) конструкции планера;
- 2) отсеков бортового радиоэлектронного оборудования;
- 3) ниш шасси;
- 4) воздухозаборника и сопла;
- 5) мотоотсека;



Таблица 1

Параметры теплового состояния камеры сгорания гиперзвукового ПВРД

Параметр	Значение	
Тип конструкции	Металлическая	Керамоматричные композиционные материалы
Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² /К	675	
Температура восстановления, К	2460	
Температура горячей стенки, К	1100	1800
Плотность теплового потока, КВт/м ²	917	444
Площадь поверхности камеры сгорания, м ²	0,95	
Расход топлива для охлаждения, кг/с	0,175	
Тепловая нагрузка на топливо, МДж/кг	5	2,4

Далее проанализируем возможные технические решения по восприятию тепловых потоков конструкцией таких летательных аппаратов.

Методы обеспечения тепловой защиты гиперзвуковых многоразовых ЛА

Способы тепловой защиты рассмотрим на примере беспилотного гиперзвукового самолета:

- 1) имеющего разгонно-маршевые воздушно-реактивные двигатели;
- 2) реализующего горизонтальный взлет/посадку на аэродром;
- 3) использующего аэродинамические принципы полета с возможностью выполнения динамического маневра «горка»;
- 4) совершающего длительный гиперзвуковой полет только в атмосфере на большие расстояния.

Следует отметить, что отсутствие человека на борту серьезно упрощает построение системы охлаждения и снимает потребность в специальных системах кондиционирования воздуха (СКВ) и жизнеобеспечения (СЖО).

На данный момент техническими специалистами ведущих мировых аэрокосмических фирм определены следующие возможные методы восприятия тепловых потоков к скоростному ЛА:

- 1) применение жаропрочных и жаростойких материалов «горячей» конструкции планера;
- 2) установка внешней пассивной тепловой защиты некоторых участков ЛА;
- 3) использование активного охлаждения в элементах планера и силовой установки (СУ)

с помощью хладоресурса топлива или дополнительного теплоносителя;

- 4) модификация аэродинамической компоновки и интеграция СУ с теоретическими обводами аппарата.

Использование в силовой конструкции скоростных ЛА стальных и титановых сплавов является распространенным способом обеспечения ее работоспособности. Температуры до 460 °С определяют зоны применимости титана, до 780–800 °С – жаропрочных сталей, до 980–1000 °С – кобальтовых или ниобиевых суперсплавов. Для особонагруженных зон с рабочей температурой до 2000 °С специальными выработаны рекомендации в части использования композиционных материалов класса «углерод-кремний», «углерод-углерод» и других неметаллических материалов [13, 14]. Кроме этого, известны работы по созданию титаноматричных композиционных материалов (КМ), а также ультравысокотемпературных КМ на основе боридов гафния или циркония с добавлением силицида кремния [15]. На рисунке 4 показаны возможные зоны применимости различных материалов.

С точки зрения конструктивного исполнения обшивки предпочтение отдается трехслойным панелям с наполнителем различной конфигурации. Китайскими учеными в материалах [16, 17] показана возможность использования многослойных панелей с объемным трехмерным наполнителем (материалы панелей – титановые, циркониевые сплавы и КМ класса «углерод-кремний») в конструкции планера гиперзвуковых ЛА. Один из вариантов такой панели с дополнительной фетровой теплоизоляцией показан на рисунке 5.

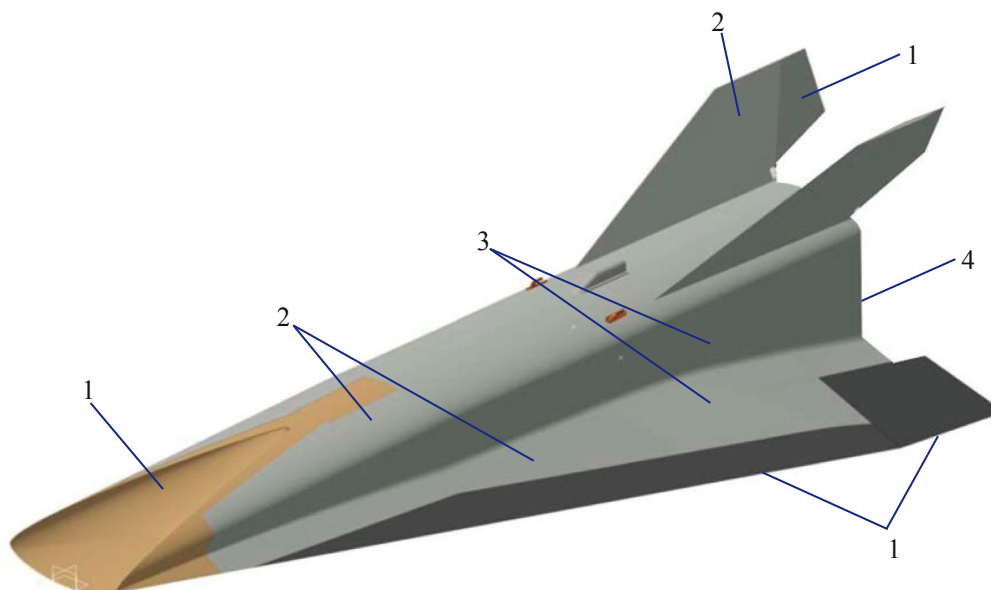


Рис. 4. Технологическая карта ГЛА: 1 – передние кромки и управляющие органы из углерод-углеродных/углерод-керамических материалов (C-C/SiC); 2 – наиболее нагретые регулярные зоны фюзеляжа, крыла и оперения из высокожаропрочных сталей и сплавов (например, аналог ЭП99 и др.); 3 – остальные регулярные зоны фюзеляжа и крыла из титановых сплавов / титаноматричных композиционных материалов; 4 – ограниченно много-разовое покрытие горячей части плоского сопла

Для использования в конструкции передних частей фюзеляжа и кромок несущих поверхностей рассматриваются цельноформованные или составные детали из жаростойких композиционных материалов.

Для некоторых зон поверхности гиперзвуковых самолетов может быть рациональным использование пассивных методов теплозащиты: плиточных или гибких теплозащитных покрытий – ТЗП (см. рисунки 6 и 7 соответственно). Технологии проектирования, изготовления и монтажа плиточной тепловой защиты были

отработаны на таких аппаратах, как, например, “Space Shuttle” и «Буран», выполнявших длительный планирующий спуск из космоса в атмосфере на гиперзвуковых скоростях. Однако, несмотря на это, данный вариант восприятия теплового нагружения не может считаться полностью оптимальным решением, особенно для многократных высокоскоростных ЛА, не выходящих в космическое пространство. Это связано в первую очередь с необходимостью минимизации массы планера, а также технологическими особенностями установки

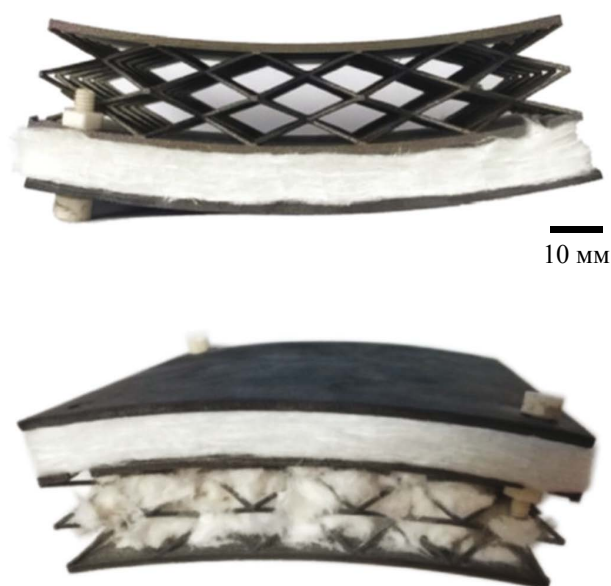


Рис. 5. Панель обшивки с объемным наполнителем



Рис. 6. Гибкий кремнеземный мат

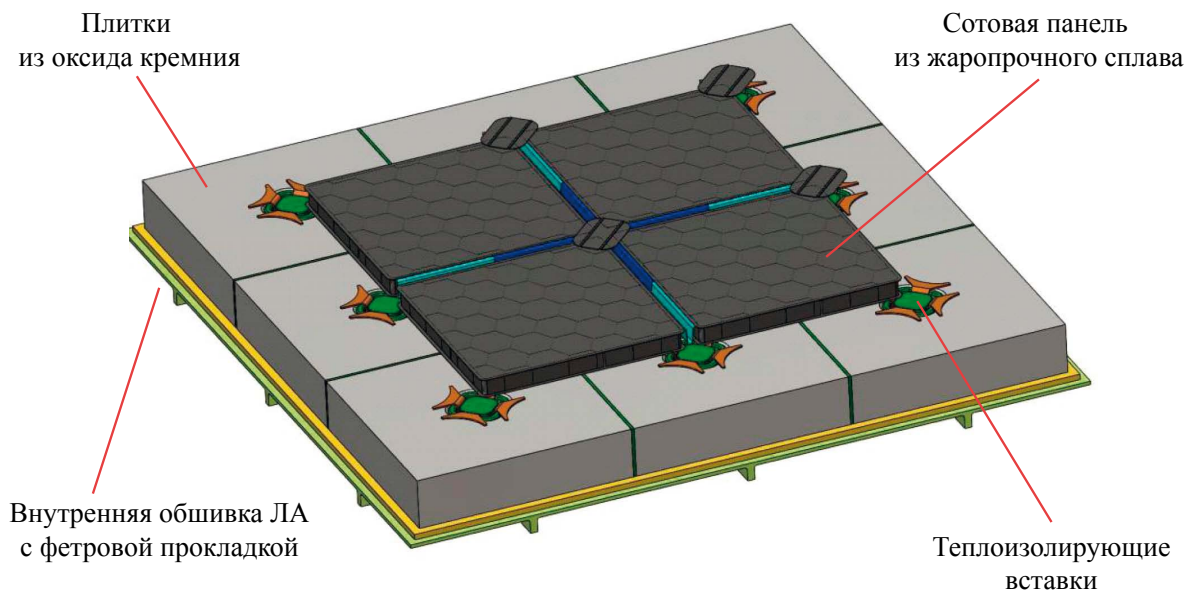


Рис. 7. Концептуальный облик плиточной теплозащиты с металлическими сотовыми панелями

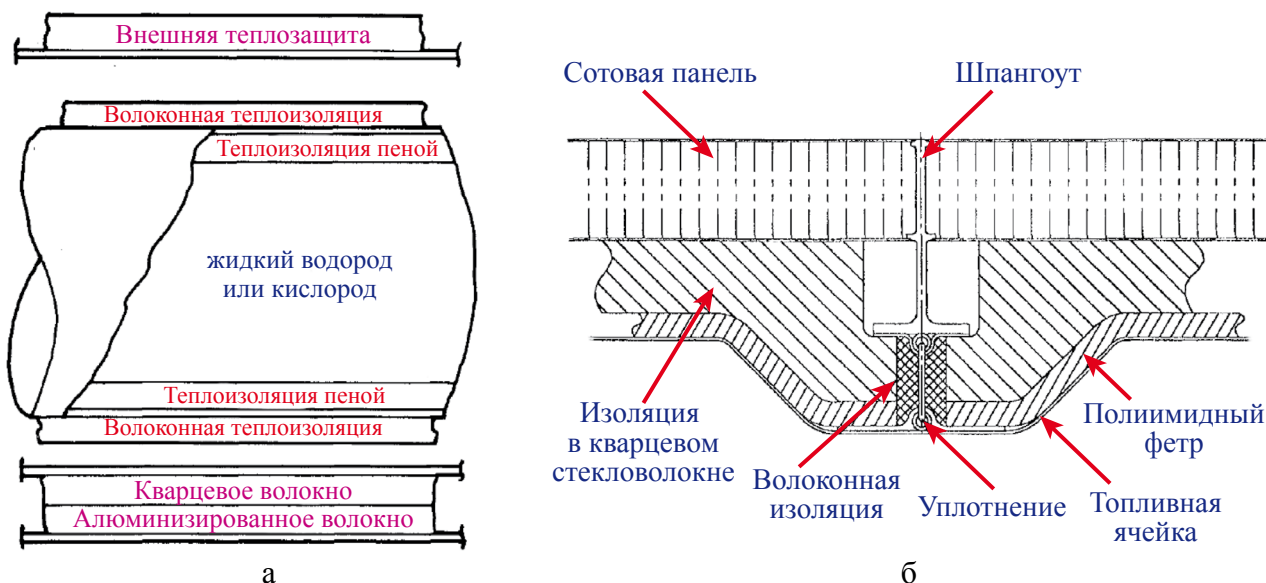


Рис. 8. а – теплоизоляция бака с криогенным топливом, б – теплоизоляция бака с углеводородным топливом

внешнего ТЗП на сложные теоретические обводы самолета. Тем не менее внутренняя теплоизоляция остается единственным вариантом защиты топлива от перегрева на больших сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях полета. Примеры теплоизоляции баков приведены на рисунке 8 [18, 19].

Другим вариантом обеспечения теплового режима гиперзвуковых ЛА является организация активного охлаждения наиболее нагретых участков планера и элементов силовой установки. Предполагаемые зоны размещения такой теплозащиты: отсек бортового оборудования, панели воздухозаборника

и сопла, камера сгорания прямоточных двигателей. В качестве хладагента может выступать как авиационное топливо, так и вспомогательный теплоноситель, в случае если возможностей топливной системы для охлаждения недостаточно.

Ключевым свойством, определяющим возможность использования топлива для систем активного охлаждения ГЛА, является его хладоресурс, который согласно [8] определяется выражением:

$$XP = \int_{T_{\text{исх}}}^{T_{\text{мах}}} c_p dT + \sum q_{\text{т.эф}}, \text{ МДж/кг}, \quad (1)$$

Таблица 2

Топлива для ГЛА

Тип топлива	Удельная теплота сгорания, КДж/кг	Плотность топлива, кг/м ³	Энергоемкость, МДж/м ³	Температура кипения, °С	Хладоресурс, КДж/кг
Керосин	43 500	700–800	33 250	126–316	930
Метилциклогексан	45 800	770	20 564	101	2080
Сжиженный метан	48 500–62 860	480–500	20 594	–161	2950
Водород	128 823	70,8	8220	–253	18 000

где C_p – удельная теплоемкость топлива при постоянном давлении.

Хладоресурс зависит от теплоемкости горючего, а также диапазона температур его возможного подогрева. У керосина он ограничен термостабильностью (~530 К), а у водорода лимитируется только характеристиками прочности и жаростойкости охлаждаемых элементов ГЛА. При расчете хладоресурса должны учитываться тепловые эффекты $q_{т.эф}$, возникающие в топливе при его нагреве (плавление, испарение и пр.). В таблице 2 приведены некоторые физико-химические характеристики основных типов топлив, рассматриваемых при разработке технического облика ГЛА.

В дополнительных контурах жидкостного или газового охлаждения могут быть использованы вода (пар), аммиак, гелий и кремнийорганические жидкости. Последние наиболее оптимально сочетают

в себе теплофизические свойства с характеристиками безопасности.

Рисунок 9 иллюстрирует возможную логику организации дополнительных охлаждающих контуров вместе с основным топливными магистралями на примере мотогондолы комбинированной СУ [20]. В данной схеме высокотемпературное топливо предварительно подогревается хладагентом с последующей эндотермической реакцией в модулях топливозжидкостных теплообменников (ТЖТ). Наибольшей эффективности система достигает на теплонагруженном этапе разгон-набора высоты при максимальном расходе топлива, обеспечивающем наибольший располагаемый хладоресурс в единицу времени. Кроме того, нагрев топлива в определенных пределах за счет подвода дополнительной теплоты увеличивает его удельный импульс, повышая тягу СУ.

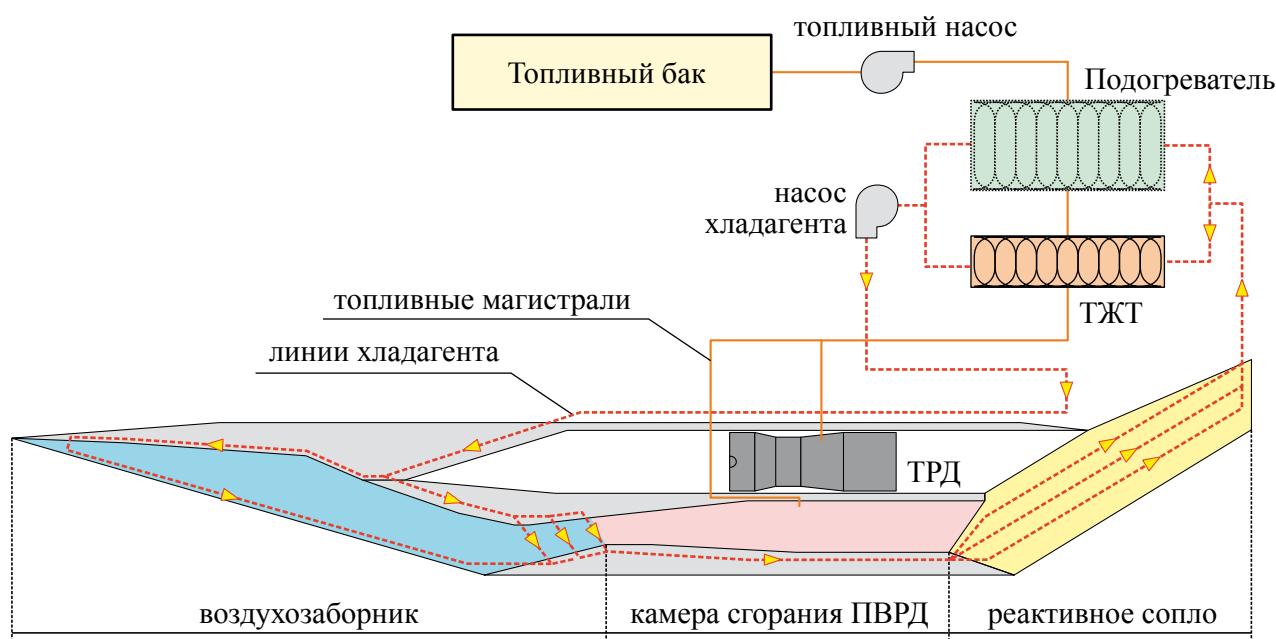


Рис. 9. Система тепловой защиты с активным охлаждением на основе углеводородного топлива и дополнительного хладагента



В статье [21] описывается построение системы тепловой защиты гиперзвукового пассажирского самолета на водородном топливе с крейсерской скоростью полета $M_n = 8$. Хотя работа посвящена пилотируемому ЛА, материалы научного исследования достаточно полно отражают практическую ценность использования базового хладоресурса как жидкого водорода, так и процессов испарения в баках. Система включает в себя пассивную теплоизоляцию топливных емкостей, а также магистрали активного охлаждения кабины и силовой установки. Тепловой режим кабины поддерживается циркуляцией части испарившегося топлива, которое затем смешивается с остальной его частью и подается в теплообменники силовой установки, а также систему кондиционирования. Дополнительно в охлаждении двигателей участвует само жидководородное топливо. Описанная система тепловой защиты сформирована из условий работы в течение 10 000 секунд, при этом максимальные потребные расходы охладителей составляют 100 кг/с для скорости полета $M_n = 2,5$, 65 кг/с для $M_n = 6$ и 40 кг/с для $M_n = 8$. Идея задействования в системе охлаждения паров водорода может найти применение в том числе и на беспилотных высокоскоростных ЛА.

Помимо самостоятельного использования активного охлаждения в системах тепловой защиты гиперзвуковых самолетов,

возможна также его интеграция с пассивными теплозащитными покрытиями. В работе [22] приведены результаты исследования совместного применения активного охлаждения и пассивной теплозащиты для самолета-разгонщика АКС с максимальным числом Маха $M = 8$ на высоте 60 км. Аналитические расчеты и математическое моделирование показали, что активная теплозащита с магистралями охлаждающего топлива способна снизить массу теплозащитных покрытий на 40 % от базовой (температура поверхности под ТЗП 330 К). Такой способ оказался более эффективным, чем повышение допустимой температуры конструкции под теплозащитой от 330 до 440 К (снижение массы ТЗП – 30,1 %). С учетом того, что повышение рабочих температур связано с применением более тяжелых жаропрочных и жаростойких материалов, суммарный выигрыш по массе планера ЛА может быть увеличен.

Другим перспективным направлением активного теплосъема является применение термоэлектрогенерирующих устройств в интересах системы электроснабжения самолета [23]. Оптимальным местом их размещения, помимо передних кромок ГЛА, является двигательный отсек прямоточного контура, в котором необходимо обеспечить выработку электроэнергии при отсутствии движущихся частей традиционного привода-генератора.

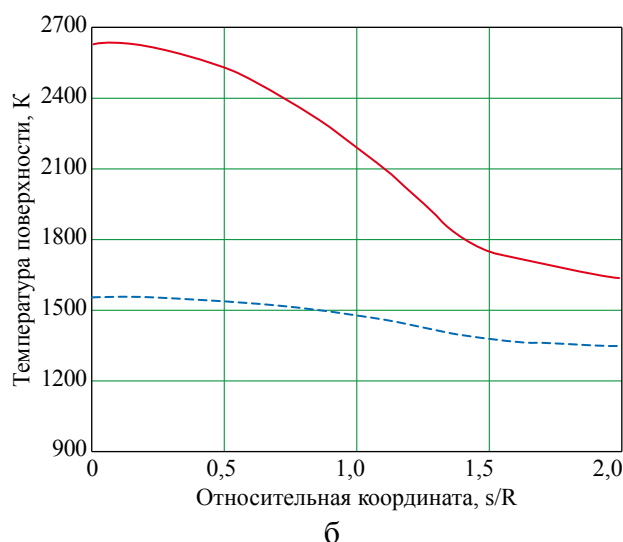
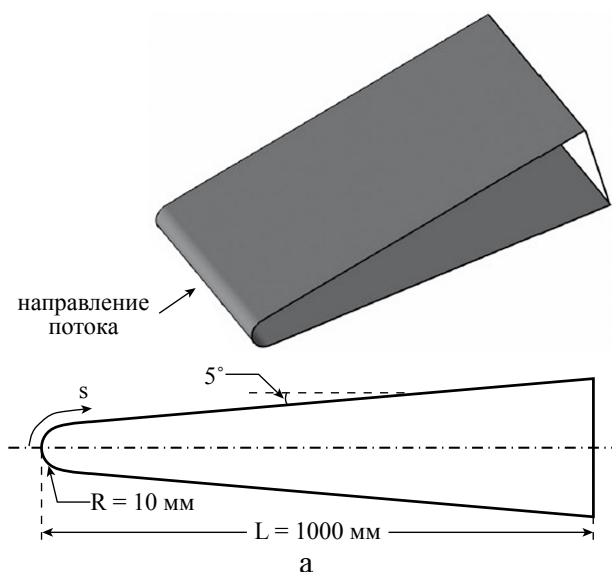


Рис. 10. Влияние эффекта термоэмиссии на равновесную температуру поверхности (а – внешний вид модели клина, б – график зависимости температуры от координаты)

— без эффекта термоэмиссии; — с эффектом термоэмиссии, ограниченного температурой материалов

Таблица 3

Параметры термоэлектрических материалов

Материал	Напряжение, В	Мощность, кВт	Удельная масса, кг/кВт	Общее кол-во энергии, кВт*ч
Обычный ТЭМ Bi_2Te_3	до 5,0	до 76	0,88–3,85	45,16–94,76
Квантовые наноструктуры Si/SiGe	до 35,5	до 228	0,09–0,39	135,5–284,3

Так, в публикации [24] показано, что при гиперзвуковых скоростях порядка 5 км/с на высоте 30 км равновесная температура пластины под углом 5° к набегающему потоку составит около 2300 К. Использование термоэлектронной эмиссии уменьшает данные показатели до 1500–1750 К в зависимости от эффективности катода и анода. Для еще больших высот и скоростей ($V = 6$ км/с, $H = 60$ км) снижение температуры поверхности затупленного клина при использовании термоэлектриков показано в статье [25] (см. рис. 10).

По некоторым оценкам, удельная электрическая мощность, снимаемая с единицы внутренней поверхности защищаемого участка ГЛА, составит 5–25 Вт/см² [26]. Тем не менее известные на сегодня термоэлектрические материалы не обладают достаточной удельной прочностью, что не позволит использовать их в качестве конструкционных. В таблице 3 перечислены основные параметры современных термоэлектрических материалов [27].

Отдельно необходимо отметить возможность снижения тепловых потоков за счет модификации базовой аэродинамической компоновки (АДК): увеличения углов стреловидности

несущих поверхностей и радиуса закруглений носка крыла и передних кромок наплывов, уменьшения площади омываемой поверхности за счет «уплощения» исходных аэродинамических обводов. В работе [28] приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований теплового нагружения комбинации «пластина – часть крыла» при числе Маха полета $M_\Pi = 8$. Вид экспериментальной установки и безразмерные зависимости теплового потока для передних точек консоли показаны на рисунке 11. Величины теплового потока для пластины перед крылом показаны на рисунке 12. Продувки в гиперзвуковой аэродинамической трубе были выполнены при углах стреловидности консоли 45° , 55° и 65° . Можно видеть, что увеличение стреловидности крыла на 20° снижает тепловой поток по передним точкам примерно в 3–3,5 раза, а на поверхности пластины – в 2 раза. В статье [29] приведен график зависимости теплового потока от радиуса затупления передней кромки для чисел Маха $M = 6$, 7 и 8 по траектории полета с максимальным скоростным напором 48 кПа (см. рис. 13). Увеличение радиуса в 100 раз дает 10-кратное уменьшение теплового потока к «холодной» стенке.

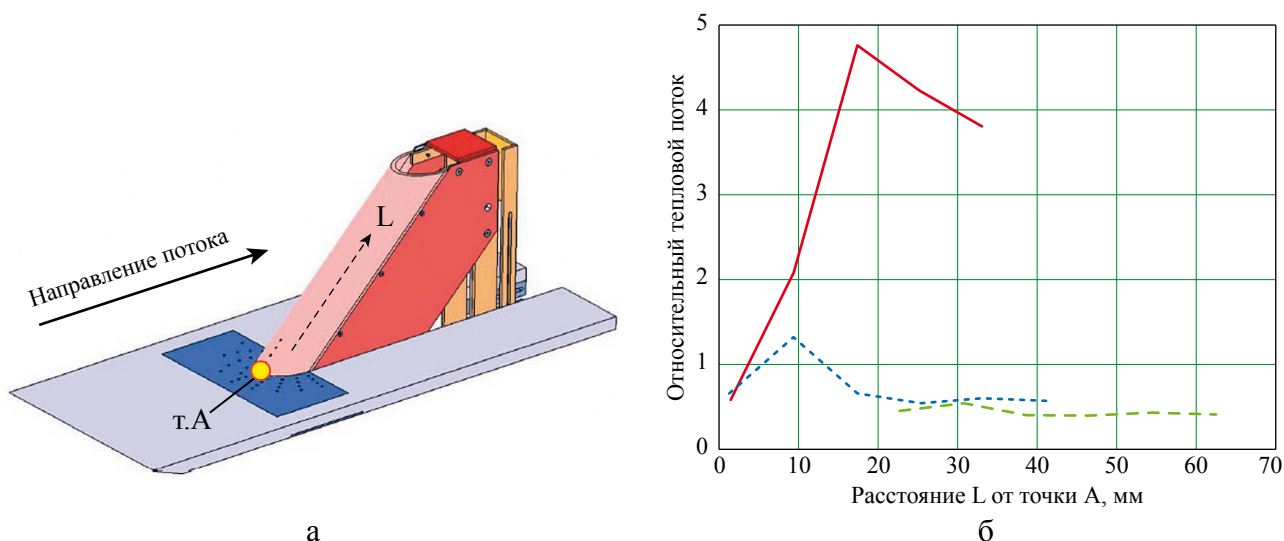


Рис. 11. а – внешний вид экспериментальной модели для изучения обтекания гиперзвуковым потоком консоли, б – зависимость теплового потока от продольного расстояния L по передней кромке и угла стреловидности консоли
— 45°; — 55°; — 65°

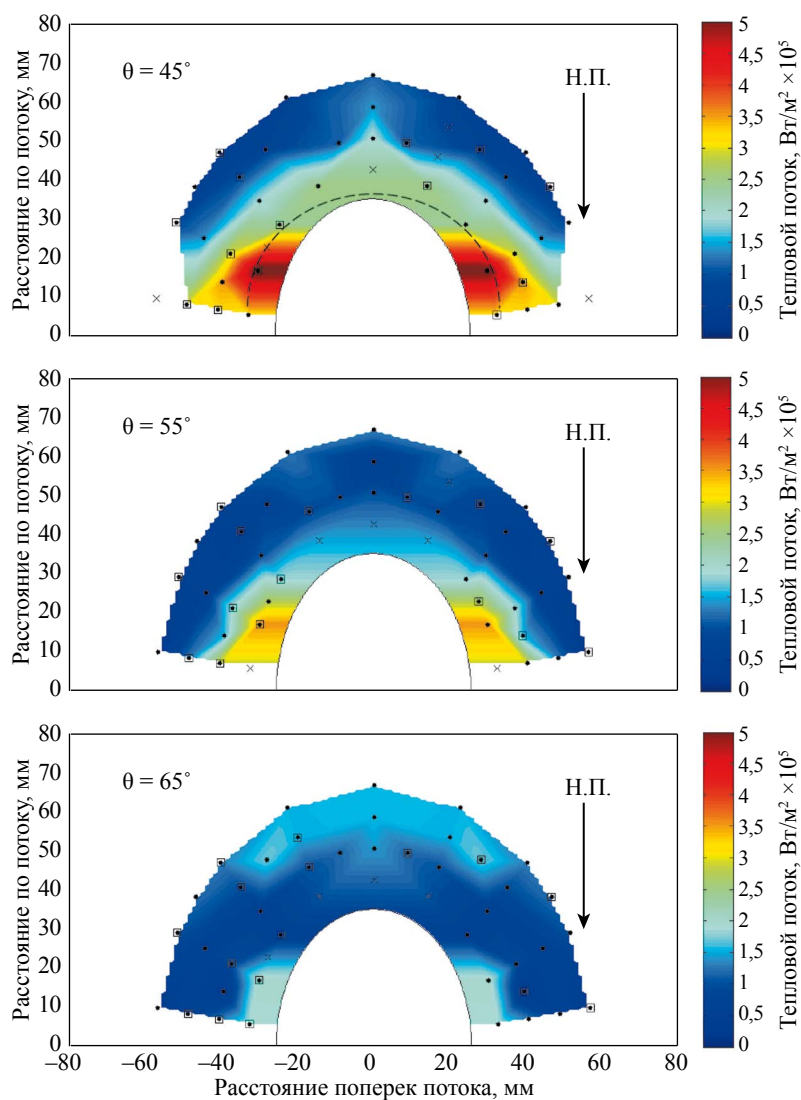


Рис. 12. Тепловой поток на поверхности пластины вблизи консоли крыла

Несмотря на улучшение условий теплового нагружения, изменение параметров базовой АДК существенно влияет на реализуемые летно-технические характеристики во всем диапазоне высот и скоростей полета ГЛА. Поэтому данный метод не может считаться основным при создании такого класса летательных аппаратов.

Для минимизации площади охлаждаемых поверхностей сжатия и расширения комбинированной СУ предполагается использование так называемых пространственных конвергентной (для воздухозаборника) и дивергентной (для сопла) схем. В таких конфигурациях воздушный поток системой сверхзвуковых скачков «разворачивается» в направлении оси канала или от нее

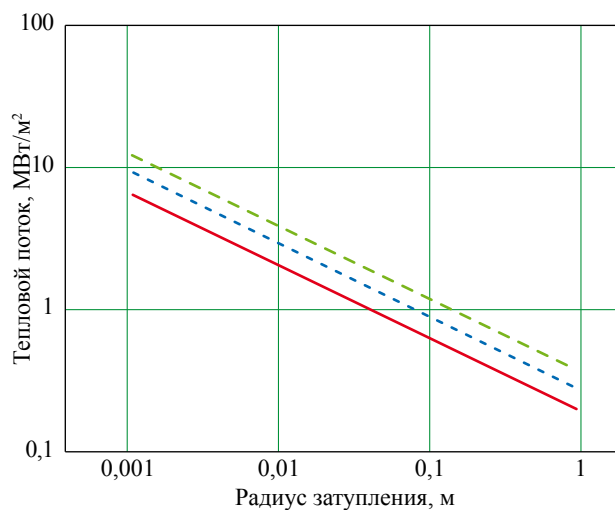


Рис. 13. Влияние радиуса затупления передней кромки на тепловой поток к «холодной» стенке
— $M = 6$; — $M = 7$; — $M = 8$

соответственно. На рисунке 14 показана возможная геометрия такого воздухозаборника, а также пример использования пространственного воздухозаборника вместе с дивергентным соплом в компоновке скоростного ЛА [30, 31]. Рисунок 15 иллюстрирует качественное сравнение плоской и пространственной конфигурации элементов СУ в части потребной доли охлаждаемой поверхности. В данном случае под плоской схемой понимается наличие вертикального или горизонтального клина торможения совместно с двухмерным соплом.

Выводы

Каждый из рассмотренных в статье существующих и перспективных методов теплозащиты в отдельности не позволит в полной мере разработать тепловую защиту перспективных многоразовых гиперзвуковых ЛА. Вследствие этого для определения рациональных вариантов обеспечения тепловых режимов таких самолетов сформирована комплексная система теплозащиты, схема которой показана на рисунке 16. Особенности данной системы являются:

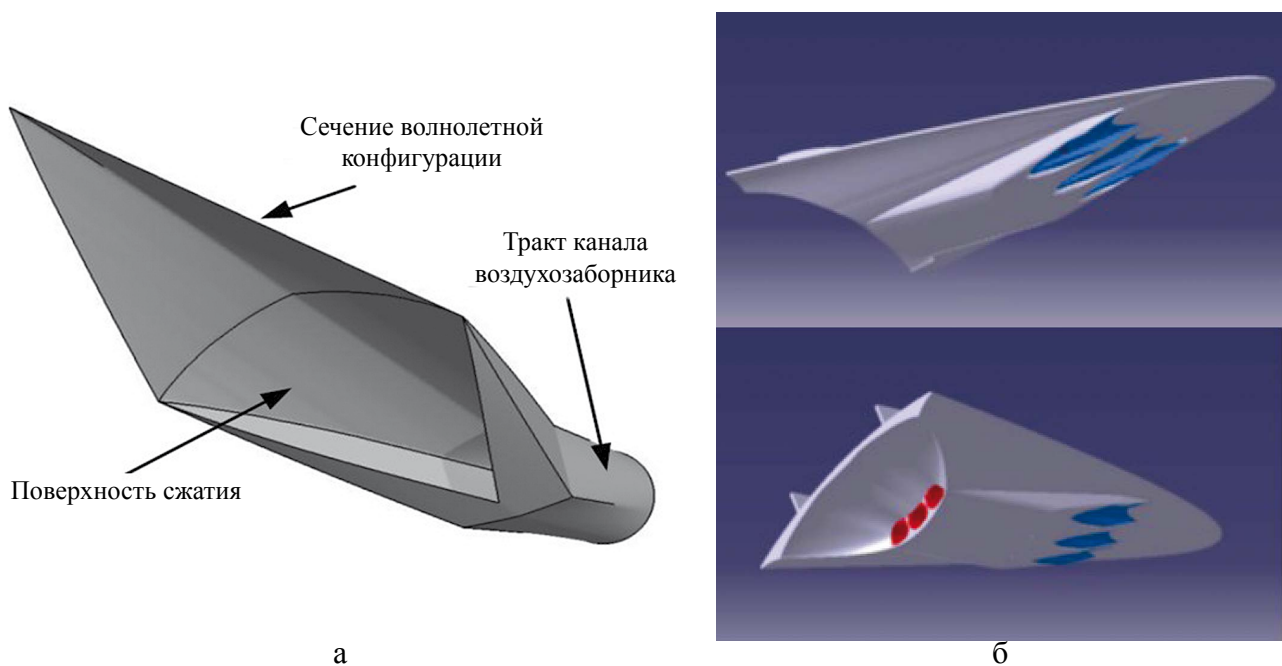


Рис. 14. а – возможная схема конвергентного воздухозаборника, б – пример использования пространственных конфигураций воздухозаборника и сопла на высокоскоростном ЛА

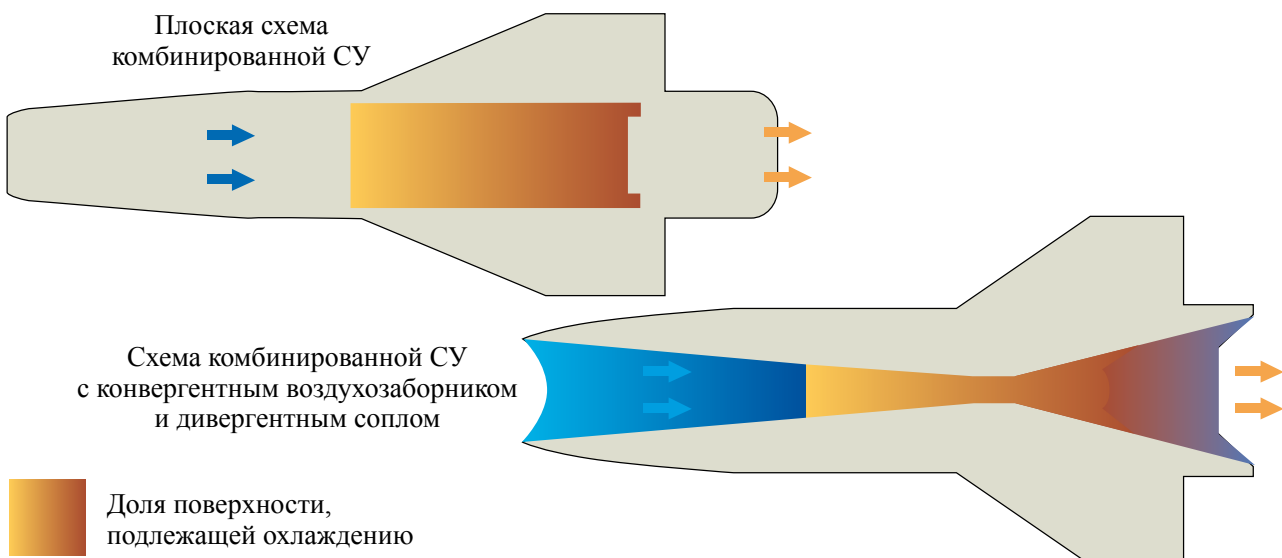


Рис. 15. Сравнение плоской и пространственной схем комбинированной СУ ГЛА в части необходимости охлаждения

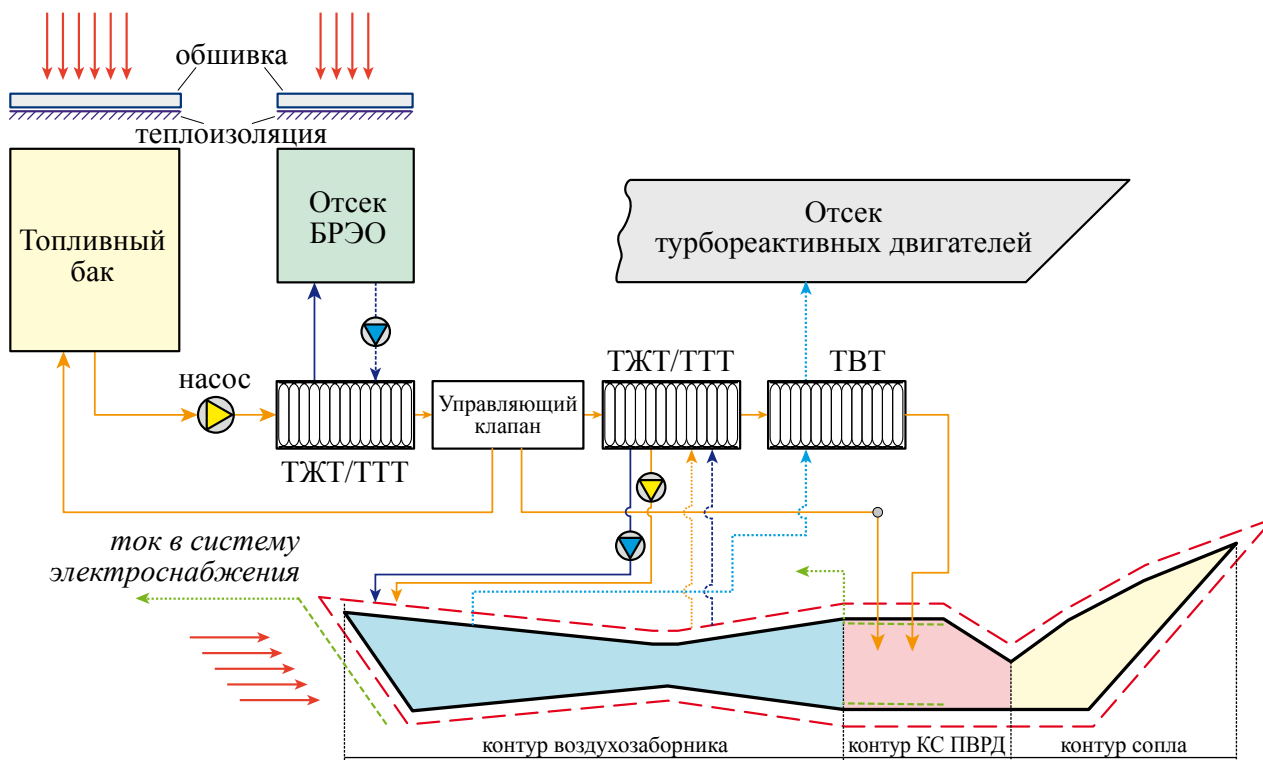


Рис. 16. Принципиальная схема комплексной системы тепловой защиты многоразового высокоскоростного ЛА.

ТЖТ – топливо-жидкостный теплообменник, ТТТ – топливо-топливный теплообменник,

ТВТ – топливо-воздушный теплообменник

— топливная магистраль; — магистраль хладагента; - - - обратная магистраль топлива;
- - - обратная магистраль хладагента; - - - отбираемый воздух; - - - ТЭГ-панели на передних кромках планера и в КС ПВРД; - - - панели охлаждения ПВРД; - - - набегающий воздушный поток

- 1) отказ от внешней пассивной теплозащиты;
- 2) использование внутренней теплоизоляции в зонах бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) и топливных емкостей;
- 3) охлаждение дополнительным хладагентом отсека БРЭО и элементов комбинированной силовой установки;
- 4) использование топливных магистралей для активного охлаждения элементов комбинированной силовой установки;
- 5) организация отбора воздуха в воздухозаборнике для охлаждения турбореактивных

двигателей на участке работы прямоточного контура;

- 6) использование термоэлектрических генераторов в зоне передних кромок планера и камеры сгорания прямоточных двигателей.

Следует отметить, что в общем случае возможна инвариантность размещения (показана в таблице 4) тех или иных элементов системы в соответствующих элементах конструкции аппарата. Цифрой «1» в таблице отмечено использование, а индексом «0» – отсутствие рассматриваемого элемента в выбранном объеме компоновки самолета.

Таблица 4

Использование элементов системы тепловой защиты в техническом облике гиперзвукового ЛА

Элемент системы тепловой защиты	Область применения					
	Головная часть фюзеляжа	Отсек БРЭО	Передние кромки несущих поверхностей, оперения, воздухозаборника	Топливный бак	Камера сгорания ПВРД	Стенки сопла
Горячая конструкция	1	0	1	0	0	0
Пассивная теплоизоляция	0	1	0	1	1	1
Активное охлаждение	0	1	1	0	1	1
Термоэлектрики	1	0	1	0	1	0



Таким образом, возникает задача выбора (проектирования) рационального варианта тепловой защиты высокоскоростного ЛА, которая формулируется следующим образом: из множества альтернативных вариантов тепловой защиты (ВТЗ_і), характеризующихся показателями эффективности (E_i), затратами (C_i), сроками (T_i) и техническими рисками (R_i) разработки, определить на основе многокритериальной оценки рациональный вариант (РВТЗ), с максимальным значением обобщенной функции полезности (Ψ), т.е. найти:

$$РВ_{ТЗ} = \operatorname{argmax} \Psi (\{E_i\}, \{C_i\}, \{T_i\}, \{R_i\}). \quad (2)$$

Поиск рационального варианта такой комплексной системы тепловой защиты возможно выполнить с использованием методов нахождения Парето-оптимальных решений многокритериальных задач.

Список литературы

1. Steelant J. Sustained Hypersonic Flight in Europe: Technology Drivers for LAPCAT II. // AIAA 2009-7240, 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic System Technologies Conference paper, Germany, 2009. 8 p.
2. Steelant J., Langener T. The LAPCAT-MR2 hypersonic cruiser concept // Paper in 29th Congress of the international council of the aeronautical sciences paper, Russia, 2014. 8 p.
3. URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/High-Speed_Experimental_Fly_Vehicles_-_INternational.
4. URL: <http://www.bbc.com/future/story/20150914-the-challenges-of-building-a-hypersonic-airliner>.
5. Плохих В.П., Бузулук В.И. О перспективах развития многоразовых систем выведения горизонтального старта: сб. науч. трудов / Проблемы создания перспективной авиационно-космической техники. Под ред. В.Г. Дмитриева. М.: Физматлит, 2005. 648 с.
6. Балмина Р.В., Губанов А.А., Иванькин М.А., Лапинский Д.А. Состояние и перспективы разработки гиперзвукового вооружения // Техническая информация. ЦАГИ. 2012. Вып. 1–2. 72 с.
7. URL: <https://www.space.com/41042-boeing-hypersonic-passenger-plane-concept.html>
8. Нечаев Ю.Н. Силовые установки гиперзвуковых и воздушно-космических летательных аппаратов. М.: Академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 1996 203 с.
9. Zuchowski B. Air vehicle integration and technology research // AFRL-RQ-WP-TR-2012-0280 final report, Lockheed Martin Aeronautics Company, 2012, 192 p.
10. Лазарев В. Исследования конструкции гиперзвуковых летательных аппаратов с использованием крупномасштабных моделей // Техника воздушного флота. ЦАГИ. 2010. Вып. 4 (701). С. 1–16.
11. Tzong G. Jacobs R., Liguore S. Air vehicle integration and technology research // AFRL-RB-WP-TR-2010-3068 final report, the Boeing Company, 2010. 169 p.
12. Bouchez M. Scramjet thermal management // Educational notes, RTO-EN-AVT-185. 2010. P. 13-1–13-30.
13. Балинова Ю.А., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Бабашов В.Г., Чайникова А.С., Курбаткина Е.И., Большакова А.Н. Высокотемпературные теплозащитные, керамические и металлокерамические композиционные материалы для авиационной техники нового поколения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 2. С. 83–92. DOI: 10.38013/2542-0542-2020-2-83-92
14. Сорокин О.Ю., Гращенков Д.В., Солнцев С.С. и др. Керамические композиционные материалы с высокой окислительной стойкостью для перспективных летательных аппаратов (Обзор) // Труды ВИАМ. 2014. № 6. С. 8. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-8-8
15. Steelant J., Dalenbring M., Kuhn M., Bouchez M., von Wolfersdorf J. Achievements obtained within ATLLAS-II on aero-thermal loaded material investigations for high-speed vehicles // Paper in 21st AIAA International space planes and hypersonics technologies conference, China, 2017. 58 p.
16. Jingzhe Xiea, Ruiping Zhang, Gongnan Xiea, Oronzio Manca. Thermal and thermomechanical performance of actively cooled pyramidal sandwich panels // International Journal of Thermal Sciences, Volume 139, 2019. P. 118–128. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.02.002
17. Yingjie Xua, Ningxin Xua, Weihong Zhanga, Jihong Zhu. A multi-layer integrated thermal



protection system with C/SiC composite and Ti alloy lattice sandwich // *Composite Structures*, Volume 230, 2019. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111507

18. Shih P.K., Pruntyt J., Mueller R.N. Thermostructural Concepts for Hypervelocity Vehicles // *Journal of aircraft*. 1991. Vol. 28, No. 5. P. 337–345.

19. Stevens D.R., Moses P.L., Zane Pinckney S. Design of a hypersonic waverider-derived airplane // Paper in 31st Aerospace sciences meeting & exhibit. 1993. USA. 27 p.

20. Petley D.H., Jones S.C. Thermal management for a mach 5 cruise aircraft using endothermic fuel // *Journal of aircraft*. 1992. Vol. 29, No. 3. P. 384–389.

21. Balland S., et al. Thermal and energy management for hypersonic cruise vehicles – cycle analysis // Paper in 20th AIAA International space planes and hypersonic systems and technologies conference. Scotland, 2015. 11 p.

22. Jian-Jun Gou, Yue Chang, Zheng-Wei Yan, Bing Chen, Chun-Lin Gong. The design of thermal management system for hypersonic launch vehicles based on active cooling networks // ELSEVIER. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Вып. 159 (дата обращения: 18.01.2021).

23. Крыло гиперзвукового летательного аппарата в условиях его аэродинамического нагрева: пат. на полезную модель № 132050 Рос. Федерация: МПК В64С 1/38 / Колычев А.В., Горский В.В., Макаренко А.В., Денисенко А.А.; заявители и патентообладатели БГТУ Колычев А.В., Горский В.В., Макаренко А.В., Денисенко А.А. № 2013120647/11; заявл. 29.04.2013; опубл. 10.09.2013. Бюл. № 25.

24. Khrapko V.Yu. The concept of the combined thermal protection system for leading edges of hypersonic vehicles with use of thermionic emission // Conference Paper in XIII International Youth Scientific and Practical Conference

“Future of atomic energy – AtomFuture 2017”, KnE Engineering Volume (KnowledgeE). 2017. P. 465–472. DOI: 10.18502/48

25. Hanquist K.M., Hara K., Boyd I.D. Detailed modeling of electron emission for transpiration cooling of hypersonic vehicles // Paper in Journal of Applied Physics 121. 053302, 2017. DOI: 10.1063/1.4974961

26. Колычев А.В. Активная термоэмиссионная тепловая защита элементов конструкции гиперзвукового летательного аппарата при их аэродинамическом нагреве и границы ее применимости // Труды МАИ. 2013. Вып. 68. URL: <http://trudymai.ru/upload/iblock/18f/18f30b466d3ae79778a24965c2a26540.pdf?lang=en&issue=68> (дата обращения: 05.06.2019).

27. Останко Д.А. Перспективы применения термоэлектрических устройств на борту фронтового истребителя // Наука и технологии в промышленности. 2014. Вып. 1–2. С. 61–65.

28. Schwarz A. Experimental Study of Hypersonic Wing/Fin Root Heating at Mach 8. thesis submitted for the degree of Master of Philosophy at The University of Queensland, School of Mechanical and Mining Engineering. 2014. 94 p.

29. Kasen S.D., Queheillalt D.T., Steeves C.A., et al. A heat plate leading edge for hypersonic vehicles // Proceedings of IMECE2008 2008 ASME International mechanical engineering congress and exposition. 2008. USA. 8 p.

30. Kai Cui, Shou-Chao Hu, Guang-li Li, Yao Xiao. A conceptual design of next generation hypersonic air-breathing airplanes with dual waveriders forebody // Paper of 20th AIAA international space planes and hypersonic systems and technologies conference. Scotland. 2015. 12 p.

31. Smart M., Scramjets. In *Advances on Propulsion Technology for High-Speed Aircraft*. Educational Notes. RTO-EN-AVT-150, P. 9. Neuilly-sur-Seine, France: RTO, 2008. P. 9-1 – 9-38.



Об авторах

Аронов Дмитрий Ильич – аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета) кафедры 101 направления подготовки «Авиационная и ракетно-космическая техника» (проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов), Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: высокоскоростные летательные аппараты, тепловой баланс конструкции, двигателей и систем авиационной техники.

Клягин Виктор Анатольевич – заместитель начальника научно-исследовательского отделения ОКБ Сухого, кандидат технических наук, доцент кафедры 101 Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: внешнее проектирование и оценка эффективности авиационной техники, имитационное моделирование авиационных комплексов.

Advanced methods for organizing thermal protection of hypersonic aircrafts

Aronov D. I.¹, Klyagin V. A.^{1,2}

¹ *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation*

² *Sukhoi Design Bureau, Moscow, Russian Federation*

On the basis of analytical and experimental data, this paper presents possible levels of thermal loading of reusable hypersonic aircrafts. Methods for ensuring the thermal regime of such aircrafts using various passive and active thermal protection technologies are considered. The conducted analysis of the scientific and technical background in terms of the practical implementation of these technologies allowed the authors to draw the conclusion about the relevance and expediency of creating an integrated thermal protection system for reusable high-speed aircrafts.

Keywords: high-speed aircraft, hypersonic aircraft, thermal protection

Information about the authors

Aronov Dmitry Ilyich – Postgraduate Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Department 101 “Aviation and Rocket-space Technology” (design, construction and production of aircrafts).

Research interests: high-speed aircrafts, thermal balance of structures, engines and aircraft systems.

Klyagin Viktor Anatolyevich – Deputy Head, R&D Department, Sukhoi Design Bureau; Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Department 101, Moscow Aviation Institute (National Research University).

Research interests: external design and assessment of the effectiveness of aviation technologies, simulation of aviation systems.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-67-75>

УДК 621.45.053

Управление изменением поверхности горения зарядов твердого топлива за счет применения теплопроводных элементов

С. К. Савельев¹, Д. К. Щеглов^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Акционерное общество «Конструкторское бюро специального машиностроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

На основе известных экспериментальных данных по локальным значениям скорости горения конденсированных систем вдоль размещенных в них теплопроводных нитей построены регрессионные модели, связывающие значение локальной скорости горения с такими характеристиками теплопроводных нитей, как коэффициент температуропроводности и температура плавления. На основе полученной регрессионной модели оценено возможное расширение диапазона изменения локальной скорости горения при использовании в качестве теплопроводных нитей различных кристаллических форм CVD-алмазов. Показано, что локальное увеличение скорости горения может достигать 200-кратного превышения над базовым уровнем.

Показана возможность управления трансформацией поверхности горения за счет использования теплопроводных нитей с переменными характеристиками.

Ключевые слова: заряд твердого топлива, управление изменения поверхности горения, теплопроводные элементы

Для цитирования: Савельев С. К., Щеглов Д. К. Управление изменением поверхности горения зарядов твердого топлива за счет применения теплопроводных элементов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 1. С. 67–75. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-67-75>

For citation: Saveliev S. K., Shcheglov D. K. Controlling changes in the combustion surface of solid fuel charges through the use of heat-conducting elements // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 1. P. 67–75. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-67-75>

Поступила 24.11.2020 Отрецензирована 11.12.2020 Одобрена 03.02.2021 Опубликована 17.02.2021

Введение

Еще в 40-е годы XX столетия было обнаружено, что локальную скорость горения конденсированных систем (КС) можно изменять в широком диапазоне значений за счет введения в КС теплопроводных элементов (ТЭ). Как правило, в качестве теплопроводных элементов используются проволоки диаметром от нескольких десятков до трех-четырех сотен микрометров. Проволочные ТЭ могут быть выполнены как в виде длинных нитей, располагаемых по оси массива КС, так и в виде коротких

отрезков нитей, хаотически расположенных в массиве КС.

В 60–70-е годы XX столетия вопрос использования ТЭ в КС был подробно исследован экспериментально [1–3]. Параллельно с экспериментальными исследованиями было предложено несколько численных и аналитических моделей, описывающих рассматриваемое явление [4–9]. Особо следует выделить работы Н.Н. Бахмана и И.Н. Лобанова [5, 6], в которых была предложена и проанализирована относительно простая, но в то же время и высокоэффективная аналитическая модель рассматриваемого объекта.



В работах [1–3] были экспериментально определены основные зависимости скорости горения КС от характеристик материала ТЭ и его диаметра, состава КС и давления окружающей среды. Показано, что в одинаковых условиях скорость перемещения горячей поверхности КС вдоль ТЭ (обозначим ее как w), как правило, выше, чем линейная скорость горения (u) этой КС. Отношение скоростей w и u будем называть коэффициентом увеличения скорости горения (КУСГ) КС. Обозначим эту величину как $Ku = w/u$.

В данной работе проведено обобщение известных экспериментальных данных по зависимости Ku от характеристик используемого ТЭ, построена уточненная аналитическая модель воздействия ТЭ на горение КС. На основе полученных результатов рассмотрена возможность расширения диапазон регулирования скорости горения КС с ТЭ.

1. Анализ экспериментальных данных по использованию теплопроводных элементов для регулирования локальной скорости горения

1.1. Известные экспериментальные данные. Анализ неопределенностей

Основным источником экспериментальных данных по влиянию ТЭ на скорость горения является работа [2], в которой представлены данные по коэффициенту увеличения скорости горения Ku вдоль ТЭ для проволок диаметром 200 микрон, выполненных из различных материалов. Данные по КУСГ из [2] и теплофизические характеристики соответствующих материалов ТЭ, принятые авторами данной работы для последующего анализа, представлены в таблице. Последней строкой в таблицу

добавлены данные по характеристикам КС, на котором проводилось определение КУСГ. Точные характеристики этой КС неизвестны, поэтому для нее использованы значения, соответствующие типичным двухосновным КС [10], а вместо температуры плавления $T_{пл}$ взято значение температуры поверхности горения. Для остальных материалов значения коэффициента теплопроводности λ и температуропроводности α приведены для температуры 300 °С (573 К), что примерно соответствует температуре поверхности горячей КС.

Произведем построение регрессионной модели зависимости КУСГ от определяющих эту величину факторов.

Исследователи обсуждаемой проблемы сходятся в том, что в качестве факторов, определяющих КУСГ, должны использоваться коэффициент температуропроводности ТЭ и температура плавления ТЭ.

Определенные проблемы при построении регрессионной модели создает то, что в известных экспериментальных работах отсутствует информация о точности определения значений КУСГ. В связи с этим будем исходить из общих представлений о точности выполнения экспериментов по определению скорости горения КС.

1.2. Построение регрессионных моделей

Рассмотрены две регрессионные модели, различающиеся количеством использованных факторов:

$$Ku = b_0 + b_1 \cdot \alpha + b_2 \cdot \alpha^2 + b_3 \cdot T_{пл}, \quad (1)$$

$$Ku = b_0 + b_1 \cdot \alpha + b_2 \cdot \alpha^2, \quad (2)$$

где b_i – коэффициенты соответствующих регрессоров, входящих в модель.

Таблица

Свойства материалов ТЭ

Материал	λ , Вт/м·К	α , м ² /с	$T_{пл}$, К	Ku
Сталь	80	2,22965E–05	1477	1,6
Магний (<i>Mg</i>)	156	8,74685E–05	927	1,9
Алюминий (<i>Al</i>)	237	1,02447E–04	937	2,3
Платина (<i>Pt</i>)	72	2,56232E–05	2054	2,9
Вольфрам (<i>W</i>)	174	6,86431E–05	3699	3,6
Медь (<i>Cu</i>)	401	1,19345E–04	1362	4,6
Серебро (<i>Ag</i>)	429	1,7386E–04	1237	5,3
КС	0,16	2,0E–07	577	1,0



При оценке коэффициентов регрессионных моделей следует учитывать то, что в точке факторного пространства, соответствующей КС без ТЭ, значение Ku определяется существенно точнее, чем для горения КС с ТЭ. Абсолютные значения неопределенностей для Ku неизвестны. Анализ полученных ниже моделей показал, что изменение отношения указанных неопределенностей в диапазоне от 2 до 30 дает очень близкие значения коэффициентов модели. Поэтому для определенности положим, что среднеквадратические ошибки определения Ku для всех материалов таблицы (за исключением «КС») одинаковы и в три раза превышают среднеквадратическую ошибку определения Ku для «КС». Приведенные допущения позволяют сформировать весовую матрицу, обеспечивающую учет различного вклада точек факторного пространства в результирующую регрессионную зависимость.

Оценка вектора коэффициентов регрессионного соотношения (1) при сделанных допущениях имеет вид $b^T = (0,972, -3519, 1,069e^8, 7,604e^{-4})$, а для соотношения (2) $b^T = (1,672, 7310, 4,995e^7)$. Качество получающихся зависимостей можно оценить по графику, представленному на рисунке 1, на котором по оси абсцисс откладываются эмпирические значения КУСГ, а по оси ординат – предсказанные значения этой величины, рассчитанные по моделям (1) и (2) в тех же точках факторного пространства, в которых проводились эксперименты.

Данные, приведенные на рисунке 1, показывают, что двухфакторная модель (1) дает существенно лучшее описание, чем однофакторная модель (2). Проверка значимости регрессоров, входящих в эту модель, подтверждает это утверждение. Оценка коэффициента множественной корреляции R модели (1) имеет величину 0,985, и она значима (эмпирическое значение F критерия равно 32,43 при числах степеней свободы 4 и 4) как на уровне 0,95, так и уровне 0,9. На основе приведенных результатов примем для последующего рассмотрения модель (1) в качестве эмпирической модели для описания зависимости КУСГ от характеристик материала ТЭ.

1.3. Экстраполяция в область высоких значений теплопроводности

Предыдущие исследователи рассмотрели применение ТЭ практически из всех доступных на тот момент материалов. Однако вне этого анализа оказался углерод, на основе которого за последнее время были получены очень интересные для развития обсуждаемого направления материалы. Известно, что среди «натуральных» материалов наивысшей теплопроводностью обладает натуральный алмаз [11]. Использование этого материала в рассматриваемой задаче по технологическим причинам не представляется возможным. Однако в настоящее время существует хорошо отработанная технология получения искусственных алмазов CVD diamond.

Произведем оценку возможности расширения диапазона КУСГ за счет использования нити из CVD алмаза. Примем коэффициент температуропроводности такого материала сорта «single crystal, optical grade» на уровне $0,001 \text{ м}^2/\text{с}$ [11]. Расчет по соотношению (1) дает значение Ku около 100, а для поликристаллического алмаза оптического качества, имеющего значение коэффициента температуропроводности на уровне не ниже $0,0005 \text{ м}^2/\text{с}$, дает оценку $Ku = 26$. Таким образом, использование CVD алмазных нитей может позволить принципиально расширить диапазон достижимых

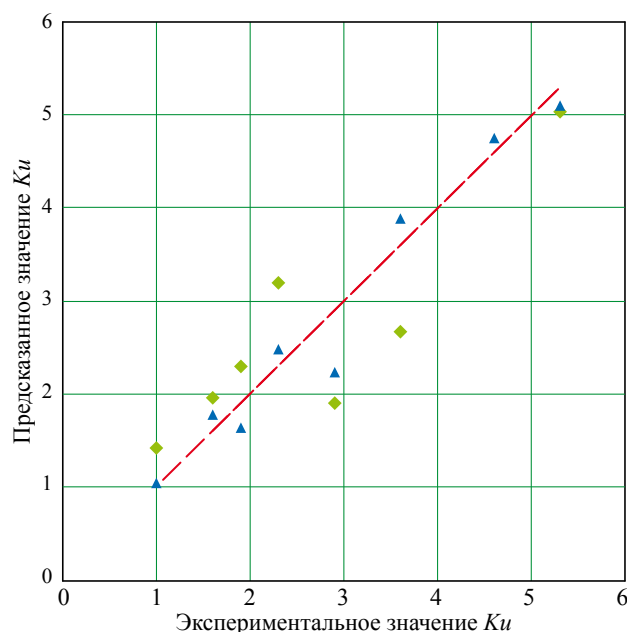


Рис. 1. Треугольники – модель (1), ромбы – модель (2)



скоростей горения КС с возможной перспективой доведения скорости горения по нити до уровня 1 м/с.

Дополнительными положительными преимуществами применения ТЭ из углерода является то, что продукты сгорания такого материала, в отличие от металлических ТЭ, незначительно изменяют результирующий состав продуктов сгорания КС, т.е. не будут приводить к дополнительным потерям удельного импульса даже в случае использования значительного количества ТЭ.

2. Аналитическая модель для скорости горения при использовании теплопроводных элементов

2.1. Анализ и корректировка модели Бахмана – Лобанова

В работах [5, 6] представлена аналитическая модель, описывающая воздействие ТЭ в форме однородной по длине проволоки постоянного диаметра на скорость горения КС. Эта модель базируется на использовании соотношений, описывающих баланс потоков энергии, поступающей от газовой фазы, затрачиваемой на нагрев ТЭ и прилегающего слоя КС.

Однако при формировании описываемого соотношения авторы [5] для описания потока тепла, снимаемого с проволоки в КС, градиент температуры в КС оценили по величине нормальной скорости горения u , в то время как градиент температуры по нормали к поверхности проволоки в зоне контакта проволоки и КС должен быть выше из-за более высокого значения локальной скорости горения в этой области. Для оценивания этого градиента представляется необходимым использовать локальное значение скорости перемещения фронта горения вдоль проволоки w .

Такая замена заметно усложняет разрешение получаемых соотношений, но обеспе-

чивает более точное описание наблюдаемых данных.

Следуя работе [5], запишем уравнения баланса тепла с учетом сделанного выше замечания

$$\bar{\alpha} \left(T_f - \frac{T_{lq} - T_s}{2} \right) \pi D \Delta = w \pi \frac{D^2}{4} \rho_M C_M (T_{lq} - T_0) + w \pi D \frac{\lambda_{cp}}{w} (T_s - T_0), \quad (3)$$

где Δ – длина отрезка проволоки, который выступает над поверхностью КС, D , ρ_M , C_M – диаметр, плотность и теплоемкость проволоки; λ_{cp} – коэффициент теплопроводности КС; T_0 , T_s и T_{lq} , T_f – температуры начальная, поверхности горячей КС, плавления проволоки и газообразных продуктов сгорания КС соответственно; $\bar{\alpha}$ коэффициент теплообмена между продуктами сгорания и проволокой.

Коэффициент $\bar{\alpha}$ определим по критериальному соотношению для теплообмена на пластине [12]:

$$Nu(D) = 0,332 \sqrt{Re_D}^3 \sqrt{Pr}, \quad (4)$$

в котором Nu , Re , Pr соответственно число Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля. Две первых величины рассчитываются по диаметру проволоки и параметрам продуктов сгорания.

Уравнение (3) содержит две неизвестных величины: локальное значение скорости горения w и длину отрезка проволоки, выступающего в поток Δ .

Для разрешения этой проблемы, следуя соображениям, предложенным в [5], добавим еще одно соотношение теплового баланса между теплом, затрачиваемым на прогрев отрезка проволоки и прилегающего слоя КС от $T = T_0$ до $T = T_s$, и потоком тепла по проволочке в сечении $T = T_s$.

$$w(T_s - T_0) \left(\frac{D}{4} \rho_M C_M + \frac{\lambda_{cp}}{w} \right) = \frac{D^2}{4} \lambda_M \frac{T_{lq} - T_s}{\Delta}. \quad (5)$$

Решая систему соотношений (3–5), получим следующее выражение для локальной скорости горения вдоль ТЭ

$$w = \frac{-2\lambda_{cp}(A+1)+2 \sqrt{\lambda_{cp}^2(A+1)^2 - 4A\lambda_{cp}^2 + D\lambda_m \bar{\alpha} \left(T_f - \frac{T_{lq} - T_s}{2} \right) \left(\frac{T_{lq} - T_s}{(T_s - T_0)(T_{lq} - T_0)} \right)}}{D\rho_M C_M}, \quad (6)$$

где $A = \frac{T_s - T_0}{T_{lq} - T_0}$.



Сравним значения w , рассчитанные из (6), с имеющимися в литературе опытными данными, представленными в таблице.

На рисунке 2 представлено сопоставление экспериментальных данных из таблицы с результатами расчетов по соотношениям (3–5) при следующих значениях параметров КС: $D = 500$ мкм, $\lambda_{cp} = 0,227$ В/м·С, $T_f = 3000$ °С, $T_s = 600$ °С, $T_0 = 25$ °С.

На графике представленном на рисунке 3, отчетливо просматривается квадратичный тренд, удаление которого из теоретической зависимости должно дополнительно существенно повысить прогностическое качество расчетных соотношений.

2.2. Анализ дополнительных возможностей регулирования изменения поверхности горения заряда с помощью теплопроводных элементов

На основе изложенных выше соображений можно предложить новый способ управления изменением поверхности горения зарядов с ТЭ – использование ТЭ с переменными по длине характеристиками, влияющими на значение локальной скорости горения. Как показано выше, таких величины две: диаметр проволоки и теплопроводность.

Представляется, что вторая из этих возможностей проще в реализации, чем первая, и может быть осуществлена за счет нанесения в определенных зонах на теплопроводный элемент того или иного покрытия.

Реализация управления скоростью горения за счет изменения диаметра проволоки, как это видно из графика, представленного на рисунке 4, требует значительных изменений диаметра, что представляется довольно затруднительным.

В данной работе рассмотрим управление скоростью горения при использовании теплопроводных элементов с переменной теплопроводностью. Проиллюстрируем применение данного приема для регулирования характера изменения поверхности горения заряда двигателя ПЗРК 9К38 «Игла» [13].

Схема двигателя этого снаряда и его топливного заряда представлены на рисунке 4.

Заряд двигателя армирован четырьмя серебряными теплопроводными нитями 6, длина заряда равна 9,5 диаметра. При этом заряд горит по заднему торцу 5, конической поверхности 4 и пазам 3. Боковая поверхность 2 и передний торец 1 забронированы.

В случае использования однородных по структуре теплопроводных нитей, расположенных параллельно оси заряда, изменение

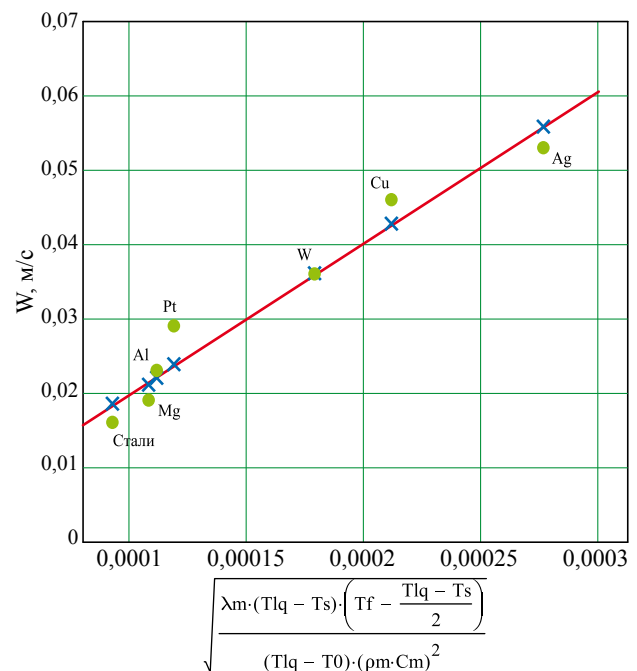


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений локальной скорости горения: точки – экспериментальные значения скоростей, крестики и линия – расчетные значения

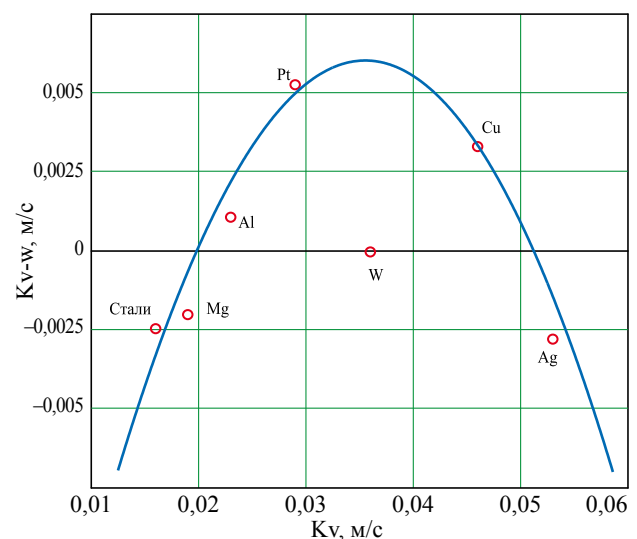


Рис. 3. График невязок между экспериментальными и расчетными значениями коэффициента скорости горения K_v для случая, рассмотренного на рисунке 2

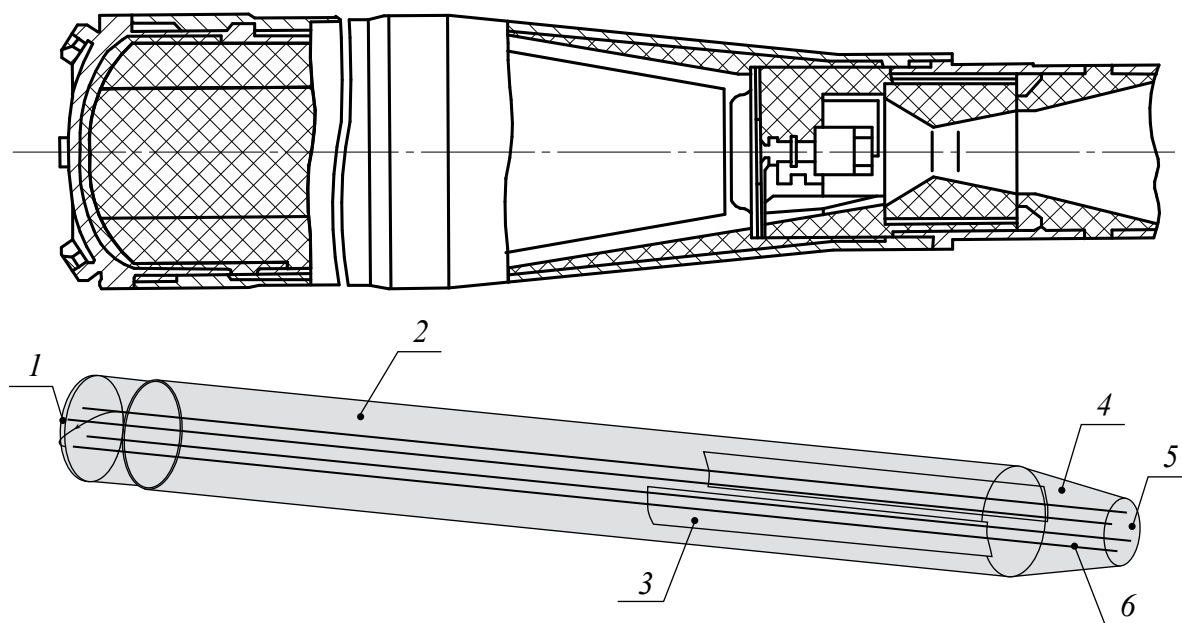


Рис. 4. Схема двигателя и топливного заряда снаряда ПЗРК 9К38 «Игла»

площади горения заряда и, соответственно, внутрикамерного давления и тяги показано на рисунке 5.

При работе такого двигателя возникает существенный провал в площади горения (и тяги) при переходе со стартового режима на маршевый. Устранение указанного провала возможно при использовании нитей с переменной теплопроводностью.

Для решения проблемы проанализировано несколько версий заряда, различающихся как длиной части нити с напылением, так и количеством нитей с напылением.

Рассмотрим две версии заряда, в которых удалось устранить провал в диаграмме поверхности горения.

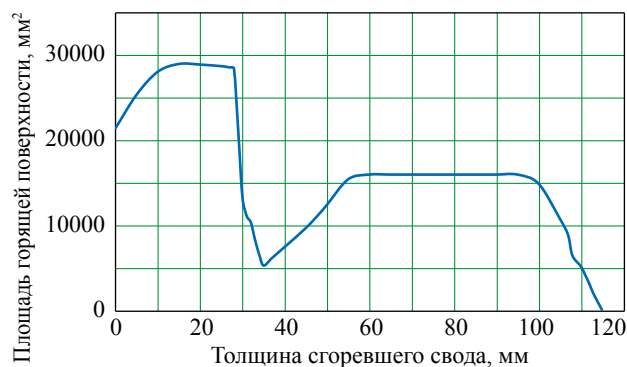


Рис. 5. Площадь горючей поверхности в зависимости от толщины сгоревшего свода для заряда с однородными по длине серебряными нитями

На рисунке 6 показан характер изменения площади горючей поверхности для случая, когда на все четыре нити нанесено алмазное покрытие с их начала и на длину, обеспечивающую смену материала нити при прохождении через нее фронта горения от боковых пазов. При этом удалось полностью убрать просадку площади горючей поверхности. На стартовом режиме работы наблюдается несколько периодических скачков площади горючей поверхности, однако их изменения принципиально меньше, чем провал на графике, представленном на рисунке 5, и при необходимости могут быть скомпенсированы дополнительной корректировкой теплопроводности нити.

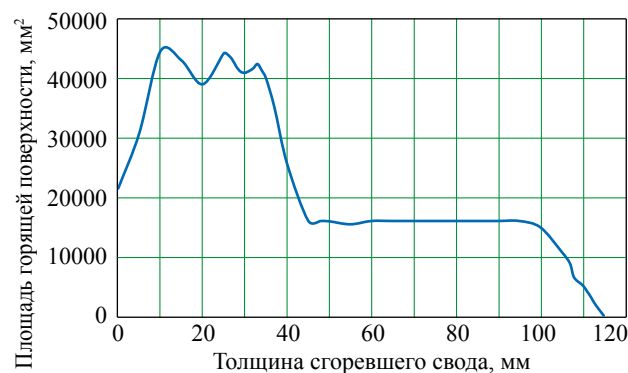


Рис. 6. Площадь горючей поверхности для заряда с нитями с алмазным напылением на стартовом режиме



На рисунке 7 показан вариант, когда алмазное покрытие нанесено только на две диаметрально противоположные нити и покрытие начинается только при вскрытии нитей фронтом горения от боковых пазов. В данном варианте заряда имеет место провал площади горения на переходе между стартовым и маршевым режимами, но его величина значительно меньше, чем в исходном конструктивном решении.

Для наглядности разница площадей в критических точках (точках перехода между режимами) представлена на рисунке 8.

В случае 8б сразу после завершения первого режима горения конусы занимают всю горящую поверхность, и в результате получается торцевое горение с повышенным газопритоком. В случаях 8а и 8в к моменту достижения критической точки конусы не успевают расшириться на всю величину горячей поверхности, поэтому поверхности горения в двух рассматриваемых случаях представляют собой совокупность поверхностей конусов и разгоревшихся поверхностей от боковых пазов.

При желании приведенные режимы могут быть дополнительно оптимизированы, но поскольку целью данной работы является демонстрация принципиальных возможностей предлагаемых методов регулирования изменения поверхности горения заряда твердого топлива с использованием ТЭ, то такая работа не производилась.

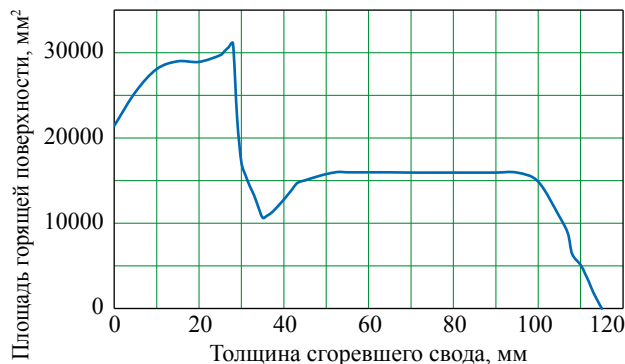


Рис. 7. Площадь горячей поверхности для заряда в случае нанесения алмазного покрытия на две из четырех теплопроводных нитей

Заключение

Проведен анализ эмпирических данных по коэффициенту увеличения скорости горения КС с ТЭ в зависимости от физических характеристик используемого материала ТЭ. Построены однофакторная и двухфакторные регрессионные модели для коэффициента увеличения скорости горения в зависимости от теплопроводности и температуры плавления материала ТЭ. Указано на возможность увеличения коэффициента увеличения скорости горения в 5–20 раз при использовании алмаза для изготовления нитей.

Произведена коррекция метода Бахмана – Лобанова для описания зависимости скорости горения КС с теплопроводными нитями.

Предложены новые способы управления поверхностью горения в зарядах с теплопроводными элементами, расширяющие возможности по совершенствованию таких зарядов.

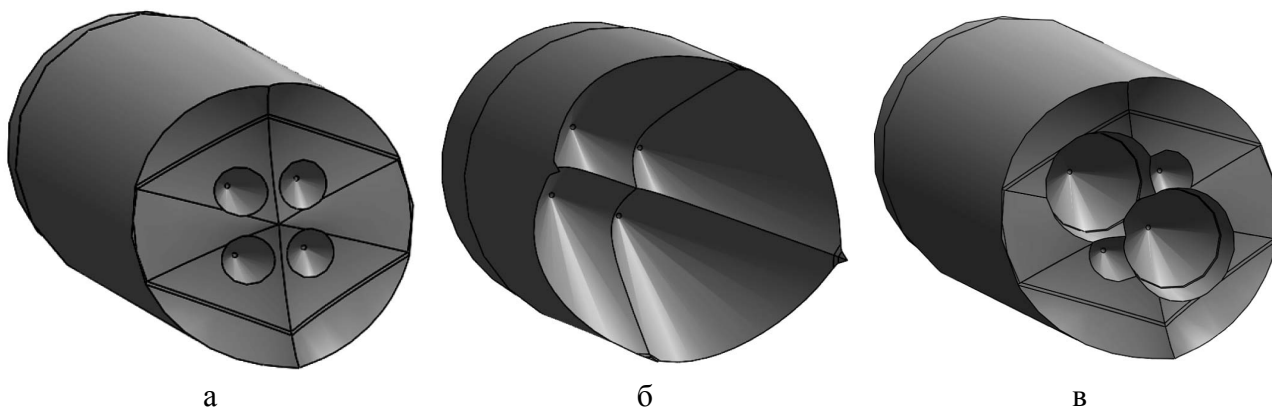


Рис. 8. Модели заряда в критической точке: а – заряд с серебряными нитями, б – заряд с нитями с алмазным напылением на 4 нити на длине стартового режима двигателя, в – заряд с нитями с алмазным напылением на двух нитях на участке перехода к маршевому режиму



Список литературы

1. Golub G. The need for a variable burning rate solid propellant // AIAA Paper #64-372, 1964. 8 p.
2. Golub G. // Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 4, Feb. 1965. P. 593–594.
3. Kubota N., Ichida M., and Fujisawa T., Combustion Processes of Propellants with Embedded Metal Wires / AIAA Journal, Vol. 20, No. 1, 1982. P. 116–121.
4. Caveny L.H., Click R.L. Influence of Embedded Metal Fibers on Solid-Propellant Burning Rate / Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 4, Jan. 1967. P. 79–85.
5. Бахман Н.Н., Лобанов И.Н. Влияние теплопроводных элементов на скорость горения // Физика горения и взрыва. 1975. Т.11, № 3. С. 501–50.
6. Бахман Н.Н., Лобанов И.Н. Влияние диаметра теплопроводящих элементов на их эффективность при горении конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 1. С. 46–50.
7. Gossant F. Godfroy, and PH. Robert. Theoretical Calculus of Burning Rate Ratio in Grains with Embedded Metal Wires // AIAA-88-3255. 1988. 12 p.
8. Merrill K. King. Analytical Modeling of Effects of Wires on Solid Motor Ballistics / J. Propul. Power Vol. 7, 1991. P. 312–21.
9. Coats D.E., French J.C., Dunn S.S., Berker D.R. Improvements to the Solid Performance program (SPP) // 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA-2003-4504, 2003. P. 7–26.
10. Lengelle G., Duterque J., Trubert J.F. Combustion of Solid Propellants. Energetics Department Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), 2004. 64 p.
11. The Element six CVD diamond handbook. De Beers Group Company. Element Six 2015. 02/16 [электронный ресурс], URL: https://e6cvd.com/media/wysiwyg/pdf/E6_CVD_Diamond_Handbook.pdf (дата обращения 11.01.2021).
12. Шорин С.Н. Теплопередача. М.: Высш. шк., 1964. 490 с.
13. Акулов И.Е., Байдаков В.И., Васильев А.Г. Техническая подготовка командира взвода ПЗРК 9К38 «Игла» (учебное пособие). – Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2011. 191 с.

Об авторах

Савельев Сергей Константинович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Ракетостроение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Область научных интересов: инженерные расчеты, экспериментальные методы исследования высокэнергетических потоков, внутренняя баллистика, аналитическое приборостроение.

Щеглов Дмитрий Константинович – кандидат технических наук, доцент, начальник расчетно-исследовательского отделения Акционерного общества «Конструкторское бюро специального машиностроения», заведующий базовой кафедрой «Средства ВКО и ПВО» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Область научных интересов: инженерные расчеты, методы проектирования сложных технических систем, системный анализ, промышленная автоматизация, управление проектами, методы и средства цифровой трансформации предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности.



Controlling changes in the combustion surface of solid fuel charges through the use of heat-conducting elements

Saveliev S. K.¹, Shcheglov D. K.^{1,2}

¹ *Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint-Petersburg, Russian Federation*

² *JSC “Design Bureau of Special Mechanical Engineering”, Saint-Petersburg, Russian Federation*

On the basis of experimental data on the local values of the combustion rate of condensed systems along the heat-conducting filaments placed therein, regression models were constructed to relate the value of the local combustion rate with such characteristics of heat-conducting filaments as the thermal diffusivity and melting point. The obtained regression model was used to assess a possible expansion of the variation range of the local combustion rate when using various crystalline forms of CVD diamonds as heat-conducting filaments. It was shown that a local increase in the combustion rate could exceed the baseline value by 200 times. The possibility of controlling the transformation of the combustion surface by using heat-conducting filaments with variable characteristics was confirmed.

Keywords: solid fuel charge, combustion surface change control, heat transfer elements

Information about the authors

Saveliev Sergey Konstantinovich – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Rocket Engineering Department, Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint-Petersburg, Russian Federation

Research interests: engineering calculations, experimental methods for studying high-energy flows, internal ballistics, analytical instrumentation.

Shcheglov Dmitry Konstantinovich – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Head of the Calculation and Research Department, JSC “Design Bureau of Special Mechanical Engineering”, Head of the Base Department “Aerospace Defence and Air Defence Technologies”, Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint-Petersburg, Russian Federation
Research interests: engineering calculations, methods for designing complex technical systems, system analysis, industrial automation, project management, methods and means of digital transformation of enterprises in high-tech industries.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-76-84>

Автоматизация процесса анализа отказов, оценки надежности и эффективности доработок изделий

В. Б. Афанасьев^{1,2}, Т. К. Воробьев², В. А. Мамаев^{2,3}, В. М. Медведев², Н. В. Тихменев²

¹ Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования «Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей» им. академика В. П. Ефремова», Москва, Российская Федерация

² Акционерное общество «ГосНИИП», Москва, Российская Федерация

³ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

В статье предложен математический аппарат для оценки надежности мелкосерийной продукции. Апробированы методы определения эффективности доработок. Разработано программное обеспечение для автоматизации статистического учета и анализа отказов изделий.

Ключевые слова: надежность, автоматизация, статистика, доработка, база данных, исследование отказов

Для цитирования: Афанасьев В. Б., Воробьев Т. К., Мамаев В. А., Медведев В. М., Тихменев Н. В. Автоматизация процесса анализа отказов, оценки надежности и эффективности доработок изделий // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 1. С. 76–84. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-76-84>

For citation: Afanasyev V. B., Vorobyov T. K., Mamaev V. A., Medvedev V. M., Tikhmenev N. V. Automation of the processes of failure analysis, reliability assessment and product completion efficiency // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 1. P. 76–84. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-76-84>

Поступила 16.11.2020 Отрецензирована 25.11.2020 Одобрена 22.12.2020 Опубликована 17.02.2021

Эффективность систем управления качеством на предприятиях ОПК взаимосвязана с усложнением информационных потоков, сопровождающих их деятельность, следствием чего является необходимость коммуникации процессов обработки, передачи и анализа массивов разнородной информации. В связи с чем особое значение приобретают вопросы организации функционирования информационных систем (ИС) [1], в том числе автоматической обработки статистических данных в разных режимах вплоть до реального масштаба времени.

Идея статистических методов контроля качества продукции заключается в том, что о генеральных характеристиках испытываемой партии изделий судят по выборочным характеристикам, определяемым по малой выборке из этой партии. Эта идея была высказана впервые еще в 1846 г. академиком

М.В. Остроградским [2]. В настоящее время статистические методы контроля качества продукции получили широкое распространение во многих отраслях промышленности. Данные методы имеют ряд недостатков. На рисунке 1 показаны нижние доверительные границы при обработке опытных данных в зависимости от объема испытаний и доли дефектных изделий при биномиальном распределении с доверительной вероятностью $\gamma = 0,8$. Из рисунка следует, что при числе испытаний менее 100 происходит резкое уменьшение значений, что не позволяет подтвердить высокие показатели надежности даже при низком проценте или отсутствии отказов. Вместе с тем проведение большого числа испытаний при стоимости одного изделия в несколько десятков миллионов рублей невозможно по экономическим причинам. По этой же причине существует проблема экспериментального подтверждения количественных значений надежности продукции

© Афанасьев В. Б., Воробьев Т. К., Мамаев В. А., Медведев В. М., Тихменев Н. В., 2021

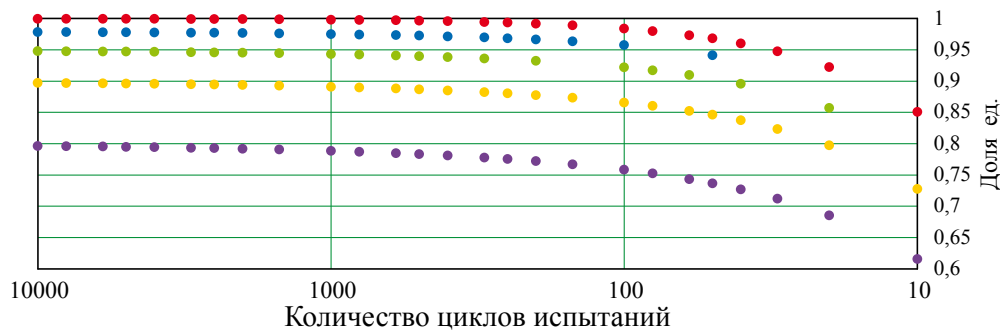
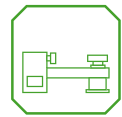


Рис. 1. Зависимость нижних доверительных границ от количества испытаний:

— 0% отказов, — 2% отказов, — 5% отказов, — 10% отказов, — 20% отказов

на стадии опытно-конструкторской разработки и при постановке на производство.

В настоящее время в РФ проводится техническое перевооружение предприятий, производящих системы навигации, закупается и осваивается новое оборудование, на котором отрабатываются современные технологии. Параллельно проходят разработки современных инерциальных датчиков, начинается их серийное производство. То есть происходит одновременная разработка инерциального датчика и освоение базовых технологий на новом оборудовании. В общем случае уменьшение количества отказов достигается долгосрочным совершенствованием технологии с проведением принципиальных и наукоемких доработок критических технологий и «подстройки» элементов конструкции выпускаемых датчиков под отработанные технологические операции. Соответственно изделия разных годов выпуска имеют разные показатели надежности.

В данной статье представлены результаты разработки и апробации программно-математического обеспечения по оценке надежности и эффективности доработок дорогостоящей мелкосерийной продукции и ее комплектующих.

В АО «ГосНИИП» согласно [3, 4] разработана и апробирована математическая модель, позволяющая оценивать показатели качества и надежности выпускаемой продукции и покупных комплектующих изделий, а также эффективность проведенных доработок по устранению причин отказов. Так как в ТЗ и ТУ на изделия требования к экспериментальному подтверждению оценки сохранности и ремонтпригодности не задаются,

то ограничимся описанием подхода к оценке безотказности изделий в общей задаче оценки надежности. Оценка надежности проводится согласованным с научно-методической организацией Заказчика расчетно-экспериментальным методом (РЭМ) [5], путем приведения наработки изделия в процессе жизненного цикла (ЖЦ) к эквивалентной наработке в условиях применения по прямому назначению.

Исходными данными для применения РЭМ являются следующие показатели: средняя наработка изделия (t), количество выпущенных изделий (N), число отказов (дефектов), зафиксированных и задокументированных за анализируемый период (k).

Общее время наработки $T = t \cdot N$ за период производства, испытаний и эксплуатации с учетом коэффициента эквивалентности K_z приводится к наработке в условиях применения $T_z = T/K_z$ и разбивается на циклы, каждый продолжительностью, соответствующей времени работы изделия при применении по назначению T_p , для которого оценивается вероятность безотказной работы (ВБР). Количество циклов n соответственно определяется из соотношения: $n = T_z/T_p$.

Так как число циклов (суммарное время наработки) приходящееся на одно изделие, значительно меньше назначенного ресурса, а суммарное время хранения не превышает назначенного срока службы, можно не учитывать износ и старение изделий и, следовательно, исходить из условия однородности и независимости испытаний. В этом случае допустимо применение биномиального распределения случайной величины k [6] и определение нижней P_n и верхней P_v

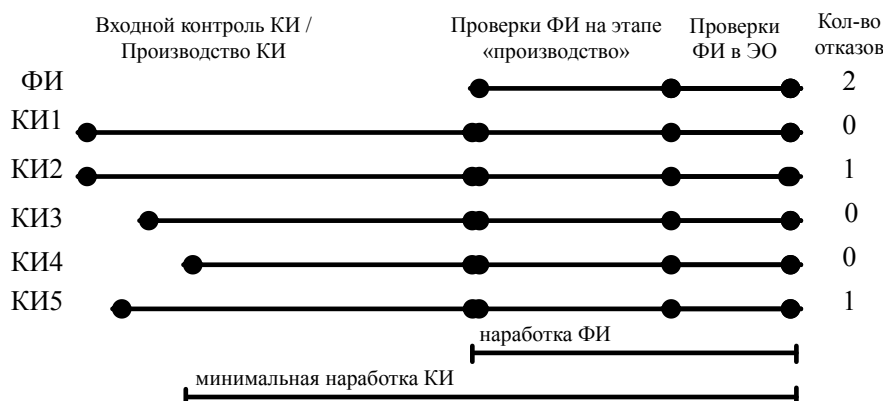


Рис. 2. Схема определения наработки: ФИ – финальное изделие, КИ – комплектующее изделие, ЭО – эксплуатирующая организация

границ доверительного интервала вероятности безотказной работы решением уравнений Клоппера – Пирсона (1) и (2):

$$\sum_{i=0}^k \frac{n!}{i! \cdot (n-i)!} \cdot (1 - P_n)^i \cdot P_n^{n-i} = 1 - \gamma, \quad (1)$$

$$\sum_{i=k}^n \frac{n!}{i! \cdot (n-i)!} \cdot (1 - P_n)^i \cdot P_n^{n-i} = 1 - \gamma, \quad (2)$$

где γ – доверительная вероятность.

Допустимо применение двух методов оценки надежности выпускаемых (финальных) изделий (рис. 2). Первый дает возможность учитывать только наработку финального изделия (ФИ) (тренировку, предъявительские и приемосдаточные испытания, входной контроль и проверки в головной организации). Во втором ФИ рассматривается как объединение комплектующих изделий (КИ) с учетом их наработки с момента изготовления или прохождения входного контроля в АО «ГосНИИП». Данный метод можно разбить на два: для оценки надежности берется минимальная наработка из всех КИ; надежность финального изделия рассчитывается как последовательное соединение КИ с определенной наработкой. Доверительные интервалы показателей ВБР с доверительной вероятностью $\gamma = 0,8$,

полученные тремя вышеупомянутыми способами для трех модификаций изделий, приведены в таблице 1.

Наряду с оценкой надежности ФИ и КИ, требованиями нормативной документации, например ГОСТ РВ 20.39.302-98, установлена задача анализа причин отказов, определения необходимости корректировки конструкторской документации, проверки эффективности мероприятий по обеспечению надежности.

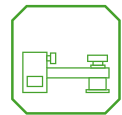
Для оценки эффективности (значимости) проведения доработок предлагается сравнить две выборки изделий. Так как проверки изделий являются независимыми, в этом случае также допустимо применение биномиального распределения. Задача сравнения двух выборок решена, например, в [2]. В процессе решения разность опытных частностей Δ сравнивается с величиной ε , отвечающей достаточно большой вероятности α . Однако в алгоритме решения из-за несовершенства вычислительной техники в середине прошлого века существуют допущения, которые искажают оценку в случае малого числа испытаний. Поэтому для автоматизированных расчетов предлагается использовать более сложный

Таблица 1

Доверительные интервалы показателей надежности

	Модификация № 1	Модификация № 2	Модификация № 3
Метод № 1	0,951; 0,992	0,980; 1	0,967; 0,999
Метод № 2	0,950; 0,998	0,984; 1	0,971; 0,999
Метод № 3*	0,934; 0,998	0,914; 1	0,935; 0,999

Примечание. * При перемножении нижних доверительных границ доверительная вероятность увеличивается. Нахождение точного значения доверительной вероятности выходит за рамки данной статьи.



способ решения задачи проверки идентичности параметра биномиального распределения по двум выборкам через рассмотрение гипотезы об уменьшении дефектности изделий, рассмотренной в [6].

Для примера оценим эффективность доработок инерциального датчика № 1. Известно, что в 2013 году было выпущено 82 изделия, на которых было зафиксировано 4 отказа за первые 2 года эксплуатации. В 2017 году было выпущено 99 изделий с 2 отказами соответственно.

Решим задачу первым способом. Найдем разность Δ опытных частностей:

$$\Delta = \frac{4}{82} - \frac{2}{99} = 0,029.$$

При доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ табличное значение $z_{0,95} = 1,96$.

$$\varepsilon = 1,96 \sqrt{\frac{4+2}{82 \cdot 99} \left(1 - \frac{4+2}{82+99}\right)} = 0,052 > \Delta.$$

Так как $\Delta < \varepsilon$, то нет оснований полагать, что новая конструкция лучше старой. Расхождение между результатами вполне объясняется случайными колебаниями.

Решим задачу вторым способом. Обозначим p_1 и p_2 дефектность в первой и второй группах. Тогда случайное число дефектов m_i , полученных на n_i изделиях, будет распределено по биномиальному закону:

$$P(m_i = x) = \binom{n_i}{m_i} \cdot p_i^{m_i} \cdot (1 - p_i)^{n_i - m_i}.$$

Поставим следующие гипотезы.

Гипотеза H_0 : Доработки не влияют на снижение количества дефектов.

Гипотеза H_1 : Доработки влияют на снижение количества дефектов.

Плотности распределения для показателя дефектности на основе полученных данных:

$$f_1(p_1 | m_1 = 4, n_1 = 82) = 83 \cdot \binom{82}{4} \cdot p_1^4 \cdot (1 - p_1)^{78}.$$

$$f_1(p_1 | m_1 = 2, n_1 = 99) = 100 \cdot \binom{99}{2} \cdot p_2^2 \cdot (1 - p_2)^{97}.$$

Вероятность того, что уменьшение числа дефектов является следствием проведенных доработок, равна:

$$\int_0^1 \int_0^1 f_1(p_1 | m_1, n_1) \cdot f_2(p_1 | m_2, n_2) dp_2 dp_1 = \int_0^1 \int_0^1 83 \cdot 100 \cdot \frac{82!}{78!4!} \cdot \frac{99!}{97!2!} \cdot p_1^4 \cdot (1 - p_1)^{78} p_2^2 \cdot (1 - p_2)^{97} dp_2 dp_1 = 0,847.$$

Полученная величина является относительно низким значением. Для сравнения, для инерциального датчика № 2 вероятность влияния доработок за 2013–2019 гг. на снижение дефектности равна 0,999981, что указывает на эффективность проведенных мероприятий. Следовательно, несмотря на то что дефектность датчика № 1 снизилась более чем в два раза, оба способа сравнения выборок не позволяют однозначно утверждать, что проведенные доработки привели к статистически значимому улучшению. Приведенный пример также свидетельствует, что сравнение точечных значений коэффициентов дефектности в условиях малой выборки не является показательным. Поэтому дополнительно предлагается использовать визуальный метод группировки отказов по технологическим признакам, что позволяет также проанализировать эффективность отдельных мероприятий по устранению причин отказов.

В данном методе составляется перечень отказов и анализируются акты исследования (АИ), которые изготовитель предоставляет потребителю вместе с отремонтированным прибором. В этих документах отражены признаки отказов, их причины и принятые меры. Далее отказы из перечня разбиваются по технологическим признакам на группы согласно АИ. Группировка отказов является довольно сложной, нетривиальной задачей и первоначально проводится экспертной комиссией с участием наиболее опытных разработчиков и сотрудников отдела надежности. Следует отметить, что большинство поставщиков выделяет и четко формулирует главную причину отказов и при их повторении разрабатывает конкретные мероприятия по повышению качества и надежности. Тем не менее часть поставщиков некорректно относится к исследованиям, пытается распределить причину

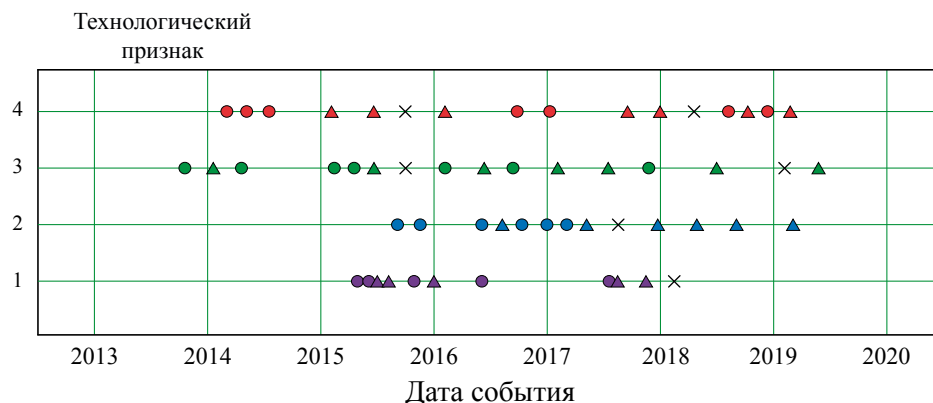


Рис. 3. Типовые случаи при визуализации статистики:
● – изготовление, ▲ – отказ, × – реализация мероприятий

отказа и признает отказ эксплуатационным или не подтвердившимся, что серьезно затрудняет разбиение на технологические группы.

Далее проводится нанесение на временную ось дат изготовления изделий, дат отказов, дат реализации мероприятий по устранению причин отказов. Это позволяет наглядно оценить эффективность проведенных мероприятий. На рисунке 3 приведены наиболее типовые случаи при анализе.

Группа 1 – причина отказов устранена, основная часть дефектных изделий выявлена в процессе проверок и не попала в эксплуатацию.

Группа 2 – причина отказов устранена, но отказы проявляются при хранении, поэтому вероятно обнаружение дефектных изделий в эксплуатации при межрегламентных проверках.

Группа 3 – мероприятия проведены, эффективность должна быть оценена дополнительно по результатам эксплуатации.

Группа 4 – проведенные мероприятия оказались неэффективными.

Рассмотрим метод на примере инерциального датчика № 2. Для него были выделены следующие технологические группы: 1 – отказ встроенного процессора; 2 – нарушение клеевых швов между внутренними деталями; 3 – смещение чувствительного элемента; 4 – нарушение сварных контактов; 5 – прочие, единичные отказы; 6 – не подтвердившиеся отказы (рис. 4). В 5-й и 6-й группах мероприятия не проводились. Из графика видно, что моменты изготовления отказавших

датчиков по причинам 1, 4 и 6-й групп технологических отказов заканчиваются в 2015–2016 годах, т.е. проведенные мероприятия оказались эффективными. Моменты изготовления датчиков, отказавших по технологическим причинам 2, 3 и 5-й групп наблюдаются до 2018 года изготовления. При необходимости, при наличии достаточного числа статистических данных, технологическую группу можно разбить на подгруппы для дополнительного анализа. Например, в группе № 4 можно выделить отказы, связанные с недостаточной площадью сварных контактов и с загрязнением приспособления для сварки.

Конечная цель обработки потоков информации – предоставление лицу, принимающему решения, релевантных данных. Стандарты АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей» (Концерн) устанавливают следующие организационные уровни управления (контроля): 0 – интегрированная структура; I – организация интегрированной структуры; II – изделие; III – стадии жизненного цикла изделия; IV – производственная и технологическая системы (ПС и ТС) [7]. Исходя из особенностей информационного обмена на конкретном уровне, разрабатывается поддерживающая его ИС.

Например, автоматизированная информационная система учета претензий и анализа качества оборонной продукции АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей» и предприятий Концерна предназначена для информационной поддержки нулевого уровня управления. На нем обеспечивается оценка, анализ, обоснование и реализация мероприятий в области

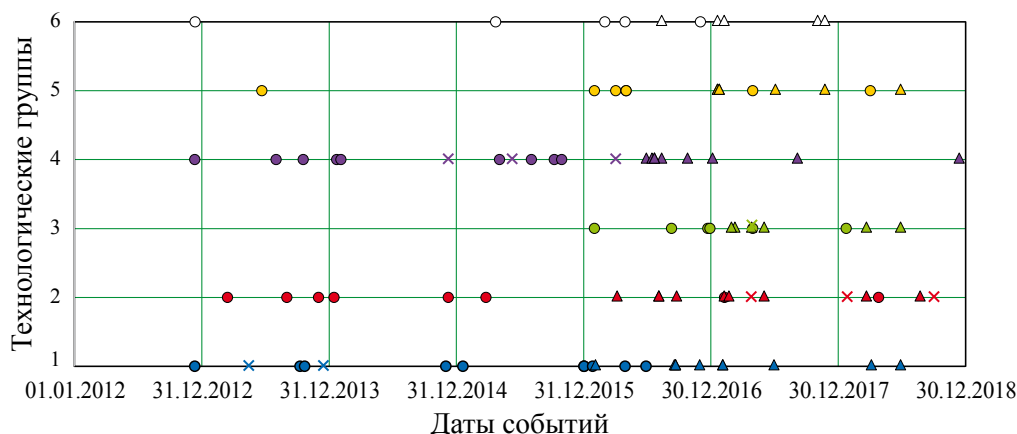
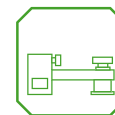


Рис. 4. Визуализация статистики отказов инерциального датчика № 2:

- – изготовление датчика №2, отказавшего из-за МС 5515XT1A, ● – изготовление датчика № 2, отказавшего из-за нарушения клеевых швов, ● – изготовление датчика № 2, отказавшего из-за смещения ЧЭ, ● – изготовление датчика № 2, отказавшего по нарушению сварных контактов, ● – изготовление датчика № 2 с не подтвердившимся отказом, ○ – изготовление датчика № 2, отказавшего по случайной причине (прочее);
- ▲ – возврат датчика № 2, отказавшего из-за МС 5515XT1A, ▲ – возврат датчика № 2, отказавшего из-за нарушения клеевых швов, ▲ – возврат датчика № 2, отказавшего из-за смещения ЧЭ, ▲ – возврат датчика № 2, отказавшего по нарушению сварных контактов, ▲ – возврат датчика № 2, отказавшего по нарушению сварных контактов, ▲ – возврат датчика № 2, отказавшего по случайной причине (прочее);
- ✕ – реализация мероприятий по МС 5515XT1A, ✕ – реализация мероприятий по нарушению клеевых швов, ✕ – реализация мероприятий по смещению ЧЭ, ✕ – реализация мероприятий по нарушению сварных контактов

качества и надежности продукции, координация и управление работами в области надежности изделий, ПС и ТС предприятий-изготовителей. Задачей системы является обработка и анализ поступающей от дочерних обществ информации: паспортов качества, отчетов системы менеджмента качества, сведений по рекламационной работе.

Система, используемая ПАО «Тамбовский завод «Электроприбор», функционирует на третьем и четвертом уровнях управления. Она разрабатывалась преимущественно технологами и направлена на сбор статистики о надежности производственных и технологических процессов.

ИС, используемая АО «ГосНИИП», охватывает первый и второй уровни управления. Ее особенностью является практическая направленность, т.к. система вводилась для автоматизации существующих задач в отделе надежности.

Автоматизация процесса анализа отказов реализуется за счет интеграции разрабатываемого на языке Python программно-математического обеспечения и базы данных (БД) «Надежность» (Свидетельство о регистрации

№ 2018620285), управляемой с помощью нереляционной системы управления базами данных (СУБД) MongoDB. Данная СУБД разрешает добавлять требования к данным в течение проекта, что, например, позволило [8] без реинжиниринга расширить функционал ИС и сформировать систему учета показателей по вводимым стандартам Концерна.

Разработанная СУБД имеет классическую трехуровневую модель. Эта модель является расширением двухуровневой модели (клиент–сервер), и в ней вводится дополнительный промежуточный уровень между клиентом и сервером. Архитектура трехуровневой модели приведена на рисунке 5.

Первым уровнем является клиент, отвечающий за логику представления данных пользователю, а также за логику управления этими данными конечным пользователем. На данном этапе клиент реализован в виде веб-интерфейса. Промежуточный уровень трехуровневой системы содержит один или несколько серверов приложений. В данной модели этот уровень представлен python-приложением, работающим на основе WSGI сервера waitress. Сервер БД отвечает

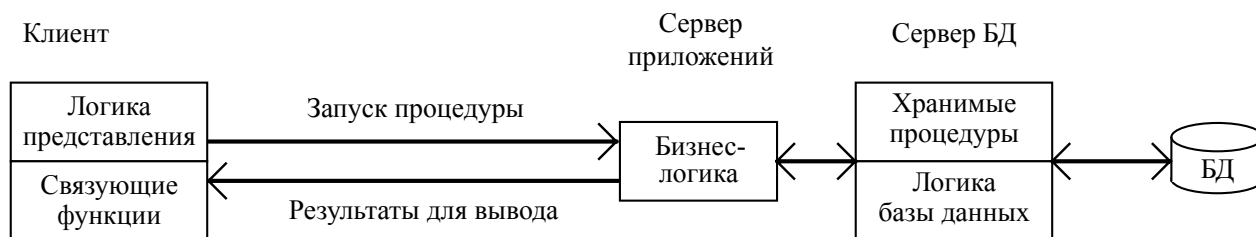


Рис. 5. Трехуровневая схема работы базы данных

за корректную загрузку и выгрузку данных из/в MongoDB.

Внутри БД информация хранится в виде массивов, каждый из которых представляет собой группу документов. БД структурирована по календарным датам событий, типам изделий, заказчикам (потребителям), предприятиям поставщикам КИ, этапам ЖЦ, видам воздействий на изделия, характеру дефектов (отказов), что позволяет автоматизировать процесс обработки информации и расчетов надежности изделий. Более подробно механизмы функционирования БД приведены в [9, 10].

Таким образом, в ходе реализации комплекса программно-математических решений, направленных на автоматизацию процесса анализа отказов, получены следующие результаты.

1. Разработаны математические модели оценки показателей надежности выпускаемых и покупных изделий, в том числе в условиях ограниченной (малой) выборки, что позволило усилить контроль качества и надежности ФИ и КИ на этапах ЖЦ «производство» и «эксплуатация».

2. Предложены и внедрены визуальный и расчетный методы оценки эффективности мероприятий по устранению причин отказов и доработки изделий.

3. Разработано и внедрено программное обеспечение, позволяющее автоматизировать оценку надежности изделий.

Результаты работы могут быть использованы на предприятиях промышленности, автоматизирующих процессы оценки надежности и исследования отказов изделий.

Список литературы

1. Громов Ю. А., Минин Ю. В., Копылов С. А. Постановка и алгоритм решения задачи

определения параметров структуры информационной системы в условиях неопределенности // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. Выпуск 4, 2020. С. 32–39.

2. Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.: Советское радио, 1962. 552 с.

3. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.

4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.

5. Расчетно-экспериментальный метод оценки и контроля показателей надежности. Общая методика. М.: АО «ГосНИИП», 2019. С. 21.

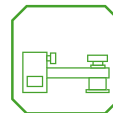
6. Сухорученков Б. И. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. М.: Вузовская книга, 2010. 384 с.

7. СТ ИС КОНЦЕРН ВКО 02.1–101–2019. Комплексная система управления качеством и надежностью оборонной продукции интегрированной структуры АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей». Общие положения.

8. Афанасьев В. Б., Медведев В. М., Остапенко С. Н. и др. Реализация оценки показателей качества и надежности продукции предприятия оборонно-промышленного комплекса // Известия Российской Академии Ракетных и Артиллерийских наук. 2020. № 3. С. 18–24.

9. Афанасьев В. Б., Медведев В. М., Остапенко С. Н. и др. Управление качеством продукции на предприятиях ОПК с использованием инновационных технологий // Известия ТулГУ. 2019. № 12. С. 3–10.

10. Афанасьев В. Б. Особенности проектирования системы информационной поддержки качества продукции оборонного предприятия // Известия ТулГУ, технические науки. 2020. № 5. С. 255–269.



Об авторах

Афанасьев Виктор Борисович – аспирант Автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны “Алмаз – Антей” им. академика В. П. Ефремова», Москва, Российская Федерация; начальник отдела надежности Акционерного общества «ГосНИИП», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: надежность и качество образцов ВТ и СТ, система управления качеством и надежностью предприятий машиностроения.

Воробьев Тимур Константинович – ведущий инженер-математик отдела надежности Акционерного общества «ГосНИИП», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: теория вероятностей, математическая статистика, надежность ЭРИ.

Мамаев Владимир Алексеевич – студент магистратуры Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Москва, Российская Федерация; старший инженер-математик отдела надежности Акционерного общества «ГосНИИП», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: автоматизация оценок надежности.

Медведев Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор Акционерного общества «ГосНИИП», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: техническая диагностика, организационно-технические вопросы управления эксплуатацией изделий

Тихменев Николай Вадимович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела надежности Акционерного общества «ГосНИИП», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: лазерная гироскопия, вакуумные и оптические технологии инерциальных датчиков, технологическое обеспечение надежности.



Automation of the processes of failure analysis, reliability assessment and product completion efficiency

Afanasyev V. B.^{1,2}, Vorobyov T. K.², Mamaev V. A.^{2,3}, Medvedev V. M.², Tikhmenev N. V.²

¹ V.P. Efremov Scientific and Educational Centre for Aerospace Defense "Almaz – Antey", Moscow, Russian Federation

² JSC "GosNIIP", Moscow, Russian Federation

³ Moscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russian Federation

The article proposes a mathematical apparatus for assessing the reliability of small-scale production. Methods for determining the efficiency of product completion works were tested. A software application was developed to automate statistical accounting and analysis of product failures.

Keywords: reliability, automation, statistics, product completion, database, failure assessment.

Information about the authors

Afanasyev Viktor Borisovich – Post-graduate Researcher, V.P. Efremov Scientific and Educational Centre for Aerospace Defense "Almaz – Antey", Moscow, Russian Federation; Head of the Reliability Department, JSC "GosNIIP", Moscow, Russian Federation.

Research interests: reliability and quality of HT and ST samples, quality management system and reliability of mechanical engineering enterprises.

Vorobyov Timur Konstantinovich – Leading Engineer-Mathematician, Reliability Department, JSC "GosNIIP", Moscow, Russian Federation.

Research interests: probability theory, mathematical statistics, electro-radio product reliability.

Mamaev Vladimir Alekseevich – Master's student, Moscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russian Federation; Senior Engineer-Mathematician, Department of Reliability, JSC "GosNIIP", Moscow, Russian Federation.

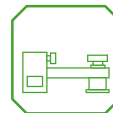
Research interests: automation of reliability assessments.

Medvedev Vladimir Mikhailovich – Dr. Sci. (Engineering), Professor, General Director, JSC "GosNIIP", Moscow, Russian Federation.

Research interests: technical diagnostics, organizational and technical issues of product operation management

Tikhmenev Nikolay Vadimovich – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Reliability Department, JSC "GosNIIP", Moscow, Russian Federation.

Research interests: laser gyroscopy, vacuum and optical inertial sensor technologies, technological assurance of reliability.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-85-92>

УДК 658.512.22:004.896

Внесение конструкторских данных в проектное решение и их модификация в задачах геометрического моделирования

Д. Э. Цыганков¹, Г. Р. Шайхеева¹, И. В. Горбачев²

¹ Акционерное общество «Ульяновский механический завод», Ульяновск, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», Ульяновск, Российская Федерация

Рассматривается подход к достижению модифицируемости проектных решений в виде электронных 3D-моделей деталей и сборочных единиц в САПР, основанный на их «модульном» представлении – в виде системы 3D-макрообъектов, типовых для заданной предметной области, обладающих физическим смыслом и описываемых набором конструкторских параметров. Вариативность значений выделенных параметров задает класс проектных решений, отличающихся как геометрически, так и структурно, но обобщенных по их конструктивно-функциональной специфике. Основным преимуществом предложенного подхода является обеспечение смысловой целостности проектного решения при его модификации.

Ключевые слова: конструирование, САПР, проектное решение, 3D-модель, модификация, геометрическое моделирование, смысловое содержание, повторное использование, конструкторский замысел, модульный принцип

Для цитирования: Цыганков Д. Э., Шайхеева Г. Р., Горбачев И. В. Внесение конструкторских данных в проектное решение и их модификация в задачах геометрического моделирования // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 1. С. 85–92. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-85-92>

For citation: Tsygankov D. E., Shaykheeva G. R., Gorbachev I. V. Integration of Design Data into a Design Solution and their Modification in Problems of Geometrical Modelling // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 1. P. 85–92. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-85-92>

Поступила 21.12.2020 Отрецензирована 13.01.2021 Одобрена 02.02.2021 Опубликована 17.02.2021

Введение

В условиях возрастающей роли информационных технологий (в частности, геометрического моделирования) в производственном процессе системы автоматизированного проектирования (САПР) стали неотъемлемым инструментом инженера для решения технических задач на этапе опытно-конструкторских работ. Результатом внедрения САПР является повышение эффективности накопления, систематизации и унификации проектных решений, что также отражается на качестве их повторного использования [1].

Повторному использованию проектных решений на этапе проектирования посвящено множество работ [2], его актуальность и важность в производственном процессе не вызывает сомнений. Одним из способов повторного использования является модификация – изменение наиболее близкого по конструктивному исполнению проектного решения [3] в рамках, определяемых его функциональным назначением. Такой процесс является типовым [4] для всех современных САПР (при представлении проектных решений в виде электронных 3D-моделей), однако требует временных и трудовых затрат. Дополнительной сложностью является невозможность закладывания смыслового содержания в проектное



решение в рамках базового функционала САПР, что приводит к возникновению ошибок в его геометрии и структуре в процессе модификации. Иными словами, отсутствуют механизмы, способные обеспечить сохранение конструктивно-функциональной целостности проектного решения до и после модификации; такой механизм был разработан авторами в рамках собственного подхода.

В качестве примера проектных решений в работе рассматривается класс коаксиальных СВЧ устройств, включающий в свой состав множество различных изделий, таких как соединители, переходы, разъемы, нагрузки и т.д. [5]. Все изделия отличаются конструктивом и назначением, но описываются относительно узкой предметной областью, а также ограниченным перечнем нормативно-технической документации [6], предоставляя широкий творческий простор для конструирования, прежде всего на уровне локальных проектных параметров. Совокупность значений таких проектных параметров определяет конструкцию изделия с различными диапазонами характеристик в плане функциональности, надежности, технологичности и др.

Модифицируемость изделий уровня «Деталь»

Любая проектируемая деталь (как компонент сборочной единицы / узла), отображаясь в САПР в виде 3D-модели, описывается историей ее построения – последовательностью

из n проектных операций (ПО), упорядоченных в так называемое дерево построения, имеющее вид $\langle PO_1, PO_2, \dots, PO_n \rangle$. Одна и та же 3D-геометрия может быть построена множеством различных способов, с совпадением или несовпадением состава ПО и их числа n . На рисунке 1 представлены 3D-модель гайки накидной (компонента соединителя коаксиального) и дерево ее построения. Каждый элемент дерева построения содержит ряд параметров (локальных и ассоциативно связанных с другими элементами), управление значениями которых обеспечивает перестраивание результирующего проектного решения.

В качестве САПР в настоящей работе используется «Компас-3D».

Сформированная 3D-модель как проектное решение содержит в себе комплект значений всех конструкторских параметров, при этом содержит их неявно, т.е. разработчик устанавливает ассоциативные связи между своим замыслом и функционалом САПР, используя операции и термины последней без возможности их дальнейшего восстановления. Единственной структурой, способной хранить в себе проектные параметры и их значения, является дерево построения 3D-модели [3].

Основная сложность хранения проектных данных, обладающих конструкторским смыслом, заключается в невозможности их ассоциативности с электронной 3D-моделью

	XXXX.758342.xxx Гайка
	Начало координат
	(+)Эскиз : 1
	Элемент вращения : 1
	(+)Эскиз : 2
	Элемент выдавливания : 1
	(+)Эскиз : 3
	Элемент выдавливания : 2
	Массив по концентрической сетке : 1
	Спираль цилиндрическая : 1
	(+)Эскиз : 4
	Элемент по траектории : 1

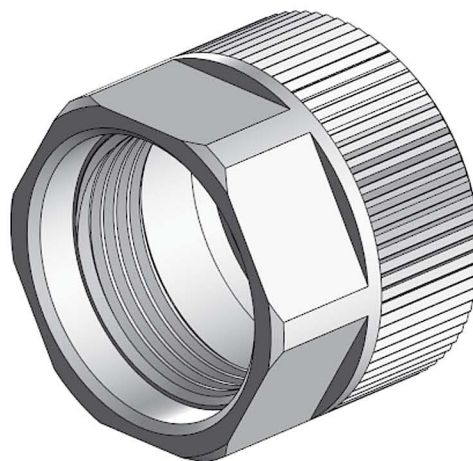
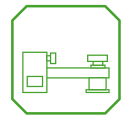


Рис. 1. Сформированная 3D-модель детали и дерево ее построения



в рамках базового функционала САПР. По этой причине авторами разработан подход, заключающийся в представлении 3D-модели изделия системой 3D-макрообъектов, типовых для текущей предметной области, каждый из которых является, по сути, классом параметрически заданных шаблонов и описывается набором конструкторских параметров. В зависимости от значений параметров выбирается (за счет программной реализации и/или ветвлений) актуальный шаблон, формирующий на выходе экземпляр 3D-фрагмента, основным и принципиальным отличием которого является фиксированная конструктивно-функциональная специфика в контексте проектируемого изделия (для заданной предметной области). То есть такой объект уже не является абстрактной геометрией, а обладает конструкторским смыслом [7].

Создание 3D-макрообъектов реализуется структурно-функциональной декомпозицией [8] проектных решений заданной предметной области. Они разделяются по своему типу на конструктивно-функциональную базу (КФБ), задающую основу конструкции будущего изделия, и конструктивно-функциональный фрагмент (КФФ), вносящий вклад в типовое назначение изделия. На рисунке 2 представлено дерево 3D-модели гайки (см. рис. 1) в виде системы 3D-макрообъектов, а также окно ввода значений проектных параметров. Дерево построения содержит одну КФБ и произвольный набор КФФ, а параметры, описывающие КФБ, являются исходными ко всем КФФ.

Часть проектных параметров задается вводом значений при наличии таких ограничений, как минимальное, максимальное, недо-

пустимое значения; другая часть – выбором значений из предварительно заданного дискретного ряда. Выделение параметров и последующая установка ассоциативных связей и параметризация на их основе 3D-макрообъекта производится алгоритмически – в процессе программной реализации. Макрообъект (МкОб) формально представляется в виде $МкОб = \langle np_{к1}, np_{к2}, \dots, np_{кn}, np_{в1}, np_{в2}, \dots, np_{вm} \rangle$, где $np_{к}$ – входной параметр, обладающий конструкторским смыслом, $np_{в}$ – внутренний параметр, используемый САПР для построения 3D-геометрии, для которого справедлива запись: $np_{vi} = \varphi(np_{к1}, \dots, np_{кn})$, $i = \overline{1, m}$.

После учета ограничений на значения входных параметров необходима проверка конструктивно-функциональной целостности, подразумевающей не только выполнение условий на значения каждого параметра $np_{к}$, но и их совместную корреляцию, исключающую возможность нарушения исходного конструкторского замысла, заложенного в 3D-геометрию. И только после ее подтверждения формируется 3D-макрообъект.

Номинальные значения проектных параметров задаются в процессе формирования 3D-модели на уровне соответствующих макрообъектов. Далее сформированная конструкция модифицируется путем изменения требуемых параметров, при этом все изменения, касающиеся нескольких макрообъектов, выполняются синхронно, тем самым обеспечивается корректность конструкции на уровне геометрии и заложенного конструкторского замысла. На рисунке 3 представлено конфигурирование 3D-модели гайки (см. рис. 1) по значениям выделенных

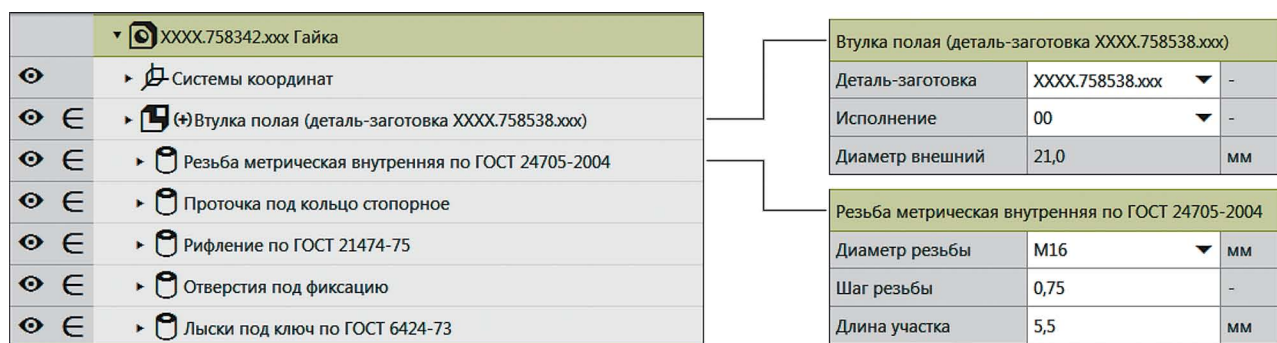


Рис. 2. Дерево построения 3D-модели как система типовых макрообъектов



проектных параметров; несмотря на различия конструкций, все детали обобщаются по признаку их функционального назначения. Очевидно, что подобного уровня автоматизации не достичь в рамках базовой параметризации в САПР.

Модификация проектного решения изменением значений параметров макрообъектов соответствует модульному принципу [9], преимущество которого заключается в унификации типовых элементов, способствуя минимизации временных затрат на формирование нового проектного решения. Модифицируемое проектное решение сохраняет конструктивную корректность (не только геометрии и структуры изделия, но и его смыслового содержания) за счет задаваемой на уровне макрообъекта системы предусловий.

Внесение конструкторских данных в проектное решение на уровне 3D-макрообъекта позволяет перейти от терминов САПР к терминам узкой предметной области.

Модифицируемость изделий уровня «Сборочная единица»

Конфигурирование конструкции деталей-компонент (см. рис. 3) задает вариативность изделий на уровне сборочных единиц (узлов), определяемую диапазоном требуемых характеристик. На рисунке 4 представлена структура и сборочный чертеж разъема из состава коаксиального соединителя (вилки), состоящего из 5 деталей. Такая 3D-сборка является относительно простой (в плане моделирования) и содержит ~10 сопряжений между компонентами.

Вариативность данной сборочной единицы, вызванная различиями в конструкторских параметрах на уровне ее деталей-компонент, представлена на рисунке 5. Как видно, сборки отличаются конфигурациями деталей «Корпус» (поз. 1) и «Гайка» (поз. 5) и имеют различные присоединительные (к ответной части корпуса) размеры. Локальные параметры, такие как «Тип рифления», «Количество



Рис. 3. Конфигурирование 3D-модели детали по значениям проектных параметров

	▼ (+) XXXX.301613.xxx Разъем
☞	▶ Системы координат
☞ ☞	▼ (+) Компоненты
☞ ☞	▶ (+) XXXX.713568.xxx Корпус
☞ ☞	▶ (+) XXXX.723211.xxx Ободок
☞ ☞	▶ (+) XXXX.745119.xxx Прокладка
☞ ☞	▶ (+) XXXX.754176.xxx Кольцо
☞ ☞	▶ (+) XXXX.758442.xxx Гайка
☞ ☞	▶ Сопряжения

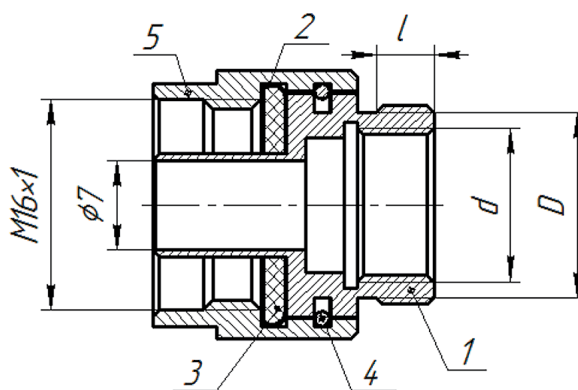
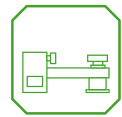


Рис. 4. Дерево построения (структура) сборочной 3D-модели (подсборки).

Обозначения на чертеже: 1 – корпус, 2 – ободок, 3 – прокладка, 4 – кольцо, 5 – гайка; d – резьба внутренняя, D – резьба внешняя, l – длина участка присоединительного (с резьбой внешней)



торцевых пазов» и др., задаются на уровне соответствующих деталей. Специальные параметры, такие как «Расстояние от гайки до корпуса» и «Длина участка резьбы» (регламентируются согласно стандарту [6]), описывающие непосредственно сборочную единицу (узел), задаются только через ее дерево построения и впоследствии определяют значения локальных параметров деталей-компонент.

Важный аспект заключается в сопряжении компонент сборки не к геометрическим, а к структурным элементам друг друга, что позволяет сохранять корректность конструкции при ее повторном использовании (модификации), включающем изменение исходной геометрии, нивелируя потребность в переопределении всех сопряжений заново. Это актуально при высокой сложности проектируемого узла, так как необходимы значительные временные и трудовые затраты на его

формирование, а также при изменении структуры компонентов из-за неизбежного нарушения целостности сборки.

Наибольший интерес в плане автоматизации модифицируемости проектных решений вызывают законченные функциональные единицы по причине возможности управления их конструкцией, используя проектные параметры верхнего уровня. В качестве примера такой единицы рассматривается соединитель коаксиальный – вилка кабельная типа III «Экспертиза» по ГОСТ 20265-83, на рисунке 6 представлена структура его 3D-сборки: она состоит из 2 подборок и 6 деталей. Стоит напомнить, что каждый из структурных компонентов сборки представляет собой систему 3D-макрообъектов вида $Mod^{3D} = \Sigma M_k O_b \langle n p_k \rangle_j$, $j = \overline{1, n}$, комплект значений параметров которых определяет экземпляр (конфигурации) проектного решения. Иными словами, дерево



Рис. 5. Конфигурирование сборочной 3D-модели (подборки)

	▼ (+)XXXX.434522.xxx Вилка
☞	▼ Системы координат
☞	▶ Начало координат
☞	▼ (+)Компоненты
☞	▶ (+)XXXX.301613.xxx Разъем
☞	▶ (+)XXXX.304591.xxx Стержень
☞	▶ (+)XXXX.711124.xxx Втулка
☞	▶ (+)XXXX.715351.xxx Корпус
☞	▶ (+)XXXX.723231.xxx Цанга
☞	▶ (+)XXXX.745112.xxx Прокладка
☞	▶ (+)XXXX.745322.xxx Прижим
☞	▶ (+)XXXX.758493.xxx Шайба

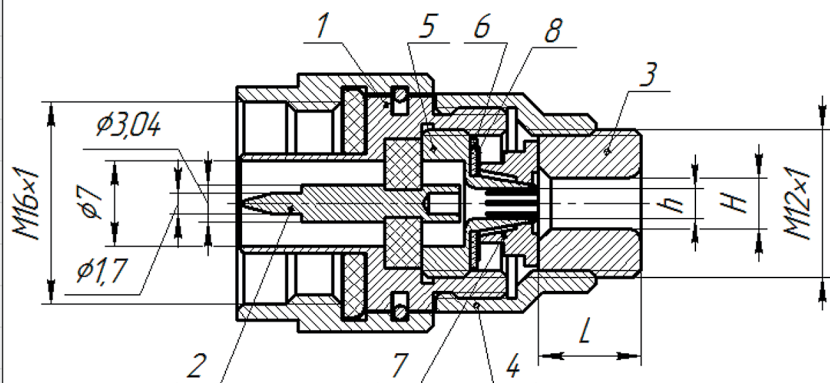
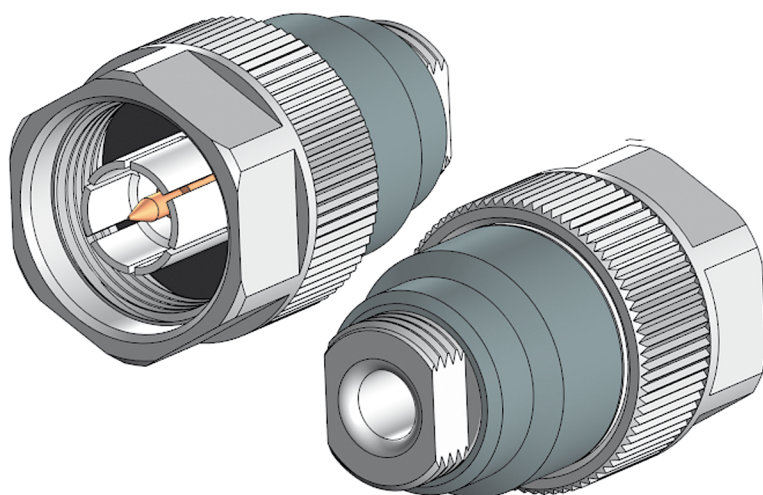


Рис. 6. Дерево построения (структура) сборочной 3D-модели. Обозначения на чертеже: 1 – разъем (подборка), 2 – стержень (подборка), 3 – втулка, 4 – корпус, 5 – цанга, 6 – прокладка, 7 – прижим, 8 – шайба; h – диаметр отверстия под изолятор (оплетку) кабеля, H – диаметр отверстия под внешнюю оболочку кабеля



XXXX.434522.xxx Вилка		
Обозначение	XXXX.434522.xxx	-
Наименование	Вилка	-
Тип соединителя	Тип III по ГОСТ 20265-83	▼ -
Тип разъема	Вилка кабельная	▼ -
Сечение канала	7,00 / 3,04	мм
Марка кабеля	РК-50-3-11	▼ -
Длина общая	32,90	мм

XXXX.723231.xxx Цанга		
Диаметр контакта	2,60	мм

XXXX.711124.xxx Втулка		
Диаметр втулки	5,00	мм

Рис. 7. Проектное решение в виде сборочной 3D-модели

построения сборочной 3D-модели есть система ассоциативно взаимосвязанных параметрических 3D-шаблонов, управляемых значениями исходных проектных параметров.

Данная вилка как конструктивно законченное изделие в соответствии со стандартом [6] описывается такими параметрами, как «Тип соединителя», «Тип разъема», «Марка кабеля» и др., являющимися «верхнеуровневыми», так как описывают не локальную геометрию, а итоговую конструкцию в плане ее функционального назначения. Экземпляр проектного решения в виде сборочной 3D-модели вилки и часть его конструкторских параметров представлены на рисунке 7. Как видно, параметр «Марка кабеля» определяет конструкцию на уровне двух компонент: втулки (поз. 3, размер H) и цанги (поз. 7, размер h), в то время как первые два параметра определяют параметры и структуры практически всех компонент.

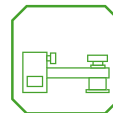
Экземпляры проектных решений, формируемые из единого дерева построения сборочной 3D-модели, отличаясь значениями конструкторских параметров и, как следствие, структурой, обобщаются до уровня класса семантического подобия, т.е. подобия по конструктивному исполнению и функциональному назначению. Унификация и систематизация проектных решений на основе такого уровня подобия является верхним уровнем абстракции и не реализуется в стандартном функционале САПР.

Сформированное проектное решение в виде сборочной 3D-модели функционального узла впоследствии предоставляет возможность для автоматизированной генерации отдельных 2D-фрагментов, компилирующих информационные образы типовых 3D-макрообъектов с отображением исполнительных размеров, позиционных обозначений и иной информации, которые после ручной доработки представляют собой полноценный конструкторский документ, соответствующий ЕСКД.

Заключение

Конфигурирование сборочных 3D-моделей узлов по функциональным параметрам в рамках единого класса позволяет повысить эффективность автоматизации при повторном использовании проектных решений в задачах геометрического моделирования за счет сохранения заложенного в исходное решение конструкторского замысла [10]. Устранение ошибок в 3D-геометрии и, как следствие, необходимости ее перестраивания позволяют значительно снизить временные и трудовые затраты на формирование проектного решения путем модификации.

Сохранение конструктивно-функциональной целостности проектных решений в процессе модификации позволяет создавать библиотеки унифицированных объектов различного уровня с широким диапазоном вариативности. Такие библиотеки закрепляются за конструкторскими секторами,



специализирующимися на узкой предметной области.

Внесение конструкторских данных в проектное решение и последующая модификация их значений на примере класса коаксиальных СВЧ устройств реализуются разработанным комплексом программных средств [11], выполненным в виде надстройки к САПР «Компас-3D». Дальнейшее развитие предлагаемого подхода связано с интеграцией с САЕ-системой для возможности конфигурирования конструкции изделия по итогам электромагнитного расчета для получения требуемых параметров.

Сведения о финансировании

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и Ульяновской области в рамках научного проекта №18-47-730028.

Список литературы

1. Войт Н. Н., Кириллов С. Ю., Бригаднов С. И., Уханова М. Е. и др. Разработка метода формирования библиотек экземпляров проектных решений на базе онтологии для применения концепции повторного использования на производстве // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2020. Т. 18, № 1. С. 27–36.
2. Ларссон Я. Важность повторного использования проектных решений // САПР и графика. 2014. № 2 (208). С. 70–73. URL: <https://sapr.ru/article/24386> (дата обращения: 30.10.2020).
3. Цыганков Д. Э., Шайхеева Г. Р. Автоматизация модификации механических узлов в САД-системе // Автоматизированное проектирование в машиностроении: материалы VII Международной научно-практической конференции. Новокузнецк: НИЦ МС, 2019. № 7. С. 93–97.
4. Федоров В. К., Гужевкин К. С., Гвоздарев Р. С. Разработка модификаций базовых моделей изделий РЭС методом внесения изменений в конструкцию аналога // Качество. Инновации. Образование. 2012. № 4 (83). С. 61–63.
5. Джуринский К. Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. М.: Техносфера, 2006. 216 с.
6. ГОСТ 20263-83. Соединители радиочастотные коаксиальные. Присоединительные размеры. М.: Издательство стандартов, 1984. 12 с.
7. Цыганков Д. Э. Методы и средства конструктивно-функционального проектирования механических узлов радиотехнических изделий на основе процессной модели проектной деятельности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12. Ульянов. гос. техн. ун-т. Ульяновск, 2018. 248 с.
8. Цыганков Д. Э., Похилько А. Ф. Представление проектируемого изделия системой структурно-функциональных элементов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: сборник научных трудов. Ульяновск: УлГТУ, 2016. С. 250–252.
9. Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с.
10. Цыганков Д. Э. Технология структурно-семантического 3D-моделирования в комплексном процессе конструирования // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2017. № 4. С. 91–97.
11. Свидетельство № 2019666872. Модуль проектирования соединителей радиочастотных коаксиальных типа III «Экспертиза» по ГОСТ 20265-83: свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ / Д. Э. Цыганков, М. Г. Царев, Г. Р. Шайхеева; заявит. и правообл. Ульян. гос. техн. ун-т. № 2019665973; заявл. 06.12.2019; зарегистр. 16.12.2019; опублик. 16.12.2019, Бюл. № 12. 1 с.



Об авторах

Цыганков Денис Эдуардович – кандидат технических наук, инженер-конструктор 1-й категории лаборатории приемных устройств особого конструкторского бюро Акционерного общества «Ульяновский механический завод», Ульяновск, Российская Федерация.

Область научных интересов: методы автоматизации конструкторской деятельности, моделирование и проектирование СВЧ-устройств микрополоскового и коаксиального исполнений.

Шайхеева Гюзель Ринатовна – инженер-конструктор лаборатории приемных устройств особого конструкторского бюро Акционерного общества «Ульяновский механический завод», Ульяновск, Российская Федерация.

Область научных интересов: средства геометрического моделирования в процессе проектирования, схематическое моделирование радиоэлектронных СВЧ-устройств.

Горбачев Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент, начальник учебного управления федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», Ульяновск, Российская Федерация.

Область научных интересов: системы автоматизированного проектирования, интеллектуализация управления производственными процессами, основанная на знаниях.

Integration of Design Data into a Design Solution and their Modification in Problems of Geometrical Modelling

Tsygankov D. E.¹, Shaykheeva G. R.¹, Gorbachev I. V.²

¹ *Ulyanovsk mechanical plant, Ulyanovsk, Russian Federation*

² *Ulyanovsk state technical university, Ulyanovsk, Russian Federation*

This article considers an approach to achieving modifiability of design solutions in the form of digital 3D parts and assembly units in CAD systems. This approach is based on a modular principle, according to which a design solution is represented by a system of 3D macro-objects. Such macro-objects are typical of a given subject area, have semantic content and are described by a set of design parameters. The variability of selected parameters forms a class of design solutions, which, although differing in terms of geometry and structure, have common structural and functional specific features. The main advantage of the proposed approach consists in the provision of the semantic integrity of a design solution during its modification and reuse.

Keywords: design process, CAD systems, automation, design solution, 3D model, modification, geometrical modelling, semantic content, reuse, design intent, modular principle

Information about the authors

Tsygankov Denis Eduardovich – Cand. Sci. (Engineering), Designer Engineer of the first category, JSC Ulyanovsk Mechanical Plant, Ulyanovsk, Russian Federation.

Research interests: design activities, automation methods, modelling and development of coaxial and strip microwave devices.

Shaykheeva Gyuzel Rinatovna – Designer Engineer, JSC Ulyanovsk Mechanical Plant, Ulyanovsk, Russian Federation.

Research interests: geometric modelling, designing technologies, schematic modelling of radio-electronic microwave devices.

Gorbachev Ivan Vladimirovich – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Head of Educational Department, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

Research interests: computer-aided design systems, knowledge-based intellectualization of industrial process control.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-93-102>

УДК 621.384.3:004.032.26

Некоторые результаты экспериментального исследования прототипа автономной инфракрасной системы распознавания наземных объектов

А. И. Мальцев¹, Д. Г. Откупман^{1,2}, В. К. Осташенкова¹, М. В. Останин¹

¹ Публичное акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Импульс», Москва, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Российская Федерация

Представлены результаты экспериментов с прототипом автономной инфракрасной системы распознавания наземных объектов на базе отечественных физических компонентов и открытой архитектуры сверточной нейронной сети YOLOv3. Объект распознавания – легковой автофургон. Нейронная сеть обучена на наборе изображений, снятых в видимом диапазоне. Анализируются инфракрасные видеокдры неидеального качества, снятые на движущемся и вибрирующем воздушном носителе – октокоптере.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, беспилотный летательный аппарат, дальность обнаружения, распознавание

Для цитирования: Мальцев А. И., Откупман Д. Г., Осташенкова В. К., Останин М. В. Некоторые результаты экспериментального исследования прототипа автономной инфракрасной системы распознавания наземных объектов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 1. С. 93–102. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-93-102>

For citation: Maltsev A. I., Otkupman D. G., Ostashenkova V. K., Ostanin M. V. Experimental study of a prototype for an autonomous infrared system for ground object recognition// Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 1. P. 93–102. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-93-102>

Поступила 25.11.2020 Отрецензирована 16.12.2020 Одобрена 18.01.2021 Опубликована 17.02.2021

Введение

Развитие теории и практики сверточных нейронных сетей (*Convolutional Neural Network*) обеспечило значительный прогресс алгоритмов автоматического распознавания объектов для различных гражданских и военных приложений. Типичный процесс построения системы распознавания с алгоритмом на базе нейронной сети предполагает наличие базы (*dataset*) изображений с маркированными (*labeled*) типовыми объектами в различных ракурсах и условиях. Алгоритм нейронной сети, реализованный в виде программы для ЭВМ, настраивается для обнаружения и распознавания заданного типа объектов путем обучения

(*training*) на большой базе изображений объектов, распознавание которых должна обеспечить система. Предполагается, что изображения должны быть сняты в том же диапазоне, в котором будет работать приемная часть системы распознавания. Однако для инфракрасной (ИК) области спектра подходящие наборы изображений, особенно для объектов, представляющих интерес в военных приложениях, малодоступны или имеют ограниченный объем и часто сняты в неподходящем ракурсе. Поэтому представляет интерес исследование возможностей распознавания при использовании базы изображений другого диапазона.

Применение различных архитектур сверточных нейронных сетей в системах, работающих в ИК диапазоне, было исследовано рядом авторов. В том числе в [1] было рассмотрено



применение различных архитектур, обученных на наборе данных видимого диапазона и на наборе данных, предоставленных компанией *FLIR*. Однако в статье не рассматривалась возможность использования архитектуры *YOLO*.

Для того чтобы заранее рассмотреть все возможности архитектуры *YOLOv3*, авторами данной статьи были изучены материалы, представленные в [2, 3]. Однако, несмотря на схожесть исследований с нашим исследованием в части обучения известной архитектуры *YOLOv3* на наборе изображений видимой области электромагнитного спектра для применения в ИК системах, в большинстве зарубежных публикаций основное внимание уделяется распознаванию людей, что не представляло интереса для нас, к тому же в известных публикациях не уделено внимание анализу результатов обработки видеопотока, снятого с колеблющегося и вибрирующего носителя.

В доступных отечественных публикациях представленный в настоящей работе подход также не отражен. Рассматриваются либо автоматические тепловизионные системы распознавания с другими архитектурами, либо иные средства распознавания [4, 5].

Основная часть

Проведено экспериментальное исследование прототипа автономной системы распознавания

наземных объектов со стороны верхней полусферы, построенной на основе приемной части (объектив, матрица) длинноволновой части ИК диапазона и алгоритма распознавания на базе нейронной сети. Для практической реализации приемной части выбраны отечественные компоненты компании «ОКБ «Астрон» [6] – микроболометрический модуль на оксиде ванадия с разрешением 640×480 , шагом 17 мкм и беззатворной калибровкой, а также тепловизионный германиевый объектив с пассивной атермализацией, фокусным расстоянием 100 мм, относительным отверстием 1:1,4 и качеством изображения близким к дифракционному пределу. Приемная часть с аппаратурой передачи данных размещалась на беспилотном летательном аппарате (БЛА) – октокоптере. Упрощенная схема эксперимента представлена на рисунке 1. Общий вид полетной части экспериментального оборудования представлен на рисунке 2.

Для разработки алгоритма распознавания выбрана описанная в открытых источниках архитектура сверточной нейронной сети *YOLO* (*You Only Look Once*), обеспечивающая распознавание множественных объектов на изображениях и работающая с многочисленными классификациями объектов. По сравнению с другими известными архитектурами *YOLOv3* является одной из наиболее точных и быстрых действующих [7].

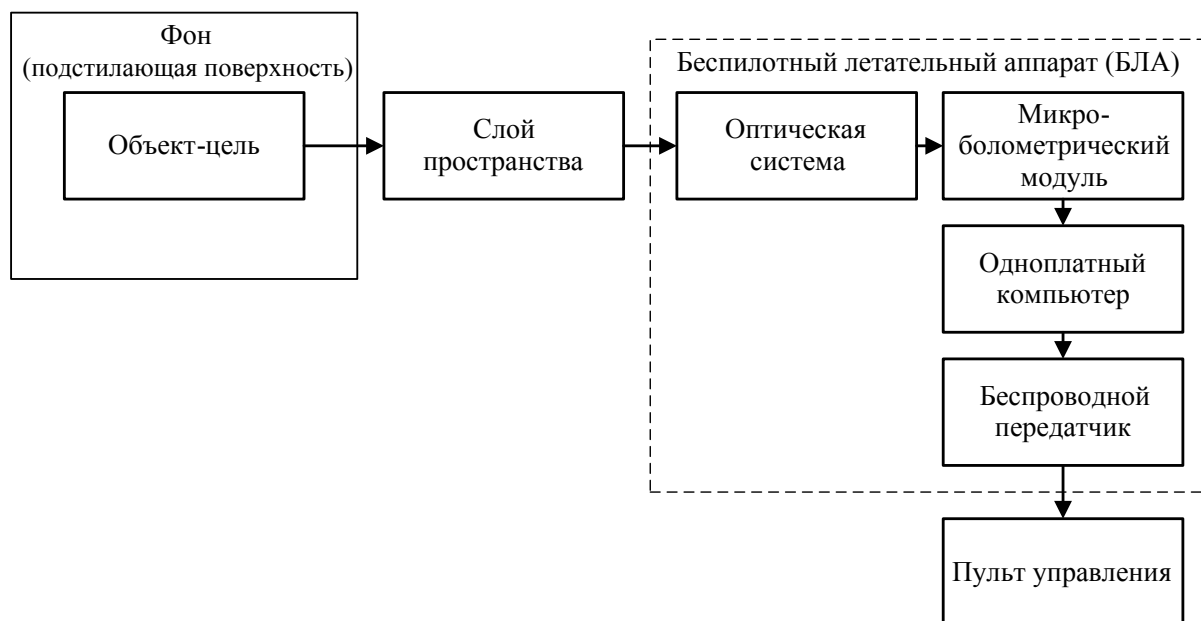


Рис. 1. Упрощенная схема эксперимента

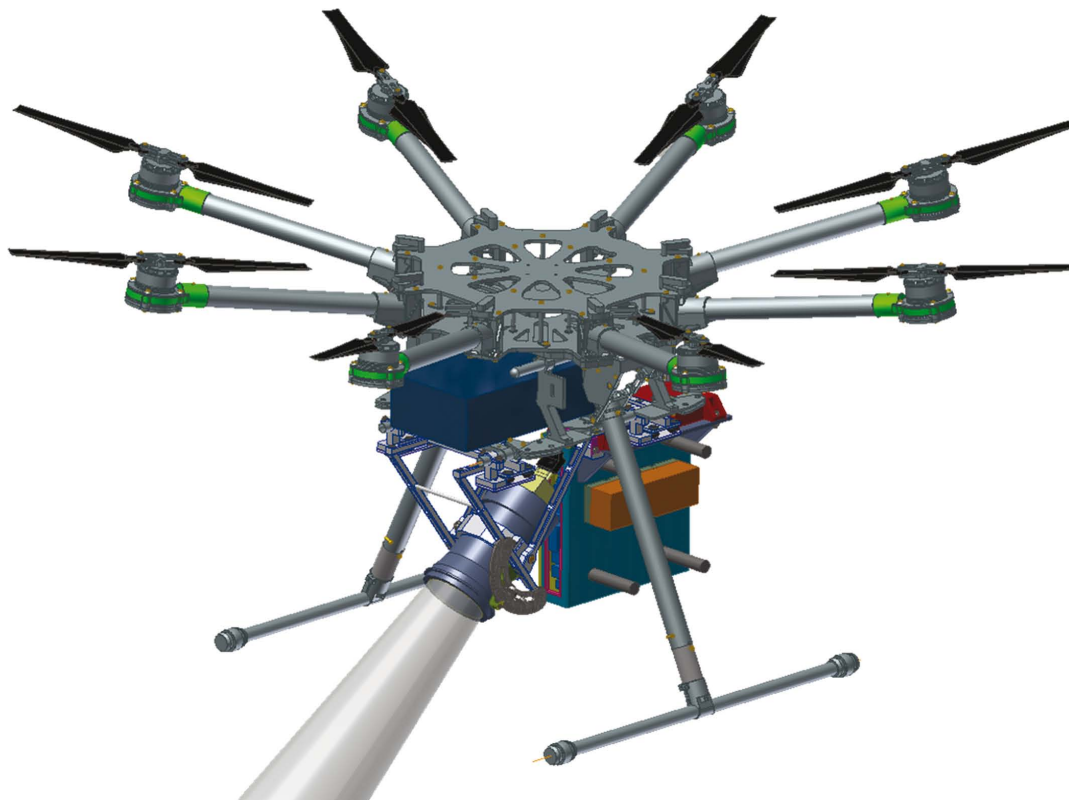


Рис. 2. Трехмерная модель беспилотного носителя с аппаратурой

Если говорить о теоретических основах работы алгоритма *YOLOv3*, то стоит упомянуть, что классификатор любой сверточной нейронной сети обычно при каждой интерпретации делает предположение того, какой тип объекта находится в окне. Для каждого изображения приходится выполнять большое количество прогнозов, характеризуемое четырехзначными числами. В связи с этим работа алгоритма проходит довольно медленно. Именно эту отрицательную черту помогает устранить архитектура *YOLO*, преимущество которой в том числе отражено в названии – «*You Only Look Once*».

Сверточная нейронная сеть *YOLO* использует все изображение для предопределения каждой ограничивающей рамки (*bounding box*). Она также прогнозирует все рамки для каждого класса изображений одновременно. Это означает, что *YOLO* за один раз анализирует все изображение и все объекты, присутствующие на нем. Этот факт становится ключевым для продолжительности обработки кадра. Подтверждением преимуществ варианта архитектуры *YOLOv3* является график, представленный на рисунке 3, где показано

быстродействие *YOLOv3* в сравнении с другими известными архитектурами. Как следует из данных, приведенных на рисунке 3, при обучении на одном и том же наборе данных *COCO dataset* и при сравнимой средней точности обнаружения объекта (*mAP – mean Average Precision*) *YOLOv3* превосходит остальные рассмотренные сети по скорости нахождения объекта.

Для создания специализированной программы, реализующей нейронную сеть, выбран высокоуровневый язык программирования *Python* с дополнениями в виде открытых библиотек (модулей) для научных вычислений, глубокого обучения и компьютерного зрения (*NumPy, TensorFlow, Keras, OpenCV*).

В качестве объекта наблюдения был выбран легковой автофургон (4150×1960×1820 мм).

Для выбора оптимальной дальности распознавания объекта определенного размера можно воспользоваться упрощенным критерием, рассмотренным в [8]:

$$L(N) = \frac{v \cdot f' \cdot h_{\text{кр}}}{N},$$

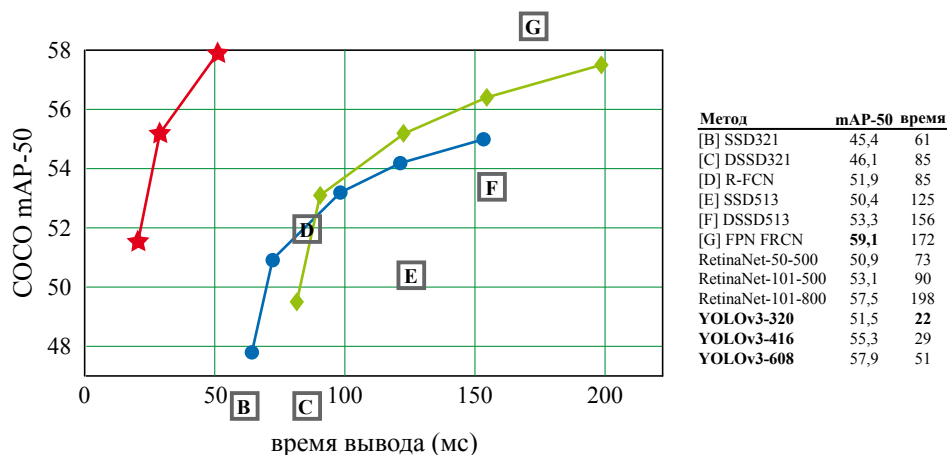


Рис. 3. График быстродействия на примере различных архитектур, обученных на наборе данных *COCO* (*Common Objects in Context*) [7]

— YOLOv3, — RetinaNet-50, — RetinaNet-101

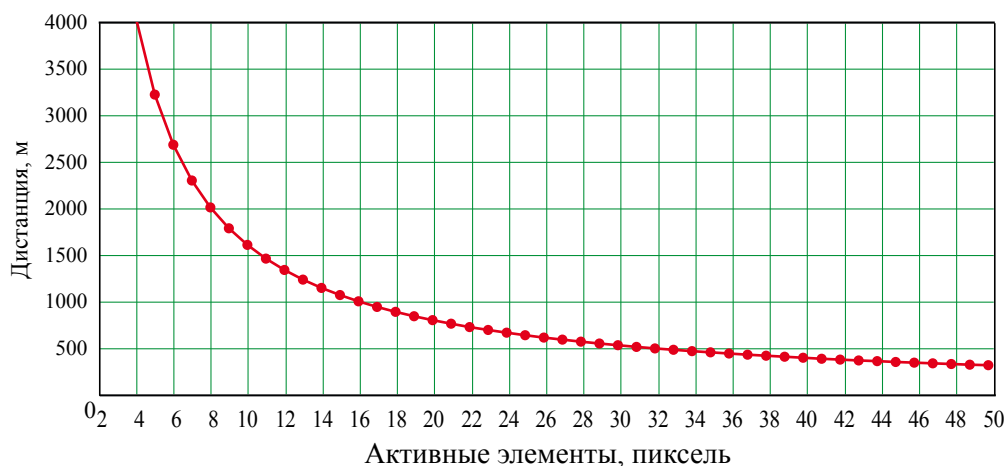


Рис. 4. Теоретическая зависимость дальности обнаружения от заданного критерием обнаружения числа пикселей разрешения на изображении объекта при критическом размере объекта 2,75 м. Зависимость получена для выбранной конфигурации приемной системы в геометрическом приближении

где L – дальность распознавания (дистанция до объекта), м;
 $\nu = 58,82$ 1/мм – пространственная частота;
 $f' = 100$ мм – фокусное расстояние;
 $h_{кр} = 2,7$ м – критический размер объекта;
 N – количество активных элементов (пикселей), шт.

На рисунке 4 приведена определенная в геометрическом приближении зависимость дальности обнаружения нашего объекта от числа пикселей разрешения, заданного критерием обнаружения.

Исходя из допущения о разрешении, заведомо достаточном для обнаружения рассматриваемого объекта, а также исходя из удобства работы на площадке, выбранной для экспериментов, съемку объекта наблюдения было

решено проводить с борта БЛА на дальности около 250 м. Для того чтобы оценить вероятности распознавания объекта на других дальностях, полученные исходные изображения обрабатывались путем объединения пикселей разрешения, кратного изменению дальности.

Представленные ниже результаты съемок получены в дневное время на фоне подстилающей поверхности типа «неоднородный луг – грунтовая дорога». Объект наблюдения (автофургон) в процессе съемки разворачивался, соответственно менялся ракурс наблюдения объекта. Начальный и конечный кадры необработанной (без цифровых улучшений) видеозаписи наблюдаемого сюжета в длинноволновой части ИК диапазона представлен на рисунке 5.



а



б

Рис. 5. Начальный и конечный кадры съемки сюжета с объектом наблюдения

В связи с отсутствием доступных достаточно объемных баз изображений объектов в длинноволновой части ИК диапазона обучение нейросети проводилось по открытой базе изображений видимого диапазона *COCO dataset* [9] с маркированными объектами типов «автомобиль», «автобус», «грузовой автомобиль». Отметим, что создатели *YOLO* предоставляют открытый исходный код и подробное описание для обучения собственной модели на различных наборах данных, в том числе на наборе данных *COCO dataset* [10]. Таким образом, при обучении использовались изображения видимого диапазона форматом 416×416, количество которых составляло более 10 000, точность распознавания при обучающей выборке составляла более 0,8 (80 %).

Обученной таким образом программе, реализующей нейросеть, предъявлялись кадры видеосюжета с объектом, разворачивающимся от положения «сверху под углом – в лоб» до положения «сверху под углом – в борт». Программа обнаруживала объект на кадре и распознавала его, определяя тип объекта из набора «автомобиль», «автобус», «грузовой автомобиль» и оценивая вероятность распознавания типа объекта (рис. 6).

Соответственно, для типа «автомобиль» это будет вероятность правильного распознавания, а применительно к двум другим типам – вероятность принятия действительного объекта за объект другого типа, то есть вероятность ложного распознавания.

Для иллюстрации того, как меняются точечные оценки вероятностей от кадра к кадру при развороте наблюдаемого объекта, был построен график, на котором ось абсцисс – номер кадра, ось ординат – вероятность. Пример, поясняющий структуру графика, приведен на рисунке 7.

Следует отметить сильный разброс оценок вероятности от кадра к кадру при достаточно устойчивом характере аппроксимирующих оценок, что свидетельствует о целесообразности накопления оценок по нескольким кадрам для повышения вероятности правильного принятия решения алгоритмом распознавания, реализуемом в конечном изделии.



Рис. 6. Визуализация процесса распознавания для одного из кадров. Над рамкой, которой выделен обнаруженный объект, показан тип объекта, распознанного на кадре с максимальной вероятностью, и значение вероятности

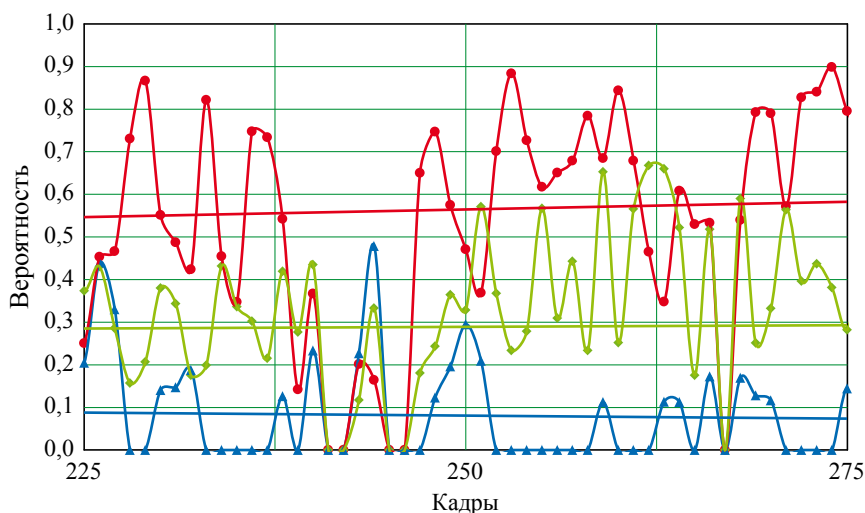


Рис. 7. Графическое представление процесса анализа последовательности кадров при развороте объекта наблюдения. Абсцисса – номер кадра, ордината – вероятность. Вероятность правильного распознавания типа «автомобиль» – красные точки, вероятность ложного распознавания типа «автобус», «грузовой автомобиль» – треугольник синего и ромб зеленого цвета. Точки, попавшие на ось абсцисс, соответствуют ситуациям, когда оценка программой вероятности распознавания составляет менее 0,1. Сплошные цветные линии – линейная аппроксимация значений вероятностей

— Автомобиль, — Автобус, — Грузовой автомобиль

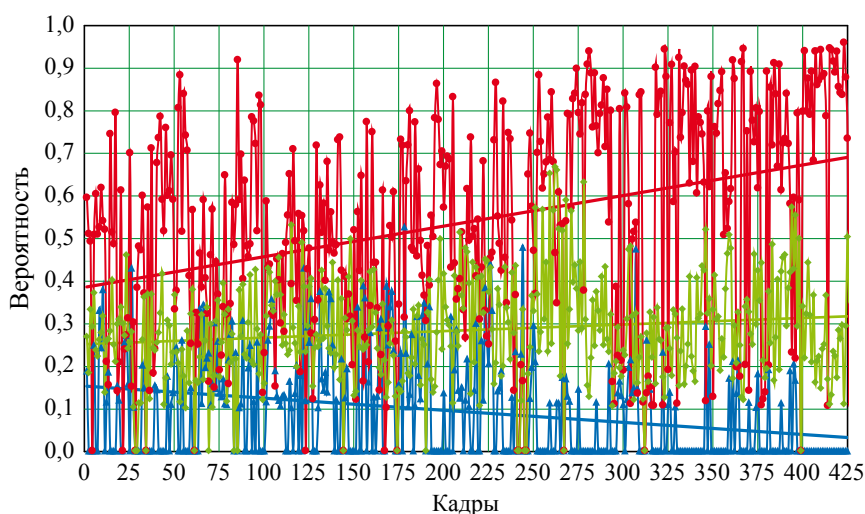


Рис. 8. Результаты покадровой оценки вероятности распознавания в обнаруженном объекте типа «автомобиль» (правильное), «автобус», «грузовой автомобиль» (ложное) для последовательности кадров от положения легкового автофургона «в лоб» до положения «в борт». Линейная аппроксимация показывает, как менялась усредненная вероятность в зависимости от ракурса наблюдения объекта. Точки на оси абсцисс соответствуют ситуациям, когда оценка вероятности распознавания составляет менее 0,1

— Автомобиль, — Автобус, — Грузовой автомобиль

Результаты обработки последовательных кадров от положения «в лоб» до положения «в борт» представлены на рисунке 8.

Для оценки вероятности распознавания объекта на дальностях 500 и 1000 м проводилась цифровая обработка полученного видеофайла с целью имитации увеличения дальности наблюдения (объединение 2×2 и 4×4 соседних пикселей изображения в кадре

с усреднением яркости). Результаты анализа для обработанных последовательностей кадров представлены на рисунке 9.

Сравнение результатов, представленных на рисунках 8 и 9, показывает, что при увеличении дальности (ухудшении разрешения) происходит существенное снижение вероятности правильного распознавания объекта при неблагоприятном ракурсе наблюдения.

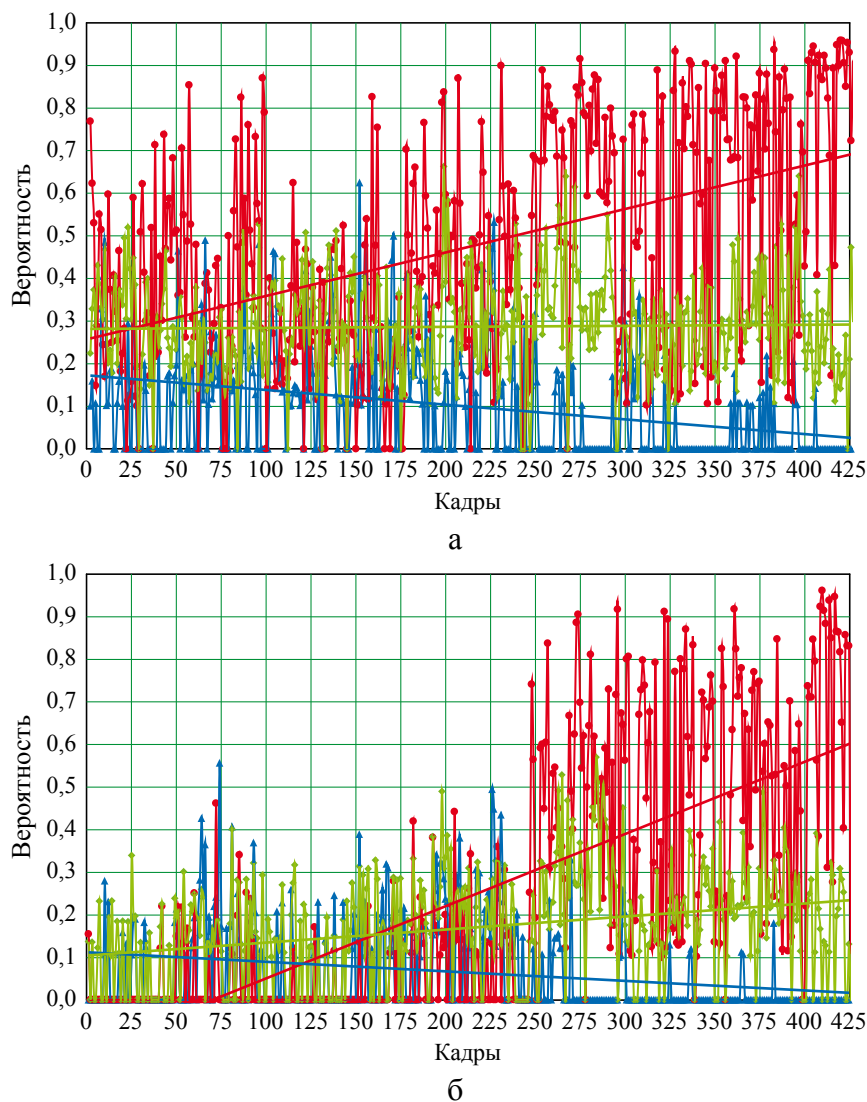


Рис. 9. Результаты оценки вероятности распознавания в обнаруженном объекте типа «автомобиль», «автобус», «грузовой автомобиль»: а) при имитации дальности наблюдения 500 м (разрешение 320×240); б) при имитации дальности наблюдения 1000 м (разрешение 160×120) объект распознается уверенно как «автомобиль» только при развороте в положение «в борт». Линейная аппроксимация показывает, как менялась усредненная вероятность в зависимости от ракурса наблюдения объекта. Точки на оси абсцисс соответствуют ситуациям, когда оценка вероятности распознавания составляет менее 0,1

— Автомобиль, — Автобус, — Грузовой автомобиль

Для качественной иллюстрации этого в таблице для разных дальностей приведены результаты линейной аппроксимации оценки вероятности в начале анализируемой записи при расположении «сверху под углом – в лоб»

и для конца записи при расположении «сверху под углом – в борт».

Для проверки работоспособности обученной программы распознавания в сложной фоновой обстановке при наличии дрожаний

Таблица

Результаты линейной аппроксимации вероятности правильного распознавания для разных дальностей и ракурсов наблюдения

Дальность	Линейно аппроксимированная вероятность	
	«сверху под углом – в лоб»	«сверху под углом – в борт»
250 м	~ 0,38	~ 0,7
500 м	~ 0,26	~ 0,7
1000 м	0	~ 0,6



а



б

Рис. 10. Фрагмент видеозаписи сюжета «одно-двухэтажные дома – заборы – дороги с покрытием – легковые автомобили»: а) исходная видеозапись; б) видеозапись с распознаванием.

камеры и «смаза» изображения была проведена видеосъемка сюжета пригородной застройки «одно-двухэтажные дома – заборы – дороги с покрытием – легковые автомобили» при произвольных движениях БЛА – носителя аппаратуры. Фрагмент полученной видеозаписи в исходном виде и с обнаруженными программой распознавания объектами приведен на рисунке 10.

Реализованный в программе распознавания алгоритм сети продемонстрировал в условиях смаза и дрожания уверенное распознавание визуально хорошо различимого на фоне объекта. Но даже более важным представляется то, что, во-первых, была получена ненулевая оценка вероятности правильного распознавания в сложных фоновых условиях визуально плохо различимого объекта (ближе к левому верхнему углу картинки), и, во-вторых, ни разу комбинация контрастных фоновых участков не была принята за искомый объект.

Выводы

1. Разработан прототип автономной системы распознавания наземных объектов на основе отечественного матричного приемника длинноволновой части ИК диапазона, отечественного объектива и программы, реализующей алгоритм сверточной нейронной сети с архитектурой типа *YOLOv3*, взятой из открытых источников.

2. Экспериментальное исследование разработанного прототипа видеосъемкой с воздушного носителя и последующей наземной

обработкой кадров показало его работоспособность, т.е. способность, при размещении на движущемся воздушном носителе, выдавать ИК изображения с разрешением, достаточным для обнаружения и распознавания заданного объекта, а также способность программы распознавания обеспечивать распознавание типа объекта.

3. Нейронная сеть, обученная на наборе изображений типовых объектов в видимом диапазоне, показала достаточно высокую вероятность распознавания объектов на изображениях, полученных в длинноволновой части ИК диапазона, что упрощает подготовку баз изображений при разработках реальных прикладных устройств.

4. Обработка видеопотока, снятого с воздушного носителя, подверженного колебаниям и вибрациям, показала наличие существенного разброса оценок вероятности распознавания объекта для соседних кадров видеосъемки, поэтому при разработке алгоритма функционирования реального прикладного устройства целесообразно проводить совместную обработку серии последовательных кадров с накоплением оценки вероятности.

5. Созданный прототип системы распознавания в составе приемной части, выполненной на отечественной элементной базе, и открытого алгоритма сверточной нейронной сети *YOLOv3* может служить основой для решения прикладных задач, в том числе для разработок координаторов, способных автономно обнаруживать заданные объекты.



Список литературы

1. Devaguptapu Ch., Akolekar N., Sharma M.M., Balasubramanian V.N. Chaitanya Devaguptapu Borrow from Anywhere: Pseudo Multi-modal Object Detection in Thermal Imagery [Electronic resource] // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW). 2019. 10 p. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Borrow-From-Anywhere%3A-Pseudo-Multi-Modal-Object-in-Devaguptapu-Akolekar/b95ce8e6249302e9f4c88248ab587f43760d88b1> (date of request: 01.10.2020). DOI: 10.1109/CVPRW.2019.00135
2. Kristo M., Ivasic-Kos M., Pobar M. Thermal Object Detection in Difficult Weather Conditions Using YOLO // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 125459–125476. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007481
3. Ivašić-Kos M., Kristo M., Pobar M. Human detection in thermal imaging using YOLO // Conference Paper. April, 2019. 5 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/333360405> (date of request: 01.10.2020). DOI: 10.1145/3323933.3324076
4. Мингалев А.В., Белов А.В., Габдуллин И.М., Агафонова Р.Р., Шушарин С.Н. Распознавание тест-объектов на тепловизионных изображениях // «Компьютерная оптика». 2019. Т. 43, № 3. С. 402–411. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-402-411
5. Фомичева О.А., Стреляев С.И. Методы распознавания ИК-изображения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 11. С. 207–213.
6. Оптико-механическое конструкторское бюро «Астрон»: сайт. – МО, г. Лыткарино, 2020. URL: <https://astrohn.ru> (дата обращения: 01.09.2020).
7. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement. 8 April, 2018. arXiv:1804.02767v1 [cs.CV]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1804.02767.pdf> (date of request: 01.09.2020).
8. Якушенков Ю.Г., Тарасов В.В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Лорос, 2004. 444 с.
9. COCO – Common Objects in Context: website. 2015. URL: <https://cocodataset.org> (date of request: 01.09.2020).
10. Survival Strategies for the Robot Rebellion: website. 2015. URL: <https://pjreddie.com/> (date of request: 01.09.2020).

Об авторах

Мальцев Андрей Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник – заместитель главного конструктора Публичного акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Импульс», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: высокоточное вооружение, системы самонаведения.

Откупман Дмитрий Григорьевич – старший инженер-исследователь Публичного акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Импульс», Москва, Российская Федерация; преподаватель кафедры оптико-электронных приборов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: синтез оптических систем, тепловидение, компьютерное зрение, фотоника, лазерная техника.

Осташенкова Виктория Константиновна – инженер-исследователь Публичного акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Импульс», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: инфракрасная техника, искусственные интеллектуальные системы.

Останин Михаил Васильевич – начальник отдела Публичного акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Импульс», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: инфракрасная техника, оптико-электронные системы, лазерная дальнометрия.



Experimental study of a prototype for an autonomous infrared system for ground object recognition

Maltsev A. I.¹, Otkupman D. G.^{1,2}, Ostashenkova V. K.¹, Ostanin M. V.¹

¹ JSC Research and Production Enterprise "Impulse", Moscow, Russian Federation

² Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russian Federation

The results of experiments with a prototype of an autonomous infrared system for recognition of ground objects based on domestic physical components and open architecture of the YOLOv3 convolutional neural network are presented. The object of recognition is a car van. The neural network is trained on a set of images taken in the visible range. Infrared video footage of imperfect quality recorded by a moving and vibrating air carrier – octocopter – is analysed.

Keywords: convolutional neural network, unmanned aerial vehicle, detection range, recognition

Information about the authors

Maltsev Andrey Ivanovich – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Deputy Chief Designer, JSC Research and Production Enterprise "Impulse", Moscow, Russian Federation.

Research interests: precision weapons, homing systems.

Otkupman Dmitriy Grigoryevich – Senior Research Engineer, JSC Research and Production Company "Impulse", Moscow, Russian Federation; Lecturer, Department of Optical Electronic Devices, Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russian Federation.

Research interests: synthesis of optical systems, thermal imaging, computer vision, photonics, laser technology.

Ostashenkova Viktorya Konstantinovna – Research Engineer, JSC Research and Production Company "Impulse", Moscow, Russian Federation.

Research interests: infrared technology, artificial intelligent systems.

Ostanin Mikhail Vasilievich – Departmental Head, JSC Research and Production Company "Impulse", Moscow, Russian Federation.

Research interest: infrared technology, optic-electronic systems, laser rangefinder.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-103-109>

УДК 004.414.23

Сеть-на-кристалле нового поколения микропроцессоров с архитектурой «Эльбрус»

Е. С. Кожин, А. С. Кожин

Акционерное общество «МЦСТ», Москва, Российская Федерация

Приведено описание сети-на-кристалле нового поколения микропроцессоров с архитектурой «Эльбрус» с учетом особенностей физического проектирования. Сеть-на-кристалле играет центральную роль в процессе масштабирования микропроцессора, связывая между собой все основные компоненты системы, так как обеспечивает передачу всех типов пакетов между устройствами. Характеристики сети-на-кристалле определяют пропускную способность и время доступа в подсистему памяти.

Ключевые слова: процессор, кристалл, топология, сетевой адаптер

Для цитирования: Кожин Е. С., Кожин А. С. Сеть-на-кристалле нового поколения микропроцессоров с архитектурой «Эльбрус» // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 1. С. 103–109. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-103-109>

For citation: Kozhin E. S., Kozhin A. S. Network-on-a-chip of a new microprocessor generation with the Elbrus architecture // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 1. P. 103–109. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-1-103-109>

Поступила 07.12.2020 Отрецензирована 10.12.2020 Одобрена 07.01.2021 Опубликована 17.02.2021

Текущее развитие универсальных высокопроизводительных процессоров в основном опирается на увеличение числа процессорных ядер на одном кристалле. И хотя в последнее время некоторые разработчики процессоров переходят к объединению нескольких кристаллов небольшой площади на общей подложке [1], большинство разработчиков продолжают проектировать многоядерные монолитные кристаллы, содержащие 28 и более процессорных ядер [2]. Помимо процессорных ядер, на кристалле размещается все большее количество банков кэш-памяти последнего уровня, контроллеров оперативной памяти (6–8 контроллеров на процессор), устройств ввода-вывода. Таким образом, современный высокопроизводительный процессор – это сложная распределенная система из десятков устройств, соединенных в общую систему с учетом требований по задержкам и пропускной способности соединений между устройствами.

В прошлом поколении микропроцессоров с архитектурой «Эльбрус» [3] на кристалле размещались 8 процессорных ядер, 8 банков общей кэш-памяти третьего уровня, 4 контроллера оперативной памяти и набор устройств ввода-вывода. Для их соединения использовались две среды коммутации: двунаправленная кольцевая шина [4], объединяющая процессорные ядра и кэш-память третьего уровня, и централизованный коммутатор, соединяющий кэш-память третьего уровня и устройства доступа в память, а также устройства ввода-вывода [5].

При проектировании нового семейства высокопроизводительных процессоров «Эльбрус» ставилась задача увеличить число процессорных ядер до двух раз, с 8 до 12–16. Для обеспечения сбалансированности системы требовалось нарастить объем кэш-памяти третьего уровня, а также пропускную способность доступа в оперативную память и ввод-вывод. Таким образом, число устройств разрабатываемого микропроцессора увеличивалось

Для построения сети-на-кристалле требуется решить целый ряд задач, от разработки сетевого протокола и принципа построения до проектирования отдельных коммутаторов. Данная работа посвящена выбору топологии и системы соединений узлов сети и разработке сетевых адаптеров устройств.

При разработке нового поколения микропроцессоров с архитектурой «Эльбрус» был выбран «плиточный» подход размещения устройств. При таком подходе ядро и ближайший банк кэш-памяти третьего уровня подключаются к сетевому коммутатору через сетевые адаптеры, как показано на рисунке 1.

Номер ядра, банка и коммутатора при этом совпадают. У такой структуры, называемой тайл (tile), роль внешних интерфейсов играют только сетевые порты коммутатора,

Все обмены между устройствами сетей-на-кристалле процессоров с архитектурой «Эльбрус» шестого поколения выполняются с помощью сообщений в соответствии с проприетарным системным протоколом. Сообщения имеют пять типов: первичные запросы, когерентные снуп-запросы, ответы с данными, ответы без данных, подтверждения. Каждое сообщение передается в виде пакета определенного размера, для передачи между узлами сети пакетов разных типов выделяются отдельные физические и виртуальные каналы.

В каждом сообщении содержится информация, позволяющая точно узнать тип и номер устройства назначения. По этой информации в сетевом адаптере при попадании пакета в сеть определяется сетевой адрес назначения пакета. Адрес назначения зависит от карты маршрутизации и топологии сети. После вычисления адреса назначения он добавляется в пакет и используется при прохождении всех маршрутизаторов. Некоторые сообщения, такие как когерентные снуп-запросы и ответы с данными, могут иметь несколько адресов назначения. В этом случае сообщение должно быть доставлено по маршрутам, соответствующим всем адресам назначения. Для экономии пропускной способности сети, сообщения с несколькими адресами назначения передаются по сети одним пакетом и расщепляются

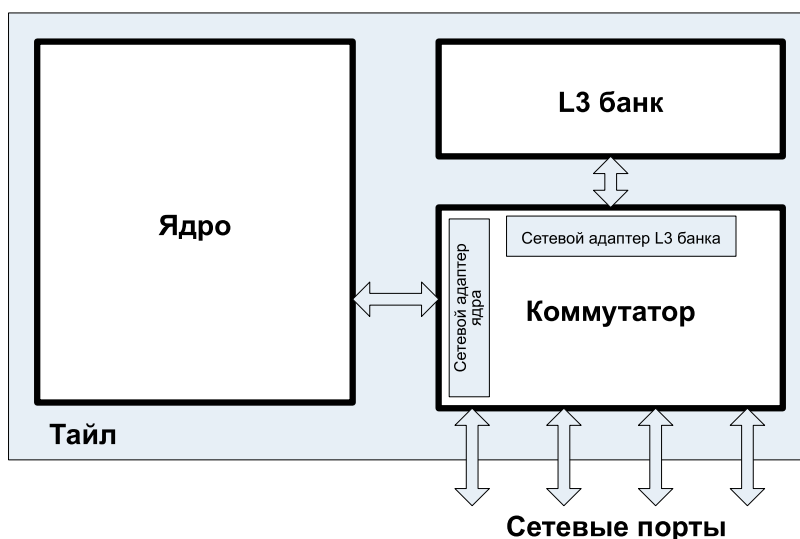


Рис. 1. Структура тайла



в узлах сети, когда маршруты доставки перестают совпадать. Когда пакет достигает тайла с требуемым адресом назначения, он выдается через сетевой адаптер устройству. Так как тайл содержит 2 абонента, в адресе назначения пакета присутствует информация, позволяющая однозначно определить устройство назначения в тайле.

Топология и адресация

Существует достаточно большое число различных сетевых топологий, но в отличие от компьютерных сетей, где устройства можно объединить в любую топологию, сети-на-кристалле имеют дополнительные физические ограничения. К основным ограничениям относятся планарное соединение блоков и невозможность использования диагональных

проводов. Помимо этого трассировка связей над блоками процессора ухудшает их временные характеристики.

Для построения сетей-на-кристалле с десятками узлов чаще всего используют топологию 2d mesh, пример такой сети с числом тайлов, равным 16, приведен на рисунке 2а. Всем тайлам присваиваются декартовы координаты вдоль осей X от 0 до 1 и вдоль оси Y от 0 до 7. Сетевой адрес формируется как объединение X и Y координат плюс номер сетевого адаптера в узле назначения. Такая топология позволяет реализовать очень простую маршрутизацию X-Y или Y-X без взаимных блокировок пакетов в сети. При маршрутизации X-Y пакет сначала передается вдоль оси X до достижения координаты узла-назначения, а потом вдоль

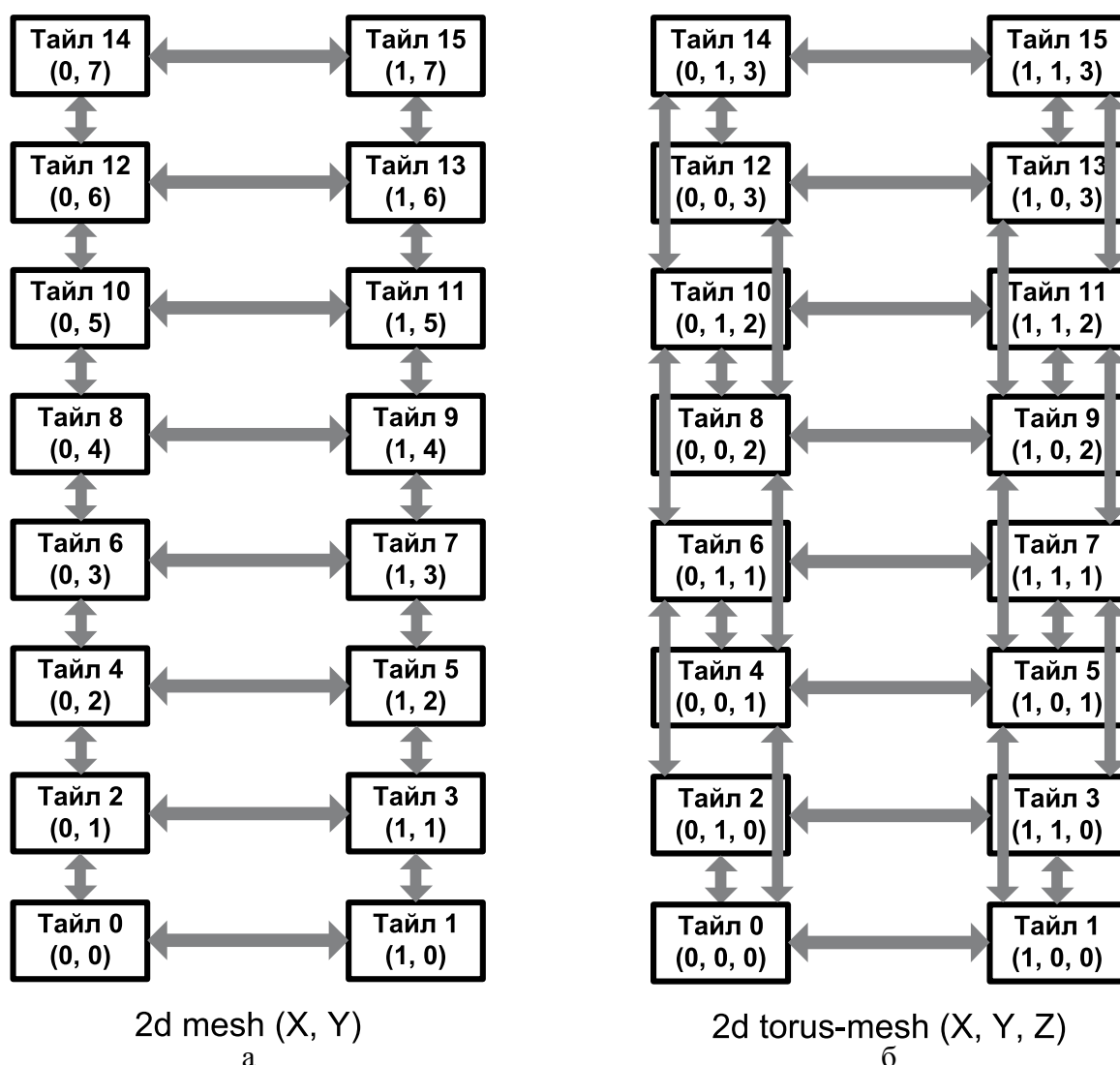


Рис. 2. Схемы топологий сетей-на-кристалле: а – сеть с топологией 2d mesh; б – сеть с топологией 2d torus-mesh



оси Y. Топология 2d mesh хорошо масштабируется до 256 узлов.

При выборе 2d mesh топологии важно, чтобы количество узлов вдоль обеих координат было равным, иначе система может оказаться несбалансированной. Для оценки пропускной способности сети используется параметр *bisectional width* – число линков, пересекающих «разрез» сети на две равные по числу узлов части в ее самом узком месте [6].

Для примера рассмотрим систему с 16 процессорными ядрами. Сбалансированной системой можно считать квадрат 4×4 , для нее параметр *bisectional width* равен 4. Топология 2d mesh 2×8 , приведенная на рисунке 2а, является несбалансированной, для нее параметр *bisectional width* равен 2. То есть при случайном трафике пакетов топология 2d mesh 2×8 имеет в два раза меньшую пропускную способность, чем топология 2d mesh 4×4 .

На практике не всегда возможно использовать сбалансированную топологию 2d mesh. При проектировании процессоров шестого поколения с архитектурой «Эльбрус» было выдвинуто требование размещать процессорные ядра в два столбца, что делало невозможным использовать топологию 2d mesh 4×4 . Использование топологии 2d mesh 2×8 было неэффективно из-за низкого значения параметра *bisectional width*.

Повысить параметр *bisectional width* сети можно путем добавления дополнительных связей. В топологии 2d mesh 2×8 используются 8 горизонтальных связей, что обеспечивает высокую пропускную способность пакетов вдоль оси X, но при этом только 2 вертикальных связи на каждой координате Y, ограничивающих пропускную способность сети. Поэтому для увеличения значения параметра *bisectional width* необходимо добавить вертикальные связи. В качестве решения была выбрана топология 2d torus-mesh, которая отличается от топологии 2d mesh 2×8 дополнительными 6 вертикальными связями, ее структура приведена на рисунке 2б. Эту топологию удобно рассматривать в трехмерном пространстве, где она будет выглядеть как 3d mesh $2 \times 2 \times 4$. При этом параметр *bisectional width* равен 4,

как у топологии 2d mesh 4×4 . Сетевой адрес формируется объединением координат X, Y, Z и номера сетевого адаптера в узле назначения. Для маршрутизации удобно использовать статическую маршрутизацию X-Y-Z, которая позволяет избежать взаимных блокировок пакетов внутри сети.

При проектировании сети-на-кристалле был проведен сравнительный анализ различных топологий сетей-на-кристалле для процессоров шестого поколения с архитектурой «Эльбрус» [7]. Рассматривались топологии для процессора с 8, 12 и 16 ядрами. В качестве сравнительных характеристик использовались задержка в сети по доставке пакета и достижимая пропускная способность сети. В результате исследования было получено, что для 8 процессорных ядер использование топологии 2d torus-mesh не дает выигрыша по сравнению с топологией 2d mesh. Для 12 процессорных ядер топология 2d torus-mesh позволяет повысить пропускную способность с 55 % (6,66 пакета за процессорный такт на всю систему) до 92 % (10,99 пакета за процессорный такт на всю систему) от максимально возможной пропускной способности, равной 12 пакетам за такт. Для 16 процессорных ядер топология 2d torus-mesh позволяет повысить пропускную способность практически в два раза, с 38 % (6,15 пакета за процессорный такт на всю систему) до 70 % (11,04 пакета за процессорный такт на всю систему) от максимально возможной пропускной способности, равной 16 пакетам за такт.

Если выбор топологии 2d torus-mesh для 16-ядерного процессора с размещением ядер в 2 ряда имеет очевидные преимущества, то в случае 12-ядерного процессора прирост пропускной способности от реализации более сложной топологии не такой существенный. При этом сетевой коммутатор для топологии 2d torus-mesh должен иметь четыре сетевых порта, а для 2d mesh 2×6 достаточно трех сетевых портов, что позволяет снизить сложность оборудования и потребляемую мощность. Поэтому выбор топологии для процессора с 12 ядрами в большей степени зависит от ограничений на мощность и требуемую производительность сети-на-кристалле.



Сетевые адаптеры и подключение устройств

Набор сетевых адаптеров определяется числом различных типов подключаемых устройств. В процессорах шестого поколения с архитектурой «Эльбрус» существует 4 типа абонентов сети: процессорные ядра, банки кэш-памяти третьего уровня, устройства доступа в оперативную память и устройства доступа к вводу-выводу и межпроцессорным линкам. Банки кэш-памяти третьего уровня и устройства доступа в оперативную память работают на одной и той же частоте с сетью-на-кристалле. Процессорные ядра и устройство доступа к вводу-выводу и межпроцессорным линкам работают на независимых частотах и асинхронны с сетью-на-кристалле. Для подключения асинхронных устройств необходимо использовать синхронизатор между частотой сети-на-кристалле и частотой устройства [9]. Сетевой адаптер для таких устройств находится между сетью-на-кристалле и синхронизатором и работает на частоте сети-на-кристалле.

В общем случае сетевой адаптер должен передавать все типы пакетов как в подключаемое устройство, так и из подключаемого устройства. Но из-за особенностей протокола некоторые передачи пакетов невозможны, например в процессорное ядро не может быть передан первичный запрос. Поэтому абоненты сети имеют только нужный им набор интерфейсов, а сетевой адаптер согласует этот набор с интерфейсами сети. При прохождении пакета от устройства через сетевой адаптер к нему добавляется сетевой адрес назначения, зависящий от типа передаваемого пакета. Для первичных запросов сетевой адрес формируется на основании типа операции и адреса запроса. Когерентные снуп-запросы содержат в себе бит-вектор устройств назначения, который формируется самим источником пакета. Пакеты ответов с данными могут передаваться двум устройствам одновременно, количество получателей и их сетевые адреса определяются по расширению кода операции и двум уникальным идентификаторам, которые передаются внутри пакета. Короткие пакеты всегда передаются только одному устройству, адрес

которого определяется по уникальному идентификатору пакета.

Сетевые адаптеры процессорных ядер и банков кэш-памяти третьего уровня содержатся во всех коммутаторах. Сетевые адаптеры устройств доступа в память и устройства доступа к вводу-выводу и межпроцессорным линкам размещены в самих устройствах. В 16-ядерном процессоре для подключения устройств доступа в память были задействованы свободные порты коммутаторов 0–3 и 12–15 для обеспечения максимального темпа доступа, как изображено на рисунке 3. Подключение устройства доступа к вводу-выводу было выполнено посредством добавления дополнительных коммутаторов (КОМ) в разрез сети между координатами 1 и 2 по оси Z.

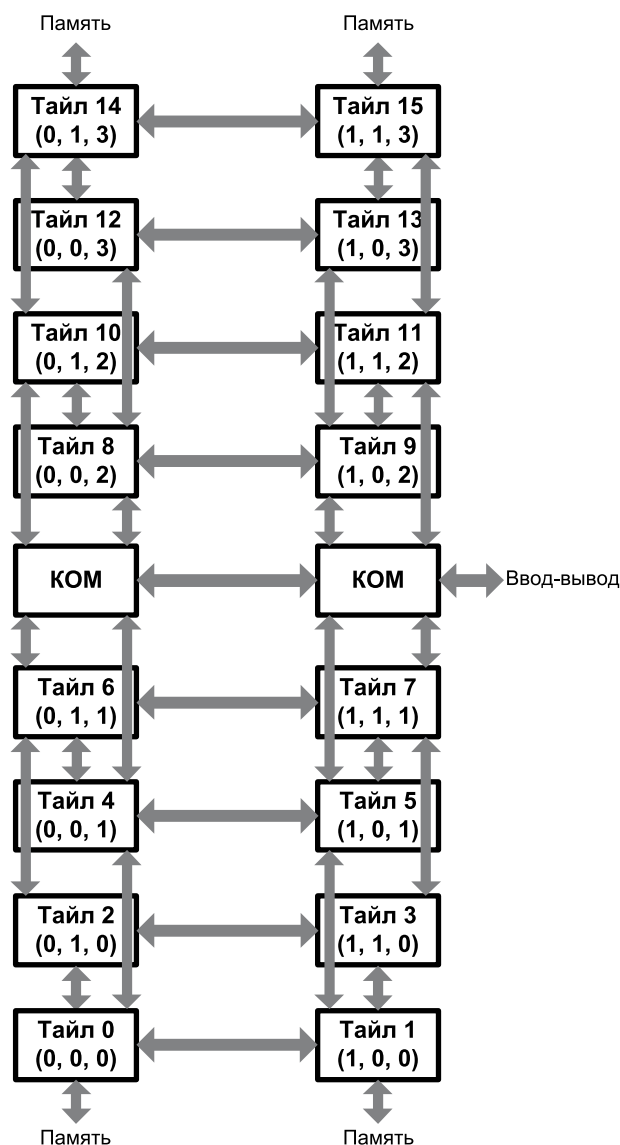


Рис. 3. Схема топологии сети-на-кристалле для микропроцессора с 16 процессорными ядрами



Заключение

В результате этой работы был предложен принцип построения сетей-на-кристалле для процессоров шестого поколения с архитектурой «Эльбрус» с учетом физических ограничений при проектировании. Разработаны сетевые адаптеры для всех используемых устройств процессора. Собраны сети-на-кристалле с топологиями 2d mesh и 2d torus-mesh для 8-, 12-, 16-ядерных процессоров и проведен их сравнительный анализ. Полученные результаты показали, что для 16-ядерного процессора оптимальным решением является использование топологии 2d torus-mesh.

Список литературы

1. Suggs D., Subramony M., Bouvier D. The AMD “Zen 2” Processor // IEEE Micro. 2020. V. 40. № 2. P. 45–52.
2. Tam S. M., et al. Skylake-SP: A 14nm 28-core xeon® processor // 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). IEEE. 2018. P. 34–36.
3. Kostenko V. O. et al. Elbrus-8C: The Latest Yield from MCST and MIPT Collaboration // 2015 International Conference on Engineering

and Telecommunication (EnT). IEEE, 2015. P. 67–68.

4. Кожин А. С., Сахин Ю. Х. Коммутация соединений процессорных ядер с общим кэшем третьего уровня микропроцессора “Эльбрус-4С+” // Вопросы радиоэлектроники. 2013. № 3. С. 5–14.
5. Альфонсо Д. М., Деменко Р. В., Кожин А. С. и др. Микроархитектура восьмиядерного универсального микропроцессора «Эльбрус-8С» // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 3. С. 6–13.
6. Jerger N. E., Peh L.-S. On-chip networks // Synthesis Lectures on Computer Architecture. 2009. V. 4. No. 1. 141 p.
7. Кожин А. С., Нейман-заде М. И., Тихорский В. В. Влияние подсистемы памяти восьмиядерного микропроцессора «Эльбрус-8С» на его производительность // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 3 Сер. ЭВТ. С. 13–21.
8. Кожин А. С., Кожин Е. С., Шпагилев Д. И. Исследование топологий сетей на кристалле многоядерных процессоров с архитектурой «Эльбрус» // Электроника: НТБ. 2020. № 7.
9. Кожин А. С. Проблемы передачи данных между асинхронными доменами вычислительного устройства // Вопросы радиоэлектроники. 2011. № 3. Сер. ЭВТ. С. 130–141.

Об авторах

Кожин Евгений Сергеевич – ведущий инженер Акционерного общества «МЦСТ», Москва, Российская Федерация. Область научных интересов: микропроцессоры и вычислительные комплексы.

Кожин Алексей Сергеевич – начальник сектора Акционерного общества «МЦСТ», Москва, Российская Федерация. Область научных интересов: микропроцессоры и вычислительные комплексы.



Network-on-a-chip of a new microprocessor generation with the Elbrus architecture

Kozhin E. S., Kozhin A. S.

MCST JSC, Moscow, Russian Federation

The paper describes a network-on-chip of a new microprocessor generation with the Elbrus architecture, taking into account the peculiarities of physical design. The network-on-a-chip under consideration plays a central role in the scaling process of the microprocessor, interconnecting all the main components of the system and ensuring the transfer of all types of packets between devices. The characteristics of the network-on-a-chip determine the bandwidth and access time to the memory subsystem.

Keywords: processor, crystal, topology, network adapter

Information about the authors

Kozhin Evgeny Sergeevich – Lead Engineer, MCST JSC, Moscow, Russian Federation.

Research interests: microprocessors and computing systems.

Kozhin Alexey Sergeevich – Sectoral Head, MCST JSC, Moscow, Russian Federation.

Research interests: microprocessors and computing systems.



Правила для авторов

1. Журнал публикует научно-технические рукописи, не предназначенные для публикации в других изданиях. Тематика рукописей должна соответствовать направленности работ Концерна.

2. Рукопись должна быть направлена с сопроводительным письмом на бланке организации за подписью ее руководителя или заместителя руководителя. К рукописи должен быть приложен акт экспертизы о возможности опубликования в открытой печати. Рукопись должна состоять из основного текста, подписанного всеми авторами, и рисунков, напечатанных на отдельных листах или расположенных в тексте статьи. К рукописи должны быть приложены сведения об авторах (на отдельном листе).

3. Представляется один экземпляр рукописи на бумаге формата А4 (по ГОСТ 9327-60), плотностью более 80 г/кв.м (по ГОСТ 27015-86), с белизной более 75 % (по ГОСТ 30113-94), а также ее электронная версия. Поля страницы: сверху, снизу и справа по 2 см, слева – 2,5 см. Абзац – 1,2 см от левого края текста. Выравнивание текста – по ширине страницы. Электронная версия готовится в редакторе Word (версия не ниже Word 2000), шрифт Times New Roman без стиливого оформления при использовании редактора формул Equation версии 3.0 или выше. При написании текста размер шрифта № 14 с полуторным интервалом, а при наборе таблиц и рисунков их названия и внутренние надписи печатаются с размером шрифта № 10.

4. Порядок расположения материалов в основном тексте (по ГОСТ Р 7.0.7-2009): индекс универсальной десятичной классификации (УДК), название рукописи с числом слов не более 10, инициалы и фамилия(и) автора(ов), аннотация рукописи с числом строк не более 10, текст рукописи, список литературы. Объем рукописи от 5 до 15 страниц основного текста, без учета рисунков. Нумерация страниц – сквозная (располагается снизу, выравнивание по центру).

5. Аннотация оформляется одним абзацем с объемом символов не более 500 (по ГОСТ Р 7.0.7-2009) и должна отражать постановку задачи, новизну описываемой работы, не дублировать название, введение и выводы к рукописи, а в определенной мере дополнять их. В аннотацию не следует вставлять аббревиатуры, формулы и ссылки на литературу. Аннотация печатается с отступом в два абзаца (2,4 см) от левого поля основного текста.

6. При подготовке рукописи необходимо обращать внимание на написание букв и слов – русские (а, б, в, Ю) и греческие буквы (α , β , ξ , Ξ , Σ , $\epsilon\rho\eta\kappa\iota$) набираются прямо, а латинские (a , w , j , W , Q , $left$, $interrupt$) – курсивом (кроме химических формул CuSO_4 , $\text{Ra}(\text{OH})_2$ и т. д.). Те же требования необходимо соблюдать при написании букв, индексов и степеней в формулах. Обозначения матриц и векторов с использованием букв любых алфавитов набираются жирным шрифтом прямо (Ω , $\mathfrak{Z}$, $\mathbf{W}$, $\mathbf{Q}$, $\mathbf{q}$). Для чисел, функций и операторов (1, 252, $\cos(x)$, $\sin(y)$, $\text{rot } \mathbf{F}$, $\exp(x)$ и т. д.) используется только прямой шрифт. Римские цифры не допускаются. Дробная часть десятичного числа отделяется запятой.

7. Вывод математических зависимостей должен быть кратким, без промежуточных преобразований. Все обозначения величин в формулах следует расшифровать (кроме общепринятых типа j , π). Формулы, на которые в тексте есть ссылки, нумеруются в круглых скобках. Нумерованная формула должна быть написана отдельной строкой, выравнивание ее номера осуществляется по правому краю. Для нумерованной формулы допускается расположение ее в тексте рукописи. Формулы, включенные в текст, следует набирать без увеличения интервала между строками, например b/d , $\exp(x/2)$. Прописные и строчные буквы, надстрочные и подстрочные индексы в формулах должны обозначаться четко. Индекс у индекса не допускается.

8. Название таблицы, при ее наличии, должно быть точным и кратким. Содержание таблиц должно быть лаконичным и иметь только необходимые для иллюстрации текста данные, таблица не должна дублировать рисунки. Оформление таблиц должно соответствовать ГОСТ 1.5-2001. Таблицы печатаются в общем тексте после первой ссылки и нумеруются, если их количество больше одного.

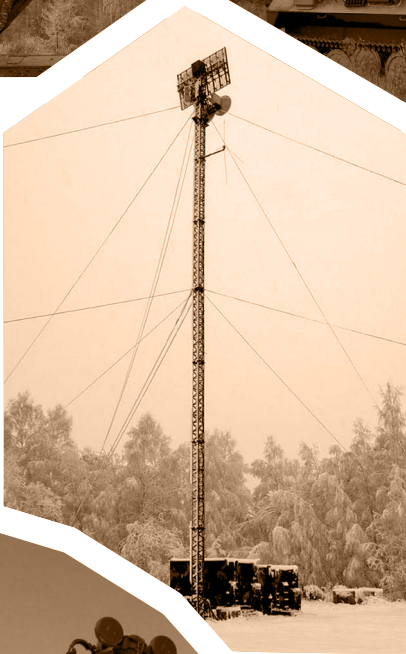
9. Наименования, обозначения и единицы физических величин приводятся только в системе СИ (ГОСТ 8.417-2002). Обозначение единицы физической величины указывается после последнего числового значения диапазона, например от 1 до 5 мм, от +10 до –40 °С.

10. Литературные ссылки нумеруются в прямых скобках, например [1]. Список литературы составляется в соответствии с порядком ссылок по тексту. Оформление литературных ссылок в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. В соответствии с указанным ГОСТ для каждой литературной ссылки следует указывать автора(ов), если такие имеются, полное название работы, издательство, год издания, общее количество страниц в издании или номера страниц при ссылках на журналы или главы в книгах.

11. Рисунки и фотографии должны быть четкими, контрастными, желательно в альбомной ориентации, и могут располагаться на отдельных листах (допускается расположение в тексте статьи). Рисунки предоставляются в векторных форматах *.ai, *.eps, *.pdf или растровых *.tiff, *.jpg, *.bmp с разрешением выше 300 dpi без интерполяции. Числовые обозначения на рисунке ставятся по часовой стрелке. Подписные подписи должны включать сокращение слова «Рис.», номер и название, например «Рис. 3. Спектр сигнала» (сокращение и номер не ставятся, если рисунок в рукописи один). При наличии на рисунке обозначений после подписной подписи ставится двоеточие и с новой строки приводится их расшифровка. Подписную подпись разрешается размещать в тексте статьи.

12. Сведения об авторах включают (по ГОСТ Р 7.0.7-2009) фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, место работы и должность, область научных интересов каждого автора, а также контактные телефон и электронный адрес.

13. Редакционная коллегия оставляет за собой право возвращения рукописи на доработку при невыполнении указанных выше требований по ее оформлению.





e-library



online версия