

# ВЕСТНИК

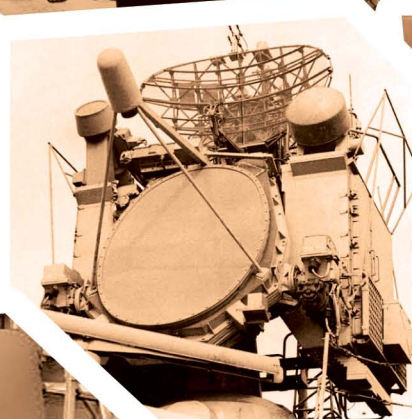
Концерн ВКО «Алмаз – Антей»

№ 4



2021









АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей»

Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»

№ 4

Декабрь 2021 г.

Научно-технический журнал

Издаётся 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

Агапов О. А., канд. техн. наук

Агеев П. А., канд. техн. наук

Акопян И. Г., д-р техн. наук, канд. физ.-мат. наук, проф.

Бабаев Ю. В., канд. техн. наук

Балиж К. С., канд. техн. наук

Балов А. В., д-р техн. наук, проф.

Белякова Е. Г., д-р техн. наук

Благовский 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)

Веденеев 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

Гоздарёв Р. С., канд. техн. наук

Голиков В. Ф., д-р техн. наук, проф. (Республика Беларусь)

Голынский 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

Друзин 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

Караваев Я. С., канд. техн. наук

Кауфман Г. В., д-р техн. наук

Койтов С. А., д-р техн. наук

Колчин С. А., 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

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

Мурзова М. А., канд. техн. наук

Наумов С. В., канд. техн. наук

Нагорных И. Л., канд. физ.-мат. наук

Окулов Р. А., канд. техн. наук

Панфилов С. В., канд. физ.-мат. наук

Парамонова А. А., канд. техн. 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

Пономарев О. П., д-р техн. наук, доц.

Ратынский М. В., д-р техн. наук

Сайбель А. Г., д-р техн. наук, доц.

Самохина Е. А., канд. техн. наук

Сафин Н. Р., канд. техн. наук

Свирина А. Г., канд. техн. наук, доц.

Сигов А. С., д-р физ.-мат. наук, проф., акад. РАН

Смирнов А. С., д-р техн. наук

Смирнов В. Л., канд. техн. наук

Смирнов Е. П., канд. техн. наук

Созинов 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.

Филиппов М. Ю., канд. физ.-мат. наук

Фридман Л. Б., д-р техн. наук

Цапцов А. В., канд. техн. наук

Царёв И. Е., канд. техн. наук

Чаплыгин Ю. А., д-р техн. наук, проф., акад. РАН

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 генерального конструктора  
системы воздушно-космической обороны  
Российской Федерации П. А. Созинова

3

## Организация и управление



Почему уходят лидеры?

Джепа Д. С., Ерошин С. Е., Караваев Я. С., Козлов Г. В. 4

Методология выбора корпоративных информационных  
систем в условиях цифровой трансформации организации  
оборонно-промышленного комплекса  
Щеглов Д. К.

7

## Электроника. Радиотехника



Особенности работы активной ГСН при воздействии  
отражений от земной поверхности

Горбачев М. А., Свистов В. В., Ульянова Е. А.

25

Радиолокационные датчики высоты

трехмиллиметрового диапазона длин волн

Аникушин М. А., Власов В. В., Трифонов А. В.

36

## Космические исследования и ракетостроение



Уточнение аэродинамического момента ракеты  
по результатам летных испытаний

Акимов В. Н., Костюков А. А., Кравчук Е. Н.,  
Розанцев К. О.

47

## Машиностроение



Методы оптимизации в проектировании машин  
Музафаров Э. Р.

57



## Информатика



Виртуализация ОС «Эльбрус»

Рыбаков С. А.

67

## Математика



Моделирование отражательных характеристик  
осесимметричных радиолокационных объектов методом  
интегральных уравнений

Рунов А. А.

76

## История



120 лет ПАО «НПП «Импульс»

Мальцев А. И.

94

## Информация



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

112

Решением Министерства образования и науки Российской Федерации научно-технический журнал «Вестник Концерн 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/10.38013/2542-0542-2021-4>

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 79162

## Учредитель

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

## Издатель

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

Подписано в печать 27.12.2021  
Формат 60×90/8. Печ. л. 14,0  
Тираж 400 экз. Заказ № 4-elp-s47-21  
Свободная цена

## Типография

ООО «Медиаколор»  
127273, Москва, Сигнальный проезд, д. 19, БЦ «Вэлдан»

© АО «Концерн 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/10.38013/2542-0542-2021-4>

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 27.12.2021  
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!**

Научно-технический журнал «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – образец качественного издания, отражающего доступные для открытой печати достижения российского оборонно-промышленного комплекса. Уверен, что и дальше журнал будет полезен для исследователей инженерной отрасли наук.

В новом году желаю редакции, читателям и авторам успехов в научном творчестве и реализации смелых замыслов.

Приглашаю исследователей, работающих по тематике журнала, к активному сотрудничеству.

**Генеральный конструктор системы  
воздушно-космической обороны  
Российской Федерации**

**П. А. Созинов**



Подписка  
на рассылку





## Почему уходят лидеры?

Д. С. Джепа, С. Е. Ерошин, Я. С. Караваев, Г. В. Козлов

*Анализируются причины, связанные с утечкой лидерских кадров с производственных предприятий. Предложены способы сокращения таких кадровых потерь.*

На протяжении последних четырех лет в АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей» ведется программа по выявлению лидеров трудовых коллективов, задачей которой является формирование и подготовка кадрового резерва на руководящие должности всех уровней дочерних предприятий [1]. В первой волне, стартовавшей в конце 2016 г., было выявлено 109 человек с лидерскими качествами и проведено их двухгодичное обучение по программе «Управление предприятием ОПК».

При обсуждении программы на отраслевой конференции по радиоэлектронике высказывалось опасение, что все люди, получившие официальное признание и свидетельства о повышении квалификации, моментально разбегутся. Есть мнение, что поиск и продвижение лидеров и вовсе нецелесообразны [2, 3].

Однако наш опыт показал, что это не так. За три года более половины респондентов получили повышение по службе, некоторые значительное: главный конструктор, главный

технолог, главный металлург завода, руководитель СКБ. Вместе с тем и потери были неизбежны: за три года из концерна уволились 27 человек из числа победителей программы (25 %).

С целью анализа причин увольнения был проведен опрос ушедших, результаты которого и подлежат обсуждению.

Сбор данных проводился без использования специальных анкет и был осуществлен силами Совета капитанов – неформальной структуры, сформировавшейся в рамках программы после отборочных этапов. Такой подход гарантировал более откровенный уровень обсуждения причин увольнения, но меньшую системность. Стилль ответов и их объем оказались весьма различными: одни ограничились короткими формулировками, осветив лишь главный мотив увольнения, тогда как другие подробно описали все сопутствующие обстоятельства и новое место работы. В любом случае ответы дали серьезный материал для осмысления.

В таблице причины увольнения подразделены на группы с указанием массовости.

Как видно из таблицы, основными причинами увольнения являются отсутствие зримых перспектив карьерного роста, проблемы взаимоотношений с непосредственным начальником и низкая зарплата.

Вот несколько цитат из ответов респондентов.

*Я изначально говорил руководству на определенном уровне, что не буду работать с моим текущим начальником. Такой уровень непрофессионализма я просто не готов принять, плюс это создает проблемы как мне, так и всему институту.*

*Я не столько за деньги, сколько за властью. Роста не было, а хотелось. Переманили с повышением, как-то так.*

*Если требуется сохранить кадровый резерв, людей надо заинтересовывать, а не намекать, что Россия большая и работать есть кому.*

Причины увольнения, выявленные по итогам опроса лидеров, покинувших концерн

| Причина увольнения                     | Число (чел.) |
|----------------------------------------|--------------|
| Отсутствие перспектив карьерного роста | 4            |
| Давление администрации                 | 1            |
| Низкая зарплата                        | 3            |
| Некомпетентность руководства           | 2            |
| Проблемы взаимодействия с начальством  | 4            |
| Неудовлетворенность работой            | 2            |
| Понижение в должности                  | 1            |
| Высокая секретность                    | 1            |
| Новая более интересная работа          | 3            |
| Предложена большая заработная плата    | 3            |
| Семейные обстоятельства                | 1            |
| Новая работа ближе к дому              | 1            |
| Новая работа в промышленности          | 2            |
| В IT-компаниях                         | 1            |
| Работа за границей                     | 1            |
| В офисных структурах                   | 3            |
| Организация своего бизнеса             | 2            |



В сотысячном коллективе концерна существует многообразие особенностей в производственных отношениях «начальник – подчиненный». В подавляющем большинстве случаев они эффективны и уважительны, но, как видим, встречаются и иные. В данном случае усложняющим фактором взаимоотношений победителей программы с непосредственным руководителем является то, что первые получили официальное признание без ведома и участия вторых. С учетом этого обстоятельства, играющего весьма существенную психологическую роль во взаимоотношениях, во второй волне программы, стартовавшей в этом году, для участия требовалась рекомендация с предприятия [4]. Через пару лет можно будет судить, насколько это улучшило обсуждаемую ситуацию и как повлияло на утечку лидеров.

Не является неожиданным и то, что привлекательность нового рабочего места связана с большей зарплатой и более интересной работой. Показательно при этом, что в промышленность устремились всего несколько ушедших сотрудников, больше – в офисные структуры и свой бизнес. К сожалению, это общая тенденция, страна постепенно теряет производственные силы.

За границу на учебу отбыл лишь один человек. Его мнение весьма показательно.

*Я поступил в Boston University, в магистратуру по компьютерным наукам в сентябре 2019 года и в 2020 году закончил. С тех пор живу в США и работаю в компании, которая анализирует новости, социальные сети, тренды, и иногда вспоминаю, как круто было в Концерне заниматься оборонкой, а не «вот этими всеми фейсбуками». Концерн дал мне очень много, и я не жалею ни одного дня из этих 9 лет.*

Учеба за границей чаще всего и оборачивается потерей специалиста. Что тут поделаешь? Уровень жизни является важным фактором при выборе страны пребывания.

Характерно, что почти все уволившиеся откликнулись на просьбу рассказать о себе, четверо к тому же высказали благодарность программе выявления лидеров. Двоим квалификация, полученная в рамках программы,

помогла при организации своего бизнеса. Вот что пишет бывший специалист по закупкам.

*Рискнул, открыл рыбный магазин в феврале, теперь у меня три рыбных и один мясной магазин, 2 собственных торговых бренда, 11 сотрудников. В ноябре открываем еще 2 мясных магазина и оптовое направление. Я являюсь официальным представителем нескольких фермерских хозяйств, в планах на 22 год открытие собственного предприятия по переработке рыбы.*

Тоже неплохой результат.

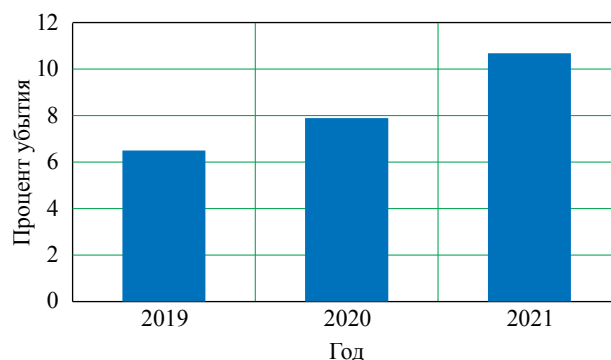
Одна сотрудница уволилась в связи с многодетностью. Собирается вернуться, когда дети подрастут.

Потери, понесенные в лидерском движении концерна, по своей масштабности сравнимы со средним уровнем текучести кадров – 8,5 % (см. рисунок), они были предсказуемы и являются неизбежным следствием обсуждавшихся выше проблем, носящих как объективный, так и субъективный характер.

Следует отметить, что никто из ушедших лидеров не остался не у дел. Все успешно нашли новое, хорошо оплачиваемое место работы. Один вернулся в концерн и успешно трудится, один жалеет, что уволился, но обратно его не взяли.

Потерять за три года две дюжины одаренных специалистов, конечно, обидно. Показательно то, что утечка усилилась именно в последний год, когда ситуация на предприятиях обострилась в связи с коронавирусом и сокращением объема государственного оборонного заказа в стране.

Несмотря на объективный характер этих проблем, кадровым службам предприятия необходимо более внимательно относиться



Динамика убытия победителей программы





к победителям программы. В 90 % случаев Концерн потерял весьма способных и хорошо подготовленных специалистов. Только в 10 % случаев потери не вызывают большого сожаления, поскольку ценность респондентов, вошедших в этот процент, как руководителей производственного коллектива оказалась невелика. Примерно такой процент и составляет в целом погрешность программы в выявлении лидеров трудовых коллективов, что вполне можно признать удовлетворительным итогом.

Проблема привлечения талантливых специалистов в оборонную промышленность в прежние годы решалась системно, а именно: были созданы вузы с нужной специализацией кафедр, студентам, обучающимся на них, платили повышенные стипендии, позволяющие не отвлекаться от учебы для подработки, на оборонных предприятиях заработная плата была выше средней по промышленности, поощрялась научная и изобретательская деятельность, создавались хорошие социальные условия, включая детские сады, пионерлагеря, базы отдыха, спортивные комплексы. Все это и обеспечивало высокое качество кадрового потенциала – залог успеха в создании высококачественной техники.

Сейчас ситуация с кадровым обеспечением предприятий ОПК значительно более сложная. Многие прежние механизмы утеряны или ослаблены в своей эффективности.

Восстановить их непросто, но целесообразно. Дело дополнительно осложняется тем, что в мегаполисах для молодежи есть иные области приложения сил с более льготными условиями работы и более высокой оплатой труда.

В таких условиях кадровая политика предприятий должна быть особенно бережной по отношению к сотрудникам с высоким уровнем развития, компетентностью и лидерскими задатками. Лозунг «Россия велика, и есть кому работать!» может быстро войти в противоречие с решением задач по созданию военной техники современного уровня.

### Литература

1. Башкатова Ю. А., Большаков Д. Ю., Ерошин С. Е. и др. Лидерское движение в Концерне ВКО «Алмаз – Антей». М.: Новое Время, 2019, 316 с.
2. Яхонтова Е. С. Стратегическое лидерство: модное явление или насущная необходимость? // Менеджмент сегодня. 2008. № 6. С. 338–343.
3. Агзамова Л. А. Лидерство в новую эпоху: суперлидерство // Экономика и социум. 2016. № 12-1 (31). С. 76–79.
4. Новиков Я. В., Козлов Г. В., Джепа Д. С., Ерошин С. Е. Два подхода к поиску лидеров трудовых коллективов // Инновации. 2021. № 3. С. 3–7.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-7-24>

УДК 658.51:004.5

## Методология выбора корпоративных информационных систем в условиях цифровой трансформации организации оборонно-промышленного комплекса

Д. К. Щеглов

*Акционерное общество «Конструкторское бюро специального машиностроения»  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Предлагается методология экспертного анализа рынка альтернативных корпоративных информационных систем (КИС), позволяющая выбрать платформу для создания КИС, максимально полно учитывающую требования конкретной организации оборонно-промышленного комплекса (ОПК). Методология базируется на совокупности адаптированных методов теории поддержки принятия решений, применяемых в задачах многокритериального коллективного выбора альтернатив.

**Ключевые слова:** корпоративная информационная система, требования, теория принятия решений, многокритериальный выбор альтернатив, метод, экспертная система

**Для цитирования:** Щеглов Д. К. Методология выбора корпоративных информационных систем в условиях цифровой трансформации организации оборонно-промышленного комплекса // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 4. С. 7–24. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-7-24>

**For citation:** Shcheglov D. K. Methodology for selecting corporate information systems in the conditions of digital transformation of a defence company // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 4. P. 7–24. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-7-24>

Поступила 20.06.2021 Отрецензирована 30.06.2021 Одобрена 08.11.2021 Опубликовано 27.12.2021

### Введение

В современных экономических и геополитических условиях внедрение цифровых технологий и инструментов цифровой трансформации становится обязательным условием устойчивого развития российских организаций ОПК.

Неуклонно уменьшаются объемы государственного финансирования исследований и разработок, прежде всего в рамках оборонного заказа. Одновременно с этим растут запросы со стороны потребителей и требования к качеству продукции, меняются стандарты взаимодействия с покупателем, который сегодня хочет иметь уникальный продукт, раз-

работанный конкретно под его нужды и интересы. Рынок диктует жесткие ограничения по срокам разработки и производства новых образцов техники. Сегодня организации (предприятия, компании), представившие свою продукцию позже конкурентов, почти не имеют шансов на ее успешную реализацию. Более того, передовые организации (предприятия, компании) пытаются предугадывать будущие запросы потребителей и даже самостоятельно формировать рынки сбыта своей перспективной продукции и услуг. Все это требует системного внедрения в организациях высокотехнологичной промышленности, в том числе ОПК, передовых цифровых технологий для перехода к новой конкурентоспособной бизнес-модели, получившей название «цифровая трансформация» [1].





Цифровая трансформация организации (предприятия, компании) – процесс, направленный на смену технологических укладов – создание и использование кибернетических производственных систем, построенных на технологиях Индустрии 4.0 (в том числе цифровые двойники, большие данные и искусственный интеллект, промышленный интернет вещей и т.д.) [1, 2]. Внедрение такого рода технологий в ОПК, как правило, требует решения множества организационно-управленческих вопросов, связанных с преодолением консервативности восприятия нововведений.

Цифровая трансформация подразумевает постепенный переход от традиционных способов разработки и производства изделий на основе чертежей к более современным технологиям работы с информационными ресурсами, включая информационные ресурсы нового типа – цифровые прототипы изделий, цифровые двойники изделий и объектов производства. При этом создание и поддержание таких информационных ресурсов в актуальном состоянии осуществляется различными информационными системами.

В современной научной литературе предлагается множество определений понятий «информационный ресурс» и «информационная система». Их семантический анализ проведен автором в работе [3]. В рамках настоящей работы в качестве постулата примем, что информационная система организации (предприятия, компании) – это совокупность информационных ресурсов (вне зависимости от формы их представления), программных и аппаратных средств, каналов связи, регламентов взаимодействия, предназначенных для удовлетворения информационных потребностей работника при выполнении им трудовой производственной функции. Под корпоративной информационной системой (КИС) будем понимать информационную систему уровня организации (предприятия, компании) или интегрированной структуры, в которую она входит, обеспечивающей информационную поддержку, как правило, одной из сфер операционной деятельности организации (проектно-конструкторскую, производственно-технологическую,

эксплуатационно-техническую, финансово-экономическую, информационно-аналитическую и др. [1, 2]). Все применяемые в организации КИС по сути являются функционально-логическими компонентами ее информационного пространства. При таком подходе в рамках организации (предприятия, компании) можно выделить несколько классов КИС, например ERP (*Enterprise Resource Planning* – планирование ресурсов предприятия), PDM (*Product Data Management* – управления данными об изделии), CRM (*Customer Relationship Management* – управление отношениями с клиентами) и другие.

Решение вопросов цифровой трансформации организации ОПК тесно связано с концепцией его инновационного развития и маркетинговой стратегией, программами и проектами повышения операционной эффективности и внедрения принципов бережливого производства, планами по импортозамещению материалов, покупных комплектующих изделий, применяемых аппаратно-программных средств, стратегией кадрового обеспечения и повышения квалификации персонала и т.д. [1, 2]. Все это предъявляет особые требования к выбору и внедрению КИС в организациях ОПК.

Важно отметить, что проекты внедрения КИС в некоторых российских организациях ОПК порой не приносят ожидаемого целевого результата [4]. В большинстве случаев это связано с отсутствием в организации ОПК:

- внятной стратегии цифровой трансформации и единой концепции автоматизации операционной деятельности, что приводит к оснащению различных структурных подразделений организации ОПК разнородными программными средствами. Интеграция этих программных средств обычно обеспечена не в полном объеме, что приводит, в свою очередь, к снижению результативности сбора, обработки и анализа информации. Кроме того, различия в форматах представления данных могут привести к сбоям и ошибкам в работе, искажению и потере критически важной информации;

- системного подхода к выбору программных и аппаратных средств КИС, что приводит к несоответствию функциональных



возможностей введенных в эксплуатацию средств автоматизации реальным потребностям организации ОПК [3, 5]. В частности, при выборе программных средств КИС далеко не всегда учитывают особенности их интеграции в существующую информационную среду организации (предприятия, компании), цели автоматизации, специфику операционной деятельности организации и перспективы развития.

В организациях ОПК можно встретить два принципиально противоположных подхода к выбору, внедрению и использованию программных средств КИС [4]:

- попытка быстрого необоснованного внедрения КИС «тяжелого» класса, функциональные возможности которых значительно выходят за рамки решаемых организацией ОПК задач. Вместе с тем на внедрение КИС затрачиваются большие финансовые и интеллектуальные ресурсы, а организация (предприятие, компания) впоследствии использует только малую часть возможностей внедренной КИС (по оценкам автора, не более 15 % базовых функциональных возможностей);

- задержка внедрения КИС необходимого класса или внедрение недорогой, но недостаточно функциональной КИС с точки зрения производственных задач конкретной организации (предприятия, компании). Это связано, как правило, с опасением руководства организации инвестировать средства в технологии, эффективность которых заранее трудно оценить неспециалисту. В то же время организация (предприятия, компании) уже обладает достаточно высоким уровнем автоматизации производственных процессов, квалифицированными работниками и нуждается во внедрении прорывных информационно-коммуникационных технологий.

Таким образом, успешность реализации проектов цифровой трансформации организаций ОПК в значительной степени зависит от выбора КИС и рациональной стратегии ее внедрения. Это делает актуальной разработку методологии выбора платформы для создания КИС с учетом особенностей конкретных организаций ОПК.

## 1. Место этапа выбора КИС в общем процессе ее внедрения

Место этапа выбора КИС в процессе ее внедрения показано посредством графической нотации IDEF (*Integrated Definitions* – комплексное описание), разработанной в начале 80-х годов прошлого века департаментом Военно-воздушных сил США в рамках программы ICAM (*Integrated Computer Aided Manufacturing* – интегрированная компьютеризация производства) [6]. Впоследствии модели нотации IDEF стали важным инструментом CALS-технологий (*Continuous Acquisition and Life cycle Support* – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла изделий), а ее последняя редакция была издана Национальным институтом США по стандартам и технологиям в декабре 1993 г. В России применение моделей нотации IDEF регламентируется действующими рекомендациями по стандартизации Р 50.1.028-2001 [7].

На рисунке 1 представлено формализованное описание эталонного процесса внедрения КИС в организации ОПК в виде контекстной функциональной модели IDEF0 (диаграммы уровня A1) с «точки зрения» руководителя высшего звена, отвечающего за внедрение информационных технологий в организации ОПК.

На рисунке 1 представлены типовые этапы (в рамках процессного подхода) внедрения КИС в организации ОПК, прямые и обратные взаимосвязи между ними, ресурсы, задействованные на каждом этапе, управляющие воздействия, влияющие на процессы внедрения КИС. Показаны входные данные, управляющие воздействия, потребные ресурсы и результаты выполнения процессов. Например, входными данными для процесса выбора КИС являются цель и задачи внедрения, перечень требований к системе, варианты альтернативных КИС; управляющим воздействием – стратегия автоматизации организации (предприятия, компании); ресурсами – экспертная группа, а результатом – обоснованный вариант КИС. Рассмотрим этапы внедрения КИС более подробно.

**Анализ деятельности организации ОПК [Р1].** Под анализом деятельности организации ОПК понимается сбор, систематизация

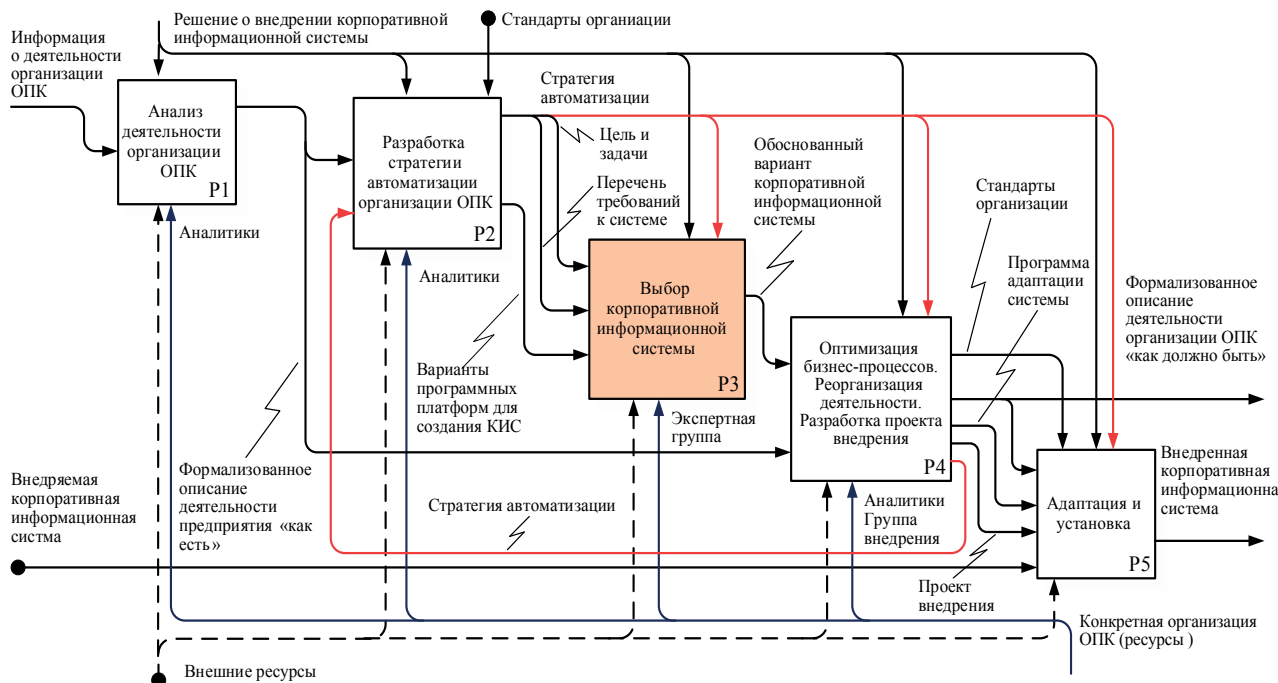


Рис. 1. Формализованное описание эталонного процесса внедрения КИС в организации ОПК

и представление информации о ее деятельности «как есть» в формализованном виде, необходимым для выбора платформ для создания КИС [4]. Всемирно признанным стандартом в области проведения анализа деятельности различных организаций (предприятий, компаний) является руководство BABOK (*Business Analysis Body of Knowledge*), которое регламентирует основные термины и состав работ в области бизнес-анализа, содержит рекомендации по лучшим практикам, а также выбору методов и средств исследования [8]. Также важно отметить, что для разработки формализованного описания производственных процессов (бизнес-процессов) в организациях ОПК традиционно используются нотации IDEFx, UML, BPMN, FlowChart, eEPC и соответствующие им CASE-средства BPWin, ELMA BPM, BizAgі BPMS, Business Studio, ARIS Tolset и другие.

**Разработка стратегии автоматизации организации ОПК [P2].** Понятие «стратегия автоматизации» подразумевает постановку задач, определение объектов, способов и этапов автоматизации на основе действующих в организации нормативно-технических документов, объективных ограничений (временных, финансовых и прочих) и принятой системы планирования работ.

Общая стратегия автоматизации организации (предприятия, компании), как правило, включает в себя частные стратегии создания и внедрения КИС по направлениям автоматизации. Например, каждая конкретная КИС может внедряться как с первоначальным ее концептуальным проектированием, так и без него.

Внедрение с первоначальным концептуальным проектированием подразумевает возможность проведения отдельных этапов работ (таких как запуск модулей, оптимизация производственных процессов) параллельно, основываясь на принятой концептуальной модели будущей КИС. Концептуальный подход используется, если: в результате проекта планируется внедрить несколько программных модулей; производственные процессы и организационная структура организации ОПК достаточно стабильны и поддаются формализации; в ближайшее время (1–2 года) не планируется реорганизация или реинжиниринг организации; существуют жесткие ограничения (требуется обоснование) на сроки и бюджет всего проекта.

К достоинствам концептуального подхода относится прогнозируемость результатов всего проекта внедрения, высокая гарантия достижения задекларированных результатов, точная





смета и план-график работ, снижение рисков проекта в целом, снижение объема работ по корректировке уже внедренных на предыдущих этапах проекта программных модулей.

Недостатками данного подхода являются увеличение начальных расходов на выполнение проекта и задержка запуска первых функциональных модулей (за счет затрат времени на разработку концепции системы).

Внедрение *без первоначального концептуального проектирования* подразумевает ввод в эксплуатацию функциональных модулей после обследования участка автоматизации, без анализа состава и структуры КИС в целом, учета взаимосвязей между модулями и последовательности их внедрения.

Данный подход применяется, если: имеется нестабильность/неформализованность производственных процессов или организационной структуры предприятия; планируется реорганизация или реинжиниринг организации ОПК; требуется быстрый результат на локальном участке автоматизации; отсутствует возможность/необходимость заранее определить круг функциональных задач КИС; на проект не могут стабильно выделяться ресурсы (персонал, финансовые средства).

Основное достоинство подхода – быстрый локальный результат.

К недостатку данного подхода относится невозможность определения четких сроков, стоимости и функциональных возможностей будущей КИС.

Выбор одного из двух рассмотренных концептуальных подходов предопределяет методологию управления и модель жизненного цикла проекта по созданию будущей КИС.

**Выбор системы [Р3].** Выбор платформы для создания КИС является ключевым этапом процесса ее внедрения. Практика автоматизации организаций (предприятий) промышленности показывает, что рациональный выбор программного продукта способствует значительному сокращению временных и финансовых ресурсов, затрачиваемых на внедрение КИС [4]. При том под рациональным выбором будем понимать применение научно обоснованной методики, позволяющей при заданных финансовых и временных затратах на выбор

определить наилучшую для конкретной организации ОПК платформу для создания конкретного класса КИС и обосновать ее применение. Отличительными особенностями крупных организаций ОПК являются сложная организационная структура, наличие территориально удаленных подразделений, большие информационные потоки. В этих условиях финансовые потери, связанные с нерациональным выбором программных и аппаратных средств КИС, экспоненциально увеличиваются на каждой стадии ее жизненного цикла [4, 5].

Платформа для создания КИС должна выбираться на основе предъявляемых к ней требований, которые определяются исходя из поставленных целей и задач внедрения, особенностей и финансовых возможностей конкретной организации ОПК.

Рациональный выбор платформы для создания КИС – это достижение компромисса между предъявляемыми к ней противоречивыми требованиями. Рассматриваемая проблематика недостаточно полно раскрыта в научной литературе, что определяет актуальность разработки методов выбора и анализа альтернативных КИС, учитывающих особенности инфраструктуры и специфику деятельности конкретной организации ОПК. В этом случае при выборе КИС необходимо учитывать следующие сложности [4, 5]:

- определение системы требований, предъявляемых организацией ОПК к внедряемому на нем конкретному классу КИС;
- подбор достоверной информации (работчиками и поставщиками КИС не всегда указывается точная и достоверная информация о том или ином программном продукте);
- формирование экспертной группы (сегодня вузы не готовят специалистов в области цифровой трансформации и можно рассчитывать только на практиков) [2].

**Реорганизация деятельности организации ОПК и разработка проекта внедрения КИС [Р4].** Реорганизация деятельности (реинжиниринг) проводится, как правило, с целью оптимизации операционных процессов (производственных бизнес-процессов) организации ОПК (например, повышения скорости реализации проектов, снижения затрат)



и выполняется с учетом особенностей выбранной КИС [4, 9].

Из наиболее распространенных подходов к реорганизации деятельности организаций (предприятий, компаний) можно выделить:

- *BSP (Business System Planning)*, предложенный компанией IBM для оптимизации операционных процессов организации (предприятия, компании), исключения дублирования функций баз данных, отдельных информационных объектов и документов. Это достигается посредством проведения анализа матриц пересечения бизнес-процессов функциональных подразделений организации и функций систем обработки данных. Важнейшими шагами BSP являются получение поддержки высшего руководства, описание действующих бизнес-процессов организации и классов данных, интервьюирование, организация и обработка результатов интервью;

- *CPI (Continuous Process Improvement)* и *TQM (Total Quality Management)*, направленные на повышения качества продукции через обеспечение качества бизнес-процессов организации (предприятия, компании). В отличие от BSP, в них заложена идея «эволюционного реинжиниринга», то есть информационной поддержки всего жизненного цикла бизнес-процесса;

- *BPR (Business Process Reengineering)* по Хаммеру и Чампи [10], созданный для фундаментального переосмысления и радикального перепланирования существующих бизнес-процессов организации с целью их дальнейшего совершенствования. BPR отличается тем, что бизнес-процесс в нем не связан с организационной структурой организации (предприятия, компании). Следует отметить, что применение подхода *BPR* на практике в ряде случаев приводило к массовому сокращению численности работников. Возможно, по этой причине термин «реинжиниринг» часто отождествляют с термином «даунсайзинг» [11].

Одновременно с реорганизацией деятельности организации ОПК, как правило, разрабатывается проект внедрения КИС. При этом необходимо учитывать особенности используемой при внедрении методологии

управления жизненным циклом проекта. Чаще всего выделяют предиктивные (каскадные, «водопад»), адаптивные итеративные (спиральные, V-образные) и инкрементальные (Agile, Scrum), а также гибридные жизненные циклы [12]. Для выбора рационального варианта жизненного цикла проекта разработаны различные методы [13]. В любом случае специалисты организации (предприятия) будут вовлечены в процесс подготовки исходных данных для внедрения и само внедрение КИС.

#### *Адаптация и установка системы [P5].*

На этом этапе внедрения КИС традиционно используют следующие основные стратегии:

- *Параллельная стратегия* [s1] – это когда одновременно существует старая (ручная) и новая технология операционной деятельности организации ОПК (например, разработки, производства, сервисного обслуживания изделий и т.д.);

- *«Скачок»* [s2] – подразумевает широкомасштабное внедрение КИС в рамках всех основных процессов операционной деятельности организации ОПК. Данная стратегия может использоваться преимущественно в «молодых» организациях, не имеющих обязательств по сопровождению большого числа изделий, разработанных с применением устаревших технологий, или на предприятиях с простыми (легко формализуемыми) процессами операционной деятельности [14];

- *«Пилотный проект»* [s3] – это тактика «скачка», но в рамках одного подразделения организации ОПК (отдела или сектора). Следует отметить, что это самая распространенная в настоящее время стратегия внедрения КИС в организациях высокотехнологичных отраслей промышленности [15];

- *«Узкое место»* [s4] – подразумевает автоматизацию малой части конкретного процесса операционной деятельности организации (предприятия, компании). План внедрения КИС направлен исключительно на то, чтобы «расшить узкое место».

Выбор стратегии преимущественно определяется постановкой задачи. В частности, он зависит от того, какие процессы организации ОПК должны быть автоматизированы, а уже выбранная стратегия предъявляет



соответствующие требования к функциональным модулям будущей КИС.

Разумеется, каждый класс КИС имеет свои индивидуальные особенности внедрения, а принципиальным вопросом является выбор стратегии  $[s1, s2, s3, s4]$  ее адаптации к особенностям конкретной организации (предприятия, компании). Общий процесс внедрения КИС можно описать следующими правилами:

**if (s1 or s2) do P1 and ((P2 and P3) or P3) and P4 and P5;**

**if s3 do P1 and P3 and P5;**

**if s4 do P1 and P2 and P3 and P4 and P5.**

Эти правила можно представить в виде алгоритма. Пример такого алгоритма для системы управления инженерными данными (PDM-системы – *Product Data Management*) представлен в работе [4]. При этом важно отметить, что спецификой внедрения PDM-системы традиционно является выбор способа ее внедрения: от электронного архива долгосрочного хранения технической документации или от процессов ее разработки, согласования и утверждения.

## 2. Формализованный подход к формированию требований, предъявляемых к КИС

Одной из наиболее сложных задач, возникающих на этапе выбора платформы для создания КИС, является формирование требований, предъявляемых к программному продукту, и обеспечение рационального управления этими требованиями в процессе разработки (кастомизации) и эксплуатации КИС. При этом под требованиями  $\{T_i\}_{i=1}^n$ ,  $i = \overline{1, n}$ , ( $n$  – число элементов множества  $\{T_i\}$ ) будем понимать совокупность утверждений относительно атрибутов, свойств или качеств будущей КИС [16]. Тогда управление требованиями будет представлять собой некий процесс, включающий идентификацию, формирование, документацию, анализ, отслеживание и ранжирование требований, достижение соглашения по требованиям, а при необходимости изменение требований и уведомление об этом соответствующих заинтересованных лиц [17].

Требования, предъявляемые к КИС, должны формироваться исходя из конкретных

целей ее внедрения с учетом общей концепции цифровой трансформации промышленного производства, направленной на создание виртуального рабочего пространства (ВРП) организации ОПК. В общем случае ВРП представляет собой совокупность виртуальных сервисов и цифровых активов, технологий их создания и использования, а также информационно-телекоммуникационных систем и сетей. При этом функционально-логические компоненты ВРП организации (предприятия, компании) должны обеспечивать информационное взаимодействие всех ее работников друг с другом и с внешней средой на основе единых принципов и общих правил [1, 18]. В работе [19] архитектуру ВРП предлагается рассматривать в рамках четырех уровней, а именно: организационного уровня, аппаратного (физического) уровня, уровня операционных систем и системных приложений, уровня так называемых бизнес-приложений. Следует отметить, что при декомпозиции ВРП на подсистемы каждая подсистема всегда будет соответствовать одному из указанных уровней архитектуры.

Как уже отмечалось ранее, выбор и внедрение КИС в процессе цифровой трансформации организации ОПК подразумевает, в том числе, изменение структуры (реинжиниринг [10]) операционных процессов, как минимум, переход от бумажно-ориентированного бизнес-процесса к более эффективному – электронному (или цифровому) [20]. Под бизнес-процессом в данном контексте будем понимать некую совокупность взаимосвязанных действий, реализуемых с целью преобразования исходных операционных ресурсов в конечный продукт либо услугу, имеющие ценность для потребителя [18]. Функциональные требования, предъявляемые к конкретному классу КИС, формируются на основании системного анализа бизнес-процессов автоматизируемой сферы деятельности организации (предприятия, компании).

Известно, что общее количество ресурсов  $\xi$  (интеллектуальных, информационных, материальных, финансовых, вычислительных и т.д.), требуемых для обеспечения реализации одного производственного цикла в рамках





соответствующего бизнес-процесса, обратно пропорционально времени  $\tau$ , которое нужно затратить на его реализацию. Следовательно, эффективность (комплексное свойство, включающее в себя результативность, оперативность и ресурсоемкость) бизнес-процесса можно описать некой производственной функцией  $\Psi(\tau, \xi)$  [21]. Очевидно, что для получения максимального эффекта от автоматизации операционных бизнес-процессов, предъявляемые к будущей КИС требования  $\{T_i\}$  должны обеспечивать минимизацию этой функции.

В общем случае требования  $\{T_i\}$ , предъявляемые любой организацией, в том числе и организацией ОПК, к платформе для создания КИС, обусловлены тремя классами особенностей:

- отраслевыми особенностями либо особенностями интегрированной структуры, в которую организация ОПК входит (особенностями внешнего окружения организации);
- основными особенностями конкретной организации ОПК;
- особенностями автоматизируемых операционных процессов (бизнес-процессов).

В работе [4] показано, что разработка унифицированных требований, предъявляемых к платформе для создания КИС, затрудняется различным уровнем формализации особенностей выделенных классов. Первый класс особенностей соответствует высокому (100 %) уровню формализации, второй – среднему (70 %), а третий – низкому. По этой причине предлагается выделить две группы требований к КИС организации ОПК. Первую группу требований сформируем на основе особенностей первого класса. В нее войдут общие требования, позволяющие определить исходное множество альтернативных платформ для создания КИС (далее – альтернативных КИС), допустимых к внедрению в настоящее время в организации ОПК с точки зрения внешнего окружения. Вторую группу требований сформируем на основе второго и третьего классов. В нее войдут детализированные требования, позволяющие провести углубленный анализ альтернативных КИС с точки зрения внутреннего окружения организации ОПК.

Требования первой группы достаточно очевидны. В большинстве случаев они формулируются извне – выбор КИС в организации ОПК осуществляется с учетом ограничительного перечня интегрированной структуры, в которую организация ОПК входит.

Более сложной задачей является формирование требований второй группы и управления этими требованиями в процессе жизненного цикла КИС. Специалистами в области промышленной автоматизации разработаны различные способы решения этой задачи. Например, одним из таких способов является применение метода консолидированных узлов [4, 18], предложенного Л. Даниловой и Д. Щегловым для повышения результативности процесса формирования функциональных требований к различным классам КИС.

С целью постановки и решения задачи многокритериального выбора альтернатив все сформулированные требования к КИС  $\{T_i\}_{i=1}^n$  целесообразно определенным образом упорядочить и представить в виде дерева  $G(T, r)$  (графа, не имеющего циклов и содержащего  $v$  узлов и  $v - 1$  связей), где  $T$  – множество требований ( $T_0$  – корень дерева), а  $r$  – множество ребер.

В работе [4] набор требований дерева  $G(T, r)$ , которые являются декомпозицией требования предыдущего уровня иерархии, предложено называть **контентом требования**. Требования, которые нельзя детализировать, предложено называть **атомарными**. При этом первый уровень дерева  $G(T, r)$  всегда будет содержать только один контент требований, а последующие уровни могут содержать произвольное количество контентов, входящих в состав определенных требований предыдущего уровня и являющихся их декомпозицией, а атомарные требования могут находиться на любом уровне в любом из контентов требований.

С целью обеспечения работы с деревом требований  $G(T, r)$  в процессе выбора платформы для создания КИС введено следующее обозначение требования  $T_{\mu, i}^{\varphi, \eta}$ , где  $\varphi$  – номер уровня иерархии, на котором находится рассматриваемое требование;  $\eta$  – номер контента, образованного этим требованием



на следующем  $\varphi + 1$  уровне иерархии ( $\eta = 0$  при отсутствии контента);  $\mu$  – номер контента, в который рассматриваемое требование входит на  $\varphi$ -м уровне иерархии;  $i$  – порядковый номер требования в  $\mu$ -м контенте.

При проведении декомпозиции дерева требований  $G(T, r)$  на подтребования целесообразно исключить когнитивное взаимодействие между ними [22]. Построение дерева  $G(T, r)$  является задачей классификации большой размерности, при решении которой эксперты разделяют множество требований на несколько групп, имеющих для них определенное смысловое значение. Очевидно, что группы, на которые разбиваются требования, могут быть в некотором смысле зависимыми друг от друга (когнитивными) или независимыми. В случае когда требования дерева  $G(T, r)$  не зависят друг от друга, решения, принимаемые экспертом в отношении каждого требования, не зависят от решений, принимаемых в отношении других требований. Таким образом, исключение когнитивного взаимодействия между требованиями усложняет процесс декомпозиции, зато значительно упрощает дальнейшую процедуру экспертного анализа.

Рассмотрим пример дерева требований, построенного в соответствии с введенными

обозначениями. Предположим, что одним из требований в составе структуры является низкая совокупная стоимость владения КИС. Декомпозиция этого требования представлена на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, совокупная стоимость владения КИС показана в виде древовидной структуры (в конкретном случае – стоимостных показателей), состоящей из трех уровней. Несложно заметить, что совокупную стоимость владения КИС можно вычислить как сумму пятнадцати стоимостей (обозначенных кружками с тенью).

### 3. Математико-алгоритмическое обеспечение выбора КИС

Рассмотрим задачу анализа и выбора платформы для создания КИС, учитывающей особенности конкретной организации ОПК, исходными данными для решения которой являются требования  $T_{\mu,i}^{\varphi,\eta} \in G(T, r)$ . Набор требований, предъявляемых к конкретным классам КИС, является предметом отдельного рассмотрения.

Выбор платформы для создания КИС из имеющихся альтернативных вариантов (обозначим их множеством  $\{A_k\}_{k=1}^m$ ) осуществляется лицом, принимающим решение

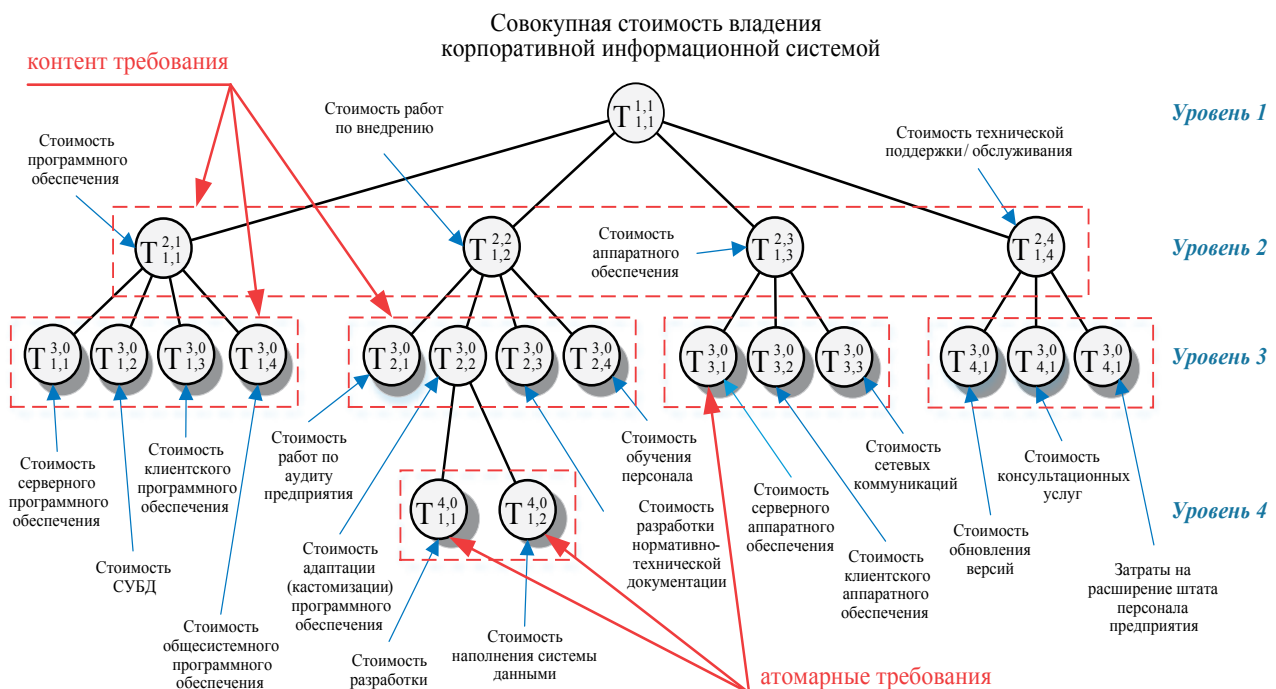


Рис. 2. Дерево требований на примере декомпозиции совокупной стоимости владения КИС



(ЛПР), на основе мнений экспертной группы (обозначим ее множеством  $\{E_h\}_{h=1}^l$ ).

В работе [23] существующие методы решения задач теории принятия решений предложено классифицировать по следующим основным признакам:

- индивидуальные и коллективные;
- со скалярным и с векторным критерием;
- в условиях определенности, риска, неопределенности и противодействия.

В соответствии с классификацией [23] задачу о выборе КИС можно отнести к коллективной, так как на решение оказывает влияние группа экспертов, с векторным критерием [24] и с той или иной степенью неопределенности [25] в зависимости от конкретной организации ОПК.

В работах [2, 26, 27] задачи принятия решения делятся на следующие три группы:

- задача упорядочения альтернатив;
- задача разделения альтернатив на упорядоченные по качеству группы;
- задача выбора наилучшей альтернативы.

В рассмотренной классификации задача о выборе КИС относится к третьему типу задач. В самом простом случае можно рассматривать две альтернативы, и если из них можно выбрать лучшую, то и из всего множества можно выбрать наилучшую, воспользовавшись методом перебора.

В работе О.И. Ларичева [23] в зависимости от априорной информации выделено 12 классов задач для 7 возможных ситуаций. Задачу о выборе КИС, наилучшим образом удовлетворяющей требованиям конкретной организации ОПК, следует отнести к классу  $I^+KJ$ , когда:

- каждому требованию (критерию) можно приписать «вес» – числовую характеристику его важности по сравнению с другими критериями;
- для любых оценок различных шкал можно определить соотношение типа «лучше – хуже»;
- для интервалов между различными оценками различных шкал можно определить соотношение типа «лучше – хуже».

В теории принятия решений выделяют несколько подходов к решению задач выбора альтернатив [27]:

- экономико-математический;
- инженерно-экономический;
- компьютерное моделирование;
- психологический;
- их синтез.

Анализ достоинств и недостатков методов теории принятия решения, применяемых в рамках этих подходов, показывает, что рациональный метод решения задачи о выборе КИС, оптимальной для конкретной организации ОПК, находится в области пересечения рассматриваемых подходов [28].

Метод решения многокритериальной задачи в значительной степени определяется ее постановкой и исходными данными для проведения экспертного анализа.

Обзор специализированной литературы [28–32] показывает, что все многочисленные методы решения многокритериальных задач можно разделить на три группы:

- метод главного показателя (сведение многокритериальной задачи к однокритериальной за счет перевода остальных критериев в разряд ограничений);
- методы результирующего показателя (в том числе аддитивный показатель, мультипликативный и минимаксный);
- лексикографические методы (методы последовательных уступок).

В связи с тем что в рассматриваемой задаче можно определить «весовые» коэффициенты требований (показателей), для ее решения целесообразно использовать методы результирующего показателя. В работе [33] предлагается классифицировать методы определения относительной важности критериев в зависимости от вида их измерений, а именно:

- в первичных шкалах (шкала наименований, порядка, интервалов и т.д.);
- в производных шкалах (функций полезности и частот предпочтений).

С учетом создания информационной системы для автоматизации процесса работы экспертной группы целесообразно остановиться на методе попарных сравнений, относящемуся





к методам обработки информации в первичных шкалах.

С учетом введенных положений и обозначений выбор КИС может осуществляться на основе алгоритма, представленного на рисунке 3.

Алгоритм проведения экспертного анализа альтернативных платформ для создания КИС состоит из этапов, задач и шагов.

Математический аппарат, разработанный автором и применяемый на втором, третьем, четвертом и пятом этапах алгоритма, достаточно подробно рассмотрен в работе [4] на примере выбора PDM-системы.

На первом этапе формируется структура исходных данных. Элементами этой структуры являются альтернативные платформы для создания КИС, предъявляемые к ним требования (см. раздел 2), а также интеллектуальные ресурсы: лицо, принимающее решение (ЛПР), и эксперты.

На втором этапе проводится экспертный анализ альтернативных КИС на основе требований **первого уровня** дерева требований

$G(T, r)$ , который включает в себя последовательное решение следующих задач:

**Задача 1.** Определение коэффициентов относительной важности (приоритетов) требований, предъявляемых к альтернативным КИС, в том числе:

**Шаг 1.** Построение каждым экспертом  $E_h$  матриц парных сравнений требований [33, 34].

**Шаг 2.** Проверка всех матриц парных сравнений требований на согласованность [34].

**Шаг 3.** Формирование групповой матрицы парных сравнений требований с использованием метода медианы Кемени [35].

**Шаг 4.** Вычисление вектора групповых «весовых» коэффициентов требований с использованием метода наименьших квадратов.

**Задача 2.** Определение соответствия альтернативных КИС заданным требованиям (по аналогии с задачей 1 этапа 2).

**Задача 3.** Вычисление значений комплексных показателей качества альтернативных КИС методом аддитивной свертки.

**Задача 4.** Проведение анализа полученных результатов для сужения множества

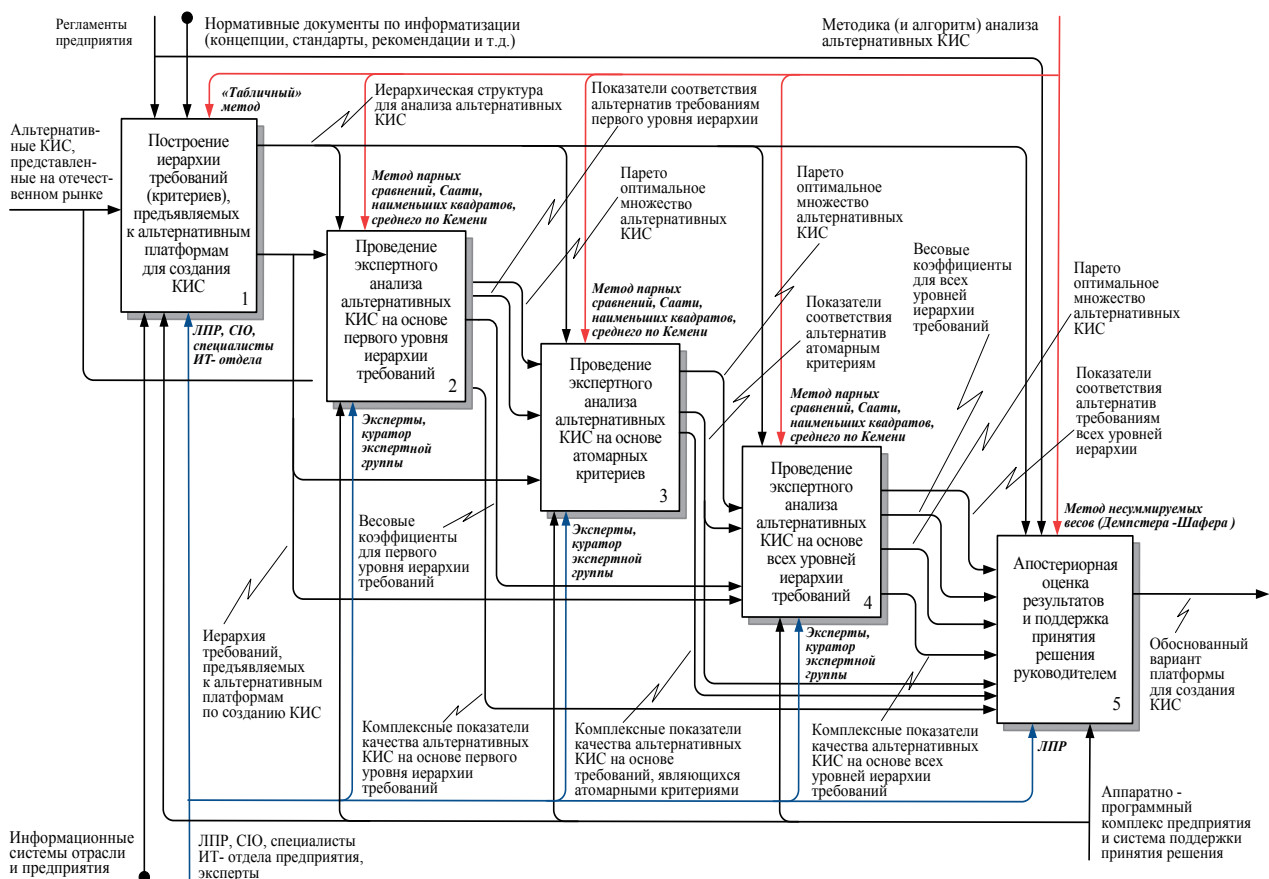


Рис. 3. Алгоритм проведения экспертного анализа альтернативных платформ для создания КИС



Парето с применением «табличного» метода [36, 37].

На третьем этапе проводится экспертный анализ альтернативных КИС на основе *атомарных* требований, который включает в себя последовательное решение следующих задач:

Задача 1. Определение соответствия альтернативных КИС атомарным требованиям (по аналогии с задачей 2 этапа 2).

Задача 2. Вычисление значений комплексных показателей качества альтернативных КИС методом аддитивной свертки (по аналогии с задачей 3 этапа 2). При том все атомарные требования считается равноценными.

Задача 3. Проведение анализа полученных результатов для сужения множества Парето (по аналогии с задачей 4 этапа 2).

На четвертом этапе проводится экспертный анализ альтернативных КИС на основе требований *всех уровней* построенного дерева требований, который включает в себя последовательное решение следующих задач:

Задача 1. Определение коэффициентов относительной важности требований (по аналогии с задачей 1 этапа 2).

Задача 2. Вычисление значений комплексных показателей качества альтернативных платформ для создания КИС (по аналогии с задачами 3 этапа 2 и задачей 2 этапа 3).

Задача 3. Проведение анализа результатов для сужения множества Парето (по аналогии с задачей 4 этапа 2 и задачей 3 этапа 3).

На пятом этапе выполняется апостериорная оценка результатов экспертного анализа и поддержка процесса принятия решения руководителем, которая включает в себя последовательное решение следующих задач:

Задача 1. Проведение дополнительной и альтернативной оценки КИС согласно методу комбинации свидетельств Демпстера – Шафера [38, 39]. При этом значению результирующей дополнительной оценки будет соответствовать альтернативная КИС, которая является наилучшей по нескольким критериям, а значению результирующей альтернативной оценки – альтернативная КИС, не имеющая ярко выраженных недостатков по совокупности рассматриваемых критериев.

Задача 2. Проведение анализа для поддержки принятия решения руководителем.

С целью обеспечения более обоснованного принятия решения ЛПР формирования апостериорной оценки альтернатив на основе ранее рассчитанных показателей (в результате решения задачи 3 этапа 2, задачи 2 этапа 3 и задачи 2 этапа 4) и байесовского подхода [40].

Результат апостериорной оценки при рассмотрении его совместно с результатами дополнительной и альтернативной оценки позволяют дать рекомендации по выбору рационального варианта КИС.

Важно отметить, что каждая задача выбора КИС индивидуальна и на практике в ряде случаев не требуется реализация всех этапов вышеописанного алгоритма (иногда решение может быть получено уже на этапе 2).

С целью принятия ЛПР решения о выборе КИС дополнительно может возникнуть потребность в оценке экономического эффекта от ее внедрения. Для решения этой задачи могут использоваться следующие методики: финансовые (ROI, TCO, CI, EVA); вероятностные (ROV, AIE, EVS); качественного анализа, также называемые эвристическими (AIE, BSC) [2].

#### 4. Система поддержки принятия решения для выбора КИС

Очевидно, что проведение экспертного анализа по вышеописанному алгоритму (см. рис. 4) невозможно без применения системы поддержки принятия решения (СППР). В рассматриваемом случае СППР является программным продуктом, предназначенным для автоматизированной информационной поддержки коллективной работы экспертной группы в процессе выбора рационального варианта КИС для конкретной организации ОПК. Для этого СППР должна обладать следующими функциональными возможностями:

1) создание и управление структурой системных ролей (администратор СППР, члены экспертной группы  $E_n$ , ЛПР), участвующих в процессе принятия решения;

2) формирование и согласование с ЛПР и членами экспертной группы следующих информационных объектов:

- цель внедрения КИС в конкретной организации ОПК;



- задачи, которые должна решать КИС в организации ОПК для достижения поставленной цели;
- дерево требований  $G(T, r)$ , предъявляемых к КИС организации ОПК, удовлетворяющих поставленным задачам;
- исходное множество КИС  $\{A_k\}_{k=1}^m$  для проведения экспертизы на соответствие требованиям;

3) проведение экспертизы альтернативных КИС;

4) формирование отчета об экспертизе для ЛПР.

С учетом требуемых функциональных возможностей графическое представление структуры объектов СППР и связей между ним можно представить в виде диаграммы классов языка моделирования UML [41], приведенной на рисунке 4.

На рисунке 4 композиция – это тип связи, когда объект входит в состав другого объекта, но не является его составной частью, а агрегация – тип связи, когда объект является неотъемлемой частью другого объекта, в состав которого он входит [41].

Важно отметить, что в качестве программной среды (платформы) для создания СППР может быть использована практически любая современная система коллективного информационного взаимодействия, поддерживающая

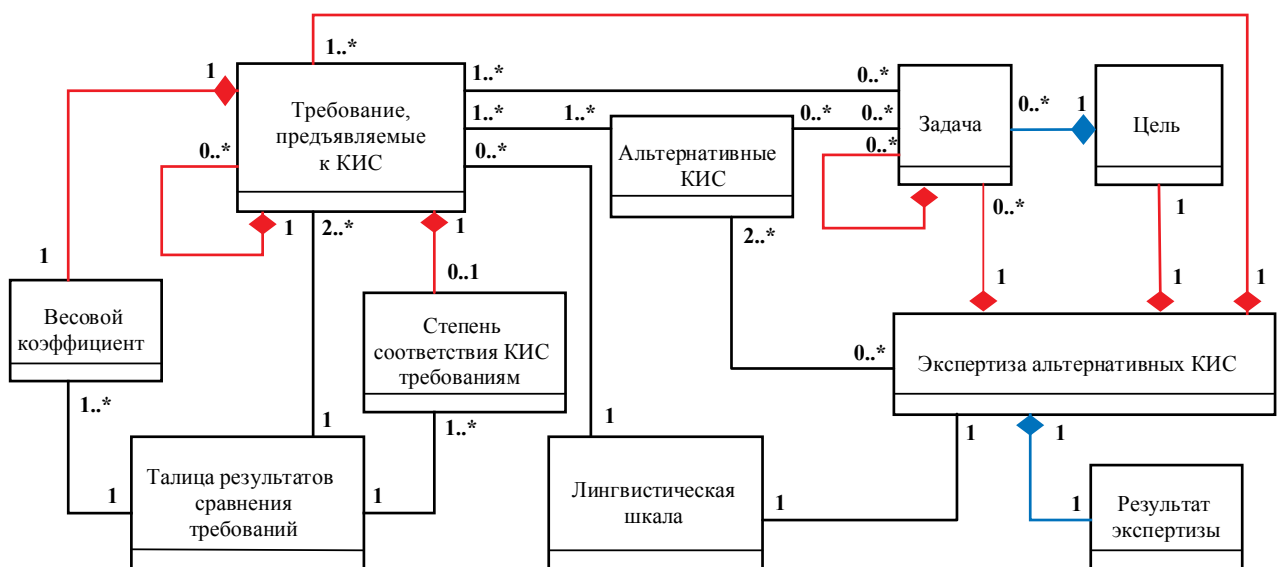
древовидную иерархическую структуру отображения объектов и имеющая интерфейс к какой-либо системе управления базами данных (например, система электронного документооборота или даже почтовая система).

Интерфейс пользователя СППР удобно представить в виде окон навигации, состава и атрибутов, например:

- в окне навигации целесообразно представить древовидную структуру объектов СППР. Назовем ее «деревом навигации». Через «дерево навигации» пользователь вызывает контекстное меню СППР, в котором он может выбрать требуемую функцию СППР с учетом своей системной роли. Все объекты СППР, создаваемые или удаляемые в результате выполнения каких-либо функций, добавляются в «дерево навигации» или удаляются из него;

- в окне состава удобно отображать наименования и статусы всех объектов, входящих в состав объекта, выделенного пользователем в «дереве навигации». В процессе проведения экспертизы они изменяются автоматически либо пользователем;

- в окне атрибутов отображаются значения атрибутов объектов СППР, выделенных пользователем в «дереве навигации». Значения реквизитов отображаемых атрибутов заполняются в результате выполнения связанных с ними функций СППР или имеют системные



**Рис. 4.** Структура системных объектов СППР, используемых в автоматизированной процедуре проведения экспертизы альтернативных КИС

— тип связи «ассоциация»; — тип связи «агрегация»; — тип связи «композиция»





значения для анализа хода процесса реализации экспертизы.

Рабочая версия подобной СППР была разработана автором еще в 2007 году и применялась экспертным сообществом для автоматизации процессов анализа и выбора альтернатив в сфере информационных технологий, в частности при выборе PDM-системы для автоматизации проектно-конструкторских работ в АО «КБСМ» [42]. Однако в связи со сменой поколений средств вычислительной техники и операционных систем в настоящее время данная СППР может использоваться исключительно в качестве прототипа при разработке новой системы.

## 5. Интерпретация и анализ полученных результатов

Предлагаемый научно-методический инструментарий предназначен для применения в составе автоматизированной системы – СППР, что не позволяет привести краткого пошагового описания его работы. Поэтому с целью пояснения особенностей применения предлагаемого научно-методического инструментария приведем простой пример решения задачи выбора КИС. Пусть исходными данными для выбора варианта КИС являются множество требований  $\{T_{ij}\}_{i=1}^n$ ,  $i = (1, 2, \dots, 5)$ , где:

$T_1$  – совокупная стоимость владения КИС;

$T_2$  – интеграция с используемыми в организации системами автоматизированного проектирования (САПР);

$T_3$  – функциональная достаточность;

$T_4$  – качество сопровождения;

$T_5$  – интеграция с автоматизированными системами управления (АСУ) организации.

Выбор будем осуществлять из 13 альтернативных КИС.

С целью упрощения описания и обеспечения наглядной демонстрации работы научно-методического инструментария ряд этапов и вычислений будут исключены из дальнейшего описания.

Согласно ранее описанной процедуре (см. задачу 1 этапа 2 алгоритма проведения экспертного анализа) проводится опрос экспертов  $E_h$  и вычисляется вектор  $W$  относительных весов (или приоритетов) требований. Результаты расчета вектора относительных весов после нормировки на максимальное значение того вектора приведены в таблице 1.

Определяется степень соответствия КИС требованиям (см. задачу 1 этапа 2).

Рассчитаем массы свидетельств согласно теории Демпстера – Шафера [38, 39] (см. задачу 1 этапа 5 алгоритма проведения экспертного анализа). Результаты расчета представим в табличном виде (табл. 2).

Для наглядности все результаты, полученные в процессе проведения экспертного анализа альтернативных КИС, сведем в таблицу 3.

Как видно из таблицы 3, лицу, принимающему решение, для окончательного выбора следует предоставить пять КИС, значения комплексных показателей качества которых приведены на диаграмме (рис. 5).

Согласно проведенным расчетам (см. табл. 3 и рис. 5) наилучшим в среднем для заданных требований является вариант КИС № 12. В качестве альтернативных можно рассматривать варианты КИС № 2, 7 и 10. По дополнительной оценке лидируют варианты КИС № 2, 3 и 4.

Из таблицы 3 и рисунка 5 видно, что наивысший балл по суммарной оценке занимает вариант КИС № 12. Однако он имеет ярко

Таблица 1

Результаты расчета вектора относительных весов требований

|     | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_5$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| $W$ | 0,075 | 0,215 | 0,240 | 0,706 | 1,000 |

Таблица 2

Результат расчета масс свидетельств

| $B_n = \{z_n\}$ | $\{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5\}$ | $\{z_2, z_3, z_4, z_5\}$ | $\{z_3, z_4, z_5\}$ | $\{z_4, z_5\}$ | $\{z_5\}$ |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------|----------------|-----------|
| $m(B_n)$        | 0,075                         | 0,140                    | 0,025               | 0,466          | 0,294     |



Таблица 3

Итоговые результаты экспертного анализа альтернативных КИС

| Альтернативные варианты КИС | Степень соответствия КИС требованиям |                |                |                |                | Суммарная оценка |          | Альтернативная оценка |          | Дополнительная оценка |          |
|-----------------------------|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
|                             | T <sub>1</sub>                       | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> |                  |          |                       |          |                       |          |
|                             |                                      |                |                |                |                | Оценка           | Балл     | Оценка                | Балл     | Оценка                | Балл     |
| Вариант КИС № 1             | 0,30                                 | 0,40           | 0,40           | 0,20           | 0,30           | 0,289            |          | 0,324                 |          | 0,229                 |          |
| <b>Вариант КИС № 2</b>      | <b>0,80</b>                          | <b>0,90</b>    | <b>0,50</b>    | <b>0,40</b>    | <b>0,70</b>    | 0,606            | <b>2</b> | 0,743                 | <b>2</b> | 0,488                 | <b>1</b> |
| Вариант КИС № 3             | 0,40                                 | 0,50           | 0,40           | 0,50           | 0,50           | 0,486            | <b>4</b> | 0,500                 | <b>5</b> | 0,476                 | <b>2</b> |
| Вариант КИС № 4             | 0,60                                 | 0,60           | 0,50           | 0,40           | 0,50           | 0,481            |          | 0,522                 |          | 0,429                 | <b>3</b> |
| Вариант КИС № 5             | 0,70                                 | 0,70           | 0,60           | 0,40           | 0,30           | 0,416            |          | 0,440                 |          | 0,236                 |          |
| Вариант КИС № 6             | 0,50                                 | 0,50           | 0,90           | 0,70           | 0,10           | 0,427            |          | 0,572                 |          | 0,100                 |          |
| Вариант КИС № 7             | 0,40                                 | 0,40           | 1,00           | 0,90           | 0,00           | 0,443            |          | 0,659                 | <b>3</b> | 0,000                 |          |
| Вариант КИС № 8             | 0,60                                 | 0,60           | 0,50           | 0,60           | 0,40           | 0,410            | <b>5</b> | 0,541                 |          | 0,400                 |          |
| Вариант КИС № 9             | 0,60                                 | 0,30           | 1,00           | 0,40           | 0,00           | 0,282            |          | 0,426                 |          | 0,000                 |          |
| Вариант КИС № 10            | 0,40                                 | 0,40           | 1,00           | 0,90           | 0,00           | 0,443            |          | 0,659                 | <b>3</b> | 0,000                 |          |
| Вариант КИС № 11            | 0,50                                 | 0,30           | 0,80           | 0,70           | 0,20           | 0,442            |          | 0,577                 |          | 0,200                 |          |
| <b>Вариант КИС № 12</b>     | <b>0,70</b>                          | <b>0,80</b>    | <b>0,80</b>    | <b>0,10</b>    | <b>0,90</b>    | 0,620            | <b>1</b> | 0,900                 | <b>1</b> | 0,335                 | <b>5</b> |
| Вариант КИС № 13            | 0,90                                 | 0,60           | 0,70           | 0,30           | 0,60           | 0,526            | <b>3</b> | 0,639                 | <b>4</b> | 0,388                 | <b>4</b> |

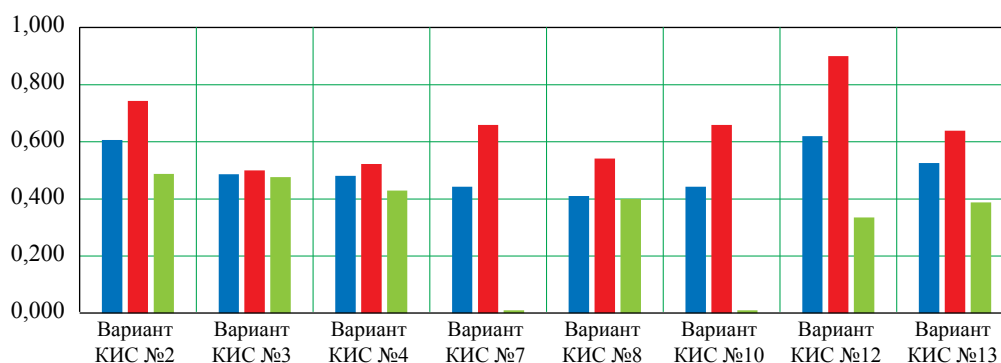


Рис. 5. Результаты анализа альтернативных вариантов КИС

— суммарная оценка; — альтернативная оценка; — дополнительная оценка

выраженный недостаток – низкая степень соответствия требованию T<sub>2</sub>. Таким образом, наиболее рациональным, с точки зрения автора, представляется выбор варианта КИС № 2.

Следует отметить, что при отсутствии методики анализа и выбора альтернатив подобные решения принимаются, как правило, либо методом голосования, либо единолично ЛПР исходя из опыта и рекомендаций организаций, уже использующих какой-либо из альтернативных вариантов КИС. В случае голосования выбор обычно осуществляется большинством голосов заинтересованных лиц. В рамках приведенного примера с учетом упорядочения требований по приоритетам, вероятнее всего, голоса разделились бы между вариантами КИС № 2, 3 и 4, не имеющими ярко выраженных недостатков. А в случае, когда выбор

необходимо было осуществить на основе дерева требований, событие выбора какого-либо варианта КИС было бы равновероятным.

### Заключение

Отмечается важность задачи формирования требований, предъявляемых к КИС современной организации (предприятия) промышленности, и обеспечения оптимального управления этими требованиями в процессе разработки и эксплуатации системы.

Подробно рассмотрены этапы внедрения КИС, наиболее распространенные подходы и методы, применяемые на каждом из рассматриваемых этапов.

Предложена методология, позволяющая максимально полно учесть требования конкретного промышленного производства



на этапе выбора платформы для создания КИС. В основе предлагаемой методологии лежат понятия «контент требования» и «атомарное требование», а также совокупность методов, применяемых в теории поддержки принятия решений («табличный» метод, метод анализа иерархий, метод несуммируемых весов (или метод Демпстера – Шафера) и метод медианы Кемени).

### Список литературы

1. Щеглов Д.К., Пиликов Н.А., Тимофеев В.И. Концептуальные основы цифровой трансформации организаций оборонно-промышленного комплекса // Автоматизация в промышленности. 2021. № 2. С. 13–23.
2. Бородавкин В.А., Щеглов Д.К. Введение в цифровую трансформацию предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности: новые подходы // Инновации. 2020. № 12(266). С. 23–32.
3. Щеглов Д.К., Сайбель А.Г., Баушев С.В. Объективизированный показатель защищенности электронных информационных ресурсов инновационного предприятия // Инновации. 2021. № 3(269). С. 85–91.
4. Щеглов Д.К. Методика выбора PDM-системы для предприятия ракетно-космической отрасли // Инновации. 2011. № 5(151). С. 6–13.
5. Погорелов В.И., Щеглов Д.К. Методические основы выбора системы поддержки жизненного цикла наукоемких изделий // В сб.: Актуальные вопросы ракетостроения. Вып. 4. СПб.: Балт. гос. тех. ун-т, 2007. С. 102–106.
6. Shumaker G.C. Overview of the U.S.A.F. integrated computer aided manufacturing (ICAM PROGRAM) Computer Integrated Manufacturing Branch, Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson AFB, Ohio 45433 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017653400> (Access mode: 21.08.2021).
7. Р 50.1.028-2001 Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования.
8. A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge (BABOK Guide) URL: <https://www.iiba.org/career-resources/a-business-analysis-professionals-foundation-for-success/babok/> (Access mode: 23.10.2021).
9. Робсон М., Уллах Ф. Практическое руководство по реинжинирингу бизнес-процессов. Пер. с англ. под ред. Н.Д. Эриашвили. М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997. 224 с.
10. Хаммер М., Чампи Дж. Реинжиниринг корпорации: Манифест революции в бизнесе. Пер. с англ. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 1997. 332 с.
11. Лёвкин Н.В. Реинжиниринг и даунсайзинг: сравнительный анализ с позиции организационной культуры компании // Менеджмент в России и за рубежом. 2006. № 4. С. 96–104.
12. Марков Е.П. Управление проектами и оборонно-промышленный комплекс: учебное пособие. СПб: СЗРЦ Концерна ВКО Алмаз – Антей, 2020. 164 с.
13. Котруца Я. Жизненный цикл проекта: выбрать и не пожалеть URL: <https://www.wrike.com/ru/blog/jiznenniy-tsikl-proyectora-vibrat-i-ne-rojalet/> (Режим доступа: 03.11.2021).
14. Суханова А. Выполнить проект в срок // CAD/CAM/CAE Observer. 2008. № 3(39). С. 8–17.
15. Воробьев А.М., Пивоваров В.М., Щеглов Д.К. и др. Концепция создания единой среды проектирования как первый этап обеспечения жизненного цикла изделий. Опыт ОАО «КБСМ» // CADmaster. 2008. № 2. С. 16–20.
16. Электронная энциклопедия Википедия. Требования к программному обеспечению. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Требования\\_к\\_программному\\_обеспечению](http://ru.wikipedia.org/wiki/Требования_к_программному_обеспечению) (Режим доступа: 11.09.2021).
17. Leffingwell D., Widrig D. Managing software requirements approach. 2nd ed. Boston: Addison Wesley, 2003.
18. Данилова Л.Г., Щеглов Д.К. Методология создания единого информационного пространства ракетно-космической отрасли // Rational Enterprise Management. 2010. № 6. С. 12–15.
19. Щеглов Д.К., Данилова Л.Г., Охочинский М.Н. Методология построения системы защиты данных в едином информационном пространстве корпорации // В сб. трудов XV Всероссийской НПК «Актуальные проблемы защиты и безопасности» Технические средства





- противодействия терроризму. Т. 2 СПб., 2012. С. 70–75.
- 20.** Щеглов Д.К., Никитин В.А. Основы информатизации и автоматизации предприятий ракетно-космической промышленности // Четвертые Уткинские чтения: Международная научн.-технич. конф. Труды первой научн.-технич. конф. молодых специалистов. / Балт. гос. техн. ун-т, ОАО «КБСМ». СПб.; 2009. (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 7). С. 116–118.
- 21.** Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.
- 22.** Денисов В.Г., Ларичев О.И., Фуремс Е.М. Когнитивное моделирование как средство построения больших баз экспертных знаний // Вестник Российского общества информатики и вычислительной техники. 1991. Вып. 1. С. 26–32.
- 23.** Ларичев О.И. Человеко-машинные процедуры принятия решений (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1971. № 12. С. 130–142.
- 24.** Вентцель Е.С. Введение в исследование операций. М.: «Советское радио», 1964. 384 с.
- 25.** Канеман Д., Словик П., Тверски А. Принятие решений в неопределенности: Правила и предубеждения. Харьков: Изд-во Института прикладной психологии «Гуманитарный Центр», 2005. 632 с.
- 26.** Ларичев О.И., Петровский А.Б. Системы поддержки принятия решений: современное состояние и перспективы развития // Итоги науки и техники. Техн. кибернетика. 1987. Т. 21. С. 131–165.
- 27.** Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений. М.: Наука, Физматлит, 1996. 208 с.
- 28.** Щеглов Д.К. Обзор математических методов поддержки принятия решения о выборе рационального варианта PDM-системы // CALS-технологии в образовании, науке и производстве: материалы второй научн.-метод. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. СПб.: 2008. С. 155–158.
- 29.** Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений: учеб. пособие. М.: Логос, 2000. 296 с.
- 30.** Орлов А.И. Высокие статистические технологии: экспертные оценки. Учебник. М.: ИВСТЭ, 2002. 372 с.
- 31.** Озерной В.М. Принятие решений (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1971. № 11. С. 106–121.
- 32.** Руа Б. Классификация и выбор при наличии нескольких критериев (метод ЭЛЕКТРА). Пер. с франц. // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. С. 80–107.
- 33.** Анохин А.М., Глотов В.А., Павельев В.В., Черкашин А.М. Методы определения коэффициентов важности критериев // Автоматика и телемеханика. 1997. № 8. С. 3–35.
- 34.** Saaty T.L. The Analytical hierarchy Process. N.Y.; 1980.
- 35.** Кемени Дж., Снелл Дж. Кибернетическое моделирование. Некоторые приложения. Пер. с англ. / Под ред. И.Б. Гутчина. М.: Советское радио, 1972. 192 с.
- 36.** Абакаров А.Ш., Сушков Ю.А. Двухэтапная процедура отбора перспективных альтернатив на базе табличного метода и метода анализа иерархий // Наука в образовании: Электронное научное издание. 2008. № 7. URL: [technomag.edu.ru/index.html](http://technomag.edu.ru/index.html) (Режим доступа: 11.09.2021).
- 37.** Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 144 с.
- 38.** Dempster A.P. A generalization of Bayesian inference (with discussion) // Journal of the Royal Statistical Society Series B. 1968. № 30. P. 205–224.
- 39.** Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под редакцией Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М.: Мир, 1993. 368 с.
- 40.** Севастьянов Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 272 с.
- 41.** OMG Unified Modeling Language, Version 2.5.1, formal/2017-12-05, December 2017. URL: <https://www.omg.org/spec/UML/2.5.1/PDF> (Access mode: 11.09.2021).
- 42.** Щеглов Д.К. Система автоматизированной информационной поддержки процесса принятия решения о выборе системы управления проектно-конструкторскими данными



для предприятия ракетно-космической отрасли // Синергия образования, науки, промышленности: труды международной

научн.-практ. конф. / Балт. гос. тех. ун-т. СПб: 2008. (Библиотека журнала «Военмех, Вестник БГТУ», № 2). С. 140–146.

---

### Об авторе

**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 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

## Methodology for selecting corporate information systems in the conditions of digital transformation of a defence company

Shcheglov D. K.

*JSC “Design Bureau of Special Machine-Building”, Saint Petersburg, Russian Federation*

A methodology of expert analysis of the market of alternative corporate information systems (CIS) is proposed in order to choose the platform for creating a CIS that fully meets the requirements of a particular defence company. The proposed methodology is based on a set of adapted methods of the decision support theory applied to the problems of multi-criteria collective choice of alternatives.

**Keywords:** corporate information system, requirements, decision theory, multi-criteria choice of alternatives, method, expert system

---

### Information about the author

**Shcheglov Dmitry Konstantinovich** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Calculation and Research Department, JSC “Design Bureau of Special Machine-Building”, Head of the Base Department “Aerospace Defence and Air Defence Technologies”, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education D. F. Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint Petersburg, Russian Federation.

Research interests: engineering calculations, methods for designing complex engineering systems, system analysis, industrial automation, project management, methods and means of digital transformation of enterprises in high-tech industries.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-25-35>

УДК 623.465.72

## Особенности работы активной ГСН при воздействии отражений от земной поверхности

М. А. Горбачев, В. В. Свистов, Е. А. Ульянова

Научно-технический центр «Научно-исследовательский электромеханический институт» публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина», Москва, Российская Федерация

На основе определения спектра помехового сигнала, отраженного от земной поверхности, рассмотрены особенности функционирования активной головки самонаведения (ГСН) при различных типах излучаемых сигналов. Даны рекомендации по использованию в активной ГСН результатов работ по обнаружению цели на фоне Земли радиолокаторами с синтезированной апертурой и моноимпульсной антенной.

**Ключевые слова:** спектр помехового сигнала, доплеровский сдвиг, диаграмма направленности антенны, удельная эффективная площадь рассеяния, активная головка самонаведения

**Для цитирования:** Горбачев М. А., Свистов В. В., Ульянова Е. А. Особенности работы активной ГСН при воздействии отражений от земной поверхности // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 4. С. 25–35. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-25-35>

**For citation:** Gorbachev M. A., Svistov V. V., Ulyanova E. A. The specifics of functioning of the active homing head exposed to ground surface clutter // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 4. P. 25–35. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-25-35>

Поступила 05.07.2021 Отрецензирована 13.08.2021 Одобрена 12.10.2021 Опубликована 27.12.2021

### Описание помехового сигнала от земной поверхности

Радиолокационные отражения от земной поверхности характеризуются удельной эффективной площадью рассеяния  $\sigma_0$  (ЭПР единицы земной поверхности) и площадью облучаемого участка  $S$ .

Спектр помехового сигнала от земной поверхности при работе активной ГСН (АГСН) по форме совпадает с квадратом диаграммы направленности ее антенны (ДНА) по мощности [1] и характеризуется доплеровским сдвигом частоты отраженного сигнала и величиной полосы. Доплеровский сдвиг зависит от скорости ракеты, угла между вектором скорости и направлением максимума ДНА, а полоса спектра зависит также от ширины главного луча ДНА. В ряде случаев спектр

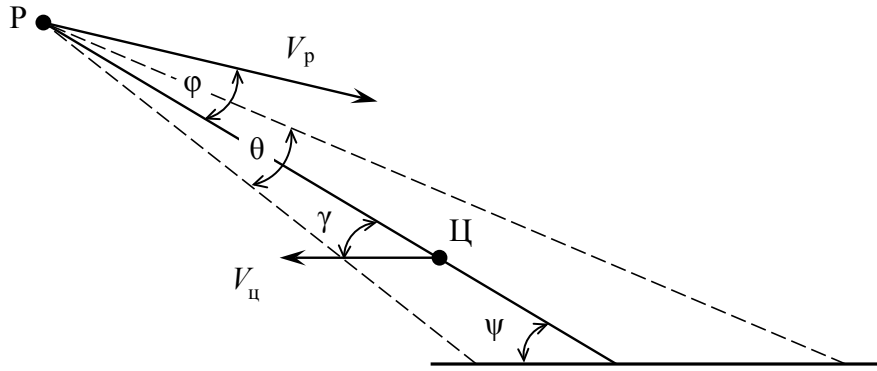
помехового сигнала может иметь составляющие, связанные с отражениями от участка земной поверхности, находящегося под ракетой (альтиметровые отражения), уровень которых определяется уровнем боковых лепестков (фона) ДНА, а доплеровский сдвиг частоты – величиной проекции вектора скорости ракеты на направление альтиметрового участка.

Рассмотрим более подробно оценку спектра помехового сигнала с использованием типовой схемы сближения ракеты с целью, приведенной на рисунке 1.

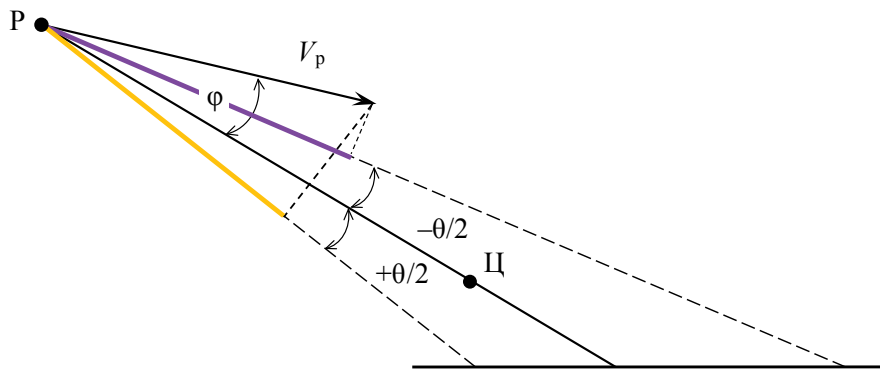
При оценке воздействия помех от земной поверхности существенное значение имеет отстояние их спектра от доплеровского сдвига частоты полезного сигнала  $f_{\text{дц}}$ , определяемого по формуле

$$f_{\text{дц}} = \frac{2V_{\text{ц}} \cos \gamma}{\lambda} + \frac{2V_{\text{р}} \cos \varphi}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучаемых колебаний,  $V_{\text{р}}$ ,  $V_{\text{ц}}$  – скорости ракеты и цели.



**Рис. 1.** Типовая схема сближения ракеты с целью.  $V_p$ ,  $V_ц$  – векторы скорости ракеты и цели,  $\varphi$  – угол между  $V_p$  и линией «ракета–цель»,  $\gamma$  – угол между  $V_ц$  и линией «ракета–цель»,  $\theta$  – ширина ДНА,  $\psi$  – угол между линией «ракета–цель» и земной поверхностью (угол скольжения)



**Рис. 2.** Схема формирования разности проекций вектора скорости на краях ДНА

Поскольку рассеивающие элементы при облучении земной поверхности в основном неподвижны, то доплеровский сдвиг центральной частоты спектра помехового сигнала  $f_{дп}$  зависит от движения ракеты и направления центра ДНА, которое может не совпадать с направлением на цель,

$$f_{дп} = \frac{2V_p \cos(\varphi - \Delta\varphi)}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi$  – угол отклонения центра ДНА от линии «ракета–цель».

Полоса главного лепестка спектра помехового сигнала в основном определяется максимальной разностью проекций вектора скорости  $V_p$  на направления отстоящих друг от друга рассеивающих элементов, находящихся внутри или на краях главного луча ДНА, которая обусловлена неодинаковой величиной угла между вектором скорости  $V_p$  и направлениями на рассеивающие элементы земной поверхности.

Схема формирования максимальной разности проекций  $\Delta V$  вектора скорости  $V_p$

для типовой ситуации, когда  $\Delta\varphi = 0$  и  $\varphi > \theta/2$ , приведена на рисунке 2.

С учетом малости угла  $\theta/2$ , разность  $\Delta V$  на краях ДНА вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_p \left[ \cos\left(\varphi - \frac{\theta}{2}\right) - \cos\left(\varphi + \frac{\theta}{2}\right) \right] = \\ &= 2V_p \sin \varphi \sin \frac{\theta}{2} \approx V_p \theta \sin \varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Разности проекций  $\Delta V$  вектора скорости  $V_p$  соответствует разность доплеровских сдвигов частот  $\Delta f$ , определяющая полосу помехового сигнала,

$$\Delta f = \frac{2\Delta V}{\lambda} = \frac{2V_p \theta \sin \varphi}{\lambda}. \quad (4)$$

Принимая во внимание соотношение ширины ДНА, выраженное через  $\lambda$  и диаметр зеркала антенны  $d$ ,

$$\theta \approx \frac{\lambda}{d}, \quad (5)$$

получим более простое выражение для полосы помехового сигнала в рассматриваемом случае

$$\Delta f = \frac{2V_p \sin \varphi}{d}. \quad (6)$$





При малых значениях угла  $\varphi$ , когда  $\varphi < \theta/2$ , ширина полосы уменьшается, но она не стремится к нулевому значению при  $\varphi = 0$ , когда разность проекций скорости  $V_p$  на краях ДНА становится равной 0.

Для случая  $\varphi = 0$  максимальное значение разности проекций скорости  $V_p$  имеет место между рассеивающими элементами, находящимися в центре и на крае ДНА, т.е.

$$\Delta V = V_p - V_p \cos \frac{\theta}{2} = V_p \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) \approx \approx V_p \left[1 - \left(1 - \frac{\theta^2}{8}\right)\right] = V_p \frac{\theta^2}{8}. \quad (7)$$

Соответственно, полоса помехового сигнала становится равной

$$\Delta f = \frac{2\Delta V}{\lambda} = \frac{V_p \theta^2}{4\lambda} = \frac{\lambda V_p}{4d^2}. \quad (8)$$

В качестве примера для оценки спектра помех примем типовые значения  $V_p = 2000$  м/с,  $d = 3 \times 10^{-1}$  м,  $\lambda = 3 \times 10^{-2}$  м и  $\theta = 0,1$  рад ( $5,73^\circ$ ), тогда в зависимости от угла  $\varphi$  доплеровский сдвиг помехового сигнала  $f_{дц}$ , вычисленный по формуле (2) при  $\Delta\varphi = 0$ , и ширина полосы  $\Delta f$ , вычисленная по формуле (6) для случая  $\varphi > \theta/2$  и (8) для случая  $\varphi = 0$ , будут иметь следующие значения (см. табл. 1).

При этом случаю  $\varphi = 0$  соответствует наименьшая полоса помехового сигнала, но это может иметь место только при прямолинейном полете ракеты и нулевых значениях углов пеленга АГСН, что практически нереализуемо. Реальные значения угла  $\varphi$  при стрельбе по высокоскоростным целям могут достигать  $60^\circ$  и более, при этом полоса помехового сигнала возрастает одновременно со снижением уровня его спектральной плотности мощности.

При стрельбе по малоскоростным низколетящим целям при формировании оптимальных энергетически выгодных траекторий полета ракеты также имеет место увеличенное значение угла  $\varphi$  на момент поиска цели АГСН.

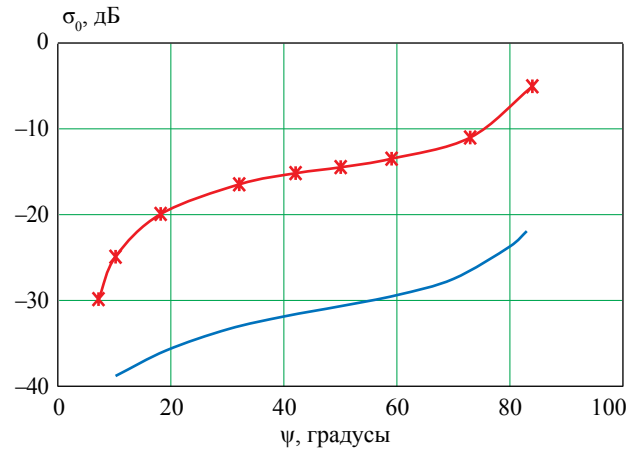


Рис. 3. Типовое изменение удельной ЭПР для см-диапазона  
— суша; — море

Это позволяет при применении гребенки узкополосных фильтров, например с полосой, приемлемой для малоскоростной цели, как указано в [2], до 10 Гц, существенно улучшить условия для обнаружения цели на фоне помехи. Применение гребенки фильтров в условиях рассматриваемого примера (табл. 1) приведет при равномерном спектре помехи к снижению ее мощности в полосе каждого из 10 Гц фильтров на 13 дБ при  $\varphi = 0$  и более 25 дБ при  $\varphi > 15^\circ$ .

Оценка мощности радиолокационных отражений производится на основе определения ЭПР облучаемого участка земной поверхности, которая характеризуется ее удельным значением  $\sigma_0$ , зависящим от вида поверхности и угла скольжения  $\psi$ .

Типовое изменение удельной ЭПР для см-диапазона [2] приведено на рисунке 3.

Для поверхности при угле  $\psi \approx 20^\circ$  значение  $\sigma_0 \approx 10^{-2}$  (–20 дБ) и при уменьшении угла до  $\psi = 7^\circ$  ее значение становится равным  $10^{-3}$  (–30 дБ) с дальнейшим снижением при уменьшении угла  $\psi$ . Поэтому для исключения влияния помехового сигнала желательно формирование траектории ракеты на конечном участке полета ниже цели, что не всегда можно обеспечить.

Таблица 1

Параметры спектра помехового сигнала в зависимости от угла  $\varphi$

| $\varphi$ , град | 0     | 5     | 10    | 15    | 30    | 45   | 60   | 90   |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| $f_{дц}$ , кГц   | 133,3 | 132,8 | 131,3 | 128,8 | 115,5 | 94,3 | 66,7 | 0    |
| $\Delta f$ , кГц | 0,2   | 1,2   | 2,3   | 3,4   | 6,7   | 9,4  | 11,5 | 13,3 |

### Влияние помех в зависимости от типа сигналов

Отношение мощностей сигнала и помехи на входе приемника АГСН пропорционально отношению ЭПР цели  $\sigma_{ц}$  и облучаемого участка земной поверхности  $\sigma_{зп}$  и обратно пропорционально четвертой степени отношения дальностей до участка земной поверхности  $R_{зп}$  и цели  $R_{ц}$

$$\left(\frac{P_c}{P_n}\right)_{вх} = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{зп}} \left(\frac{R_{зп}}{R_{ц}}\right)^4. \quad (9)$$

ЭПР участка равна  $\sigma_{зп} = S \cdot \sigma_0$ , где  $S$  – площадь участка, рассчитываемая в зависимости от типа зондирующего сигнала.

Для непрерывного сигнала облучаемый участок в пределах главного луча аппроксимируется четырехугольником с длиной  $AB$  и шириной  $EF \approx PC \cdot \theta = H_p \theta / \sin \psi$  (рис. 4).

Длина  $AB$  вычисляется через высоту полета ракеты  $H_p$  по формуле

$$AB = OB - OA = \frac{H_p}{\operatorname{tg}\left(\psi - \frac{\theta}{2}\right)} - \frac{H_p}{\operatorname{tg}\left(\psi + \frac{\theta}{2}\right)} = \frac{H_p \sin \theta}{0,5(\cos \theta - \cos 2\psi)}. \quad (10)$$

Ввиду малости ширины ДНА запишем  $\sin \theta \approx \theta$ ,  $\cos \theta \approx 1$ , тогда

$$AB \approx \frac{H_p \theta}{0,5(1 - \cos 2\psi)} = \frac{H_p \theta}{\sin^2 \psi}. \quad (11)$$

Площадь облучаемого участка в пределах главного луча приближенно равна

$$S_n \approx AB \cdot EF \approx \frac{H_p^2 \theta^2}{\sin^3 \psi}. \quad (12)$$

Рассчитаем для примера входное отношение сигнал/помеха для рассматриваемого случая при следующих условиях:  $H_p = 20$  км, высота цели  $H_{ц} = 5$  км,  $\theta = 10^{-1}$  рад,  $\psi = 30^\circ$ ,  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-2}$  (–17 дБ),  $\sigma_{ц} = 20$  м<sup>2</sup>.

При этих условиях  $R_{зп}/R_{ц} = H_p/(H_p - H_{ц}) = 4/3$ .

Поэтому отношение сигнал/помеха будет

$$\begin{aligned} \left(\frac{P_c}{P_n}\right)_{вх} &= \frac{\sigma_{ц} \sin^3 \psi}{H_p^2 \theta^2 \sigma_0} \left(\frac{R_{зп}}{R_{ц}}\right)^4 = \\ &= \frac{20 \cdot 0,5^3}{(2 \cdot 10^4)^2 \cdot (10^{-1})^2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(\frac{4}{3}\right)^4 \approx \\ &\approx 10^{-4} \text{ (–40 дБ)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для обнаружения сигнала на фоне помехи и собственного шума приемника на выходе системы обработки обычно требуется выходное отношение сигнал/(помеха + шум) не менее 15 дБ. Поэтому в этих условиях коэффициент улучшения отношения сигнал/помеха системой обработки входных сигналов должен быть не менее 55 дБ.

Оценим возможность получения такого коэффициента. В дополнение к исходным данным, используемым при вычислении отношения (13), примем, что цель имеет скорость  $V_{ц} = 200$  м/с, спектр сигнала цели  $W_{ц}(f)$  имеет

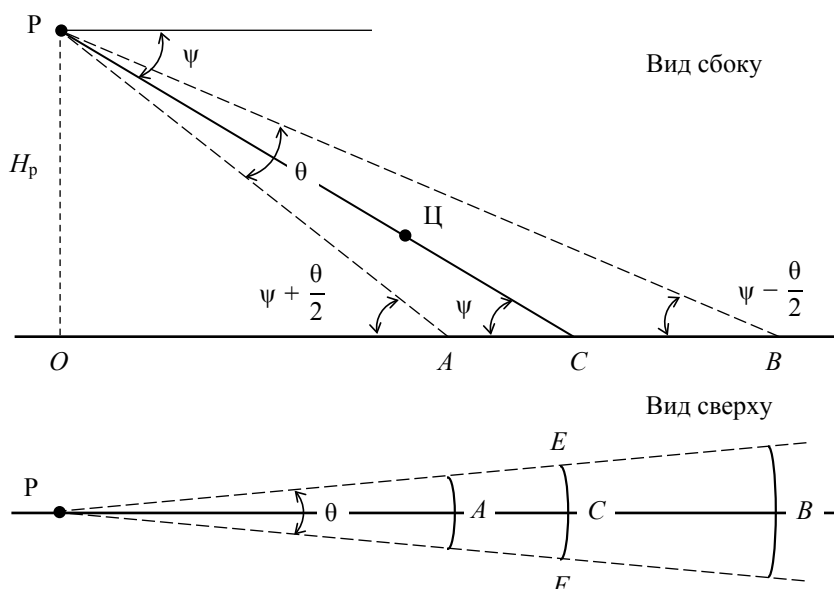


Рис. 4. Пояснения к расчету площади облучаемого участка при непрерывном сигнале



полосу  $\Delta f_{\text{ц}} = 10$  Гц, ДНА по мощности в суммарном канале как функция угла отклонения  $\beta$  при равномерном распределении поля в раскрыве задается формулой [3]

$$G(\beta) = \left( \frac{\sin\left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin\beta\right)}{\pi \frac{d}{\lambda} \sin\beta} \right)^2, \quad (14)$$

а углы  $\varphi$  и  $\gamma$  соответственно равны  $\varphi = 15^\circ$  и  $\gamma = 30^\circ$ . Из таблицы 1 следует:  $f_{\text{дп}} = 128,8$  кГц,  $\Delta f = 3,4$  кГц. По формуле (1) находим  $f_{\text{дц}} = 11,5 + f_{\text{дп}} = 11,5 + 128,8 = 140,3$  кГц.

Спектр помехи по форме совпадает с квадратом ДНА и задается формулой

$$W_{\text{п}}(f) = \left( \frac{\sin\left(\pi \frac{f}{\Delta f}\right)}{\pi \frac{f}{\Delta f}} \right)^4. \quad (15)$$

Ширина спектра помехи по нулевому уровню в главном луче равна  $2\Delta f = 6,8$  кГц, а ширина каждого бокового лепестка равна  $\Delta f = 3,4$  кГц. На рисунке 5 изображены спектры сигналов помехи и цели  $W_{\text{ц}}(f)$ . Спектр цели смещен по частоте относительно спектра помехи на 11,5 кГц, поэтому спектр цели попадает на третий правый боковой лепесток спектра помехи, который занимает область частот от  $f_{\text{дп}} + 3\Delta f = f_{\text{дп}} + 10,2$  кГц до  $f_{\text{дп}} + 4\Delta f = f_{\text{дп}} + 13,6$  кГц. Известно, что уровень третьего бокового лепестка ДНА  $G(\beta)$  равен  $-20,8$  дБ. Поскольку спектр помехи по форме равен квадрату ДНА, то уровень третьего бокового лепестка спектра помехи равен  $-41,6$  дБ.

Система обработки сигнала в виде гребенки узкополосных фильтров с полосой каждого 10 Гц выделит сигнал цели и ослабит сигнал помехи, во-первых, на  $10 \lg(\Delta f / \Delta f_{\text{ц}}) = 10 \lg(3400 / 10) = 25,3$  дБ, и, во-вторых, из-за разницы доплеровских частот сигналов помехи и цели уровень спектра помехи ослаблен на частоте цели не менее чем на 41,6 дБ. Поэтому система обработки улучшит отношение сигнал/помеха не менее чем на  $25,3 + 41,6 = 66,9$  дБ, что превышает требуемый коэффициент улучшения 55 дБ. Система узкополосных доплеровских фильтров в условиях рассматриваемого примера обеспечит выделение сигнала цели на фоне отражений от земной поверхности, поскольку спектр цели

по частоте лежит вне главного лепестка спектра помехового сигнала.

При использовании квазинепрерывного импульсного (КНИ) сигнала с периодом повторения импульсов  $T$  и разрешающей способностью по дальности  $\delta_R$  площадь облучаемого участка  $S_{\text{кн}}$  в пределах главного луча рассчитывается как сумма площадей полосок длины  $\delta_R / \cos \psi$  и ширины  $EF \approx H_p \theta / \sin \psi$  каждая, заполняющих отрезок  $AB$  с шагом  $cT / (2 \cos \psi)$  ( $c$  – скорость распространения радиоволн)

$$S_{\text{кн}} \approx \left( \frac{\delta_R}{\cos \psi} \right) \cdot EF \cdot \frac{AB}{cT / (2 \cos \psi)} = \frac{2\delta_R}{cT} S_{\text{н}}, \quad (16)$$

где  $S_{\text{н}}$  – площадь облучаемого участка для непрерывного сигнала (12).

Выберем в условиях предыдущего примера следующие значения входящих параметров:  $\delta_R = 150$  м,  $T = 3,33 \cdot 10^{-6}$  с (300 кГц),  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, тогда облучаемая площадь при квазинепрерывном сигнале изменится в

$$\frac{2\delta_R}{cT} = \frac{2 \cdot 150}{3 \cdot 10^8 \cdot 3,33 \cdot 10^{-6}} = 3,3 \cdot 10^{-1} \text{ раз} \quad (17)$$

по сравнению с непрерывным сигналом, а входное отношение сигнал/помеха будет

$$\left( \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{п}}} \right)_{\text{вх кн}} = \frac{1}{3,3 \cdot 10^{-1}} \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-4} (-35,2 \text{ дБ}). \quad (18)$$

В этом случае коэффициент улучшения отношения сигнал/помеха системой обработки должен быть не менее 50,2 дБ.

Таким образом, для квазинепрерывного сигнала несколько снижаются требования к системе обработки входных сигналов, и в случае, когда спектр цели расположен вне главного лепестка спектра помехи, обработка гребенкой узкополосных фильтров обеспечит выделение сигнала цели на фоне помехи от подстилающей поверхности.

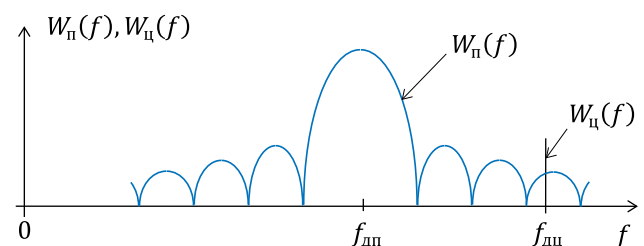


Рис. 5. Спектры сигналов помехи и цели

Для сигнала с однозначной дальностью и разрешающей способностью по дальности  $\delta_R$  следует рассматривать три случая.

Случай превышения дальности до цели  $R_{ц}$  высоты ракеты ( $R_{ц} > H_p$ ) приведен на рисунке 6.

Длина облучаемой площадки  $AB$  вычисляется по формуле

$$AB = OB - OA = \sqrt{\left(R_{ц} + \frac{\delta_R}{2}\right)^2 - H_p^2} - \sqrt{\left(R_{ц} - \frac{\delta_R}{2}\right)^2 - H_p^2} \approx R_{ц} \left( \sqrt{1 + \frac{\delta_R}{R_{ц}} - \left(\frac{H_p}{R_{ц}}\right)^2} - \sqrt{1 - \frac{\delta_R}{R_{ц}} - \left(\frac{H_p}{R_{ц}}\right)^2} \right) \approx \delta_R / \sqrt{1 - \left(\frac{H_p}{R_{ц}}\right)^2}. \quad (19)$$

Ширина облучаемого участка вычисляется, как и в случае непрерывного сигнала, по формуле  $EF \approx H_p \theta / \sin \psi$ .

Мощность сигнала помехи от участка следует рассчитывать с учетом квадрата коэффициента усиления антенны  $G^2(\beta)$  в его направлении, где угол  $\beta$  между максимумом ДНА, направленным на цель, и линией, направленной в центр облучаемого участка, вычисляется по формуле

$$\beta = 90^\circ - \psi - \arccos\left(\frac{H_p}{R_{ц}}\right). \quad (20)$$

В случае  $R_{ц} < H_p$  элемент разрешения, в котором находится цель, не содержит земной поверхности, и мощность помехового сигнала  $P_{п\text{ вх}} = 0$ .

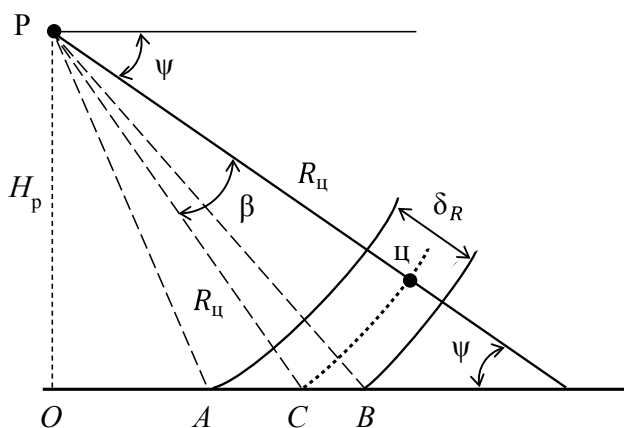


Рис. 6. Пояснения к расчету площади облучаемого участка при сигнале с однозначной дальностью

В случае  $R_{ц} = H_p$  работа АГСН происходит при наличии альтиметровых отражений под прямым углом от участка земной поверхности площадью  $S$ ,

$$S = \pi \left( \sqrt{(H_p + \delta_R/2)^2 - H_p^2} \right)^2 \approx \pi H_p \delta_R. \quad (21)$$

Мощность сигнала помехи от альтиметрового участка следует рассчитывать с учетом квадрата коэффициента усиления антенны  $G^2(\beta)$  в его направлении, где угол  $\beta = 90^\circ - \psi$ .

Рассчитаем входное отношение сигнал/помеха для наиболее типового случая  $R_{ц} > H_p$  в условиях рассматриваемого примера при  $H_p = 20$  км,  $R_{ц} = 30$  км,  $\delta_R = 150$  м,  $\theta = 10^{-1}$  рад,  $\psi = 30^\circ$ ,  $\varphi = 15^\circ$ ,  $\sigma_{ц} = 20$  м<sup>2</sup>.

Угол  $\beta = 90^\circ - 30^\circ - \arccos(20/30) = 11,8^\circ$  соответствует второму боковому лепестку ДНА, имеющему уровень  $-17,8$  дБ. Поэтому примем квадрат коэффициента усиления по боковым лепесткам  $G^2(\beta) = 3,2 \cdot 10^{-4}$  ( $-35$  дБ).

Для угла скольжения  $\angle PCO = 90^\circ - \psi - \beta = 90^\circ - 30^\circ - 11,8^\circ = 48,2^\circ$  (рис. 6), удельная ЭПР  $\sigma_0 = 3,2 \cdot 10^{-2}$  ( $-15$  дБ) (рис. 3).

Площадь облучаемого участка для сигнала с однозначной дальностью для этого случая равна

$$S_{од} = AB \cdot EF \approx \frac{\delta_R}{\sqrt{1 - (H_p/R_{ц})^2}} \cdot \frac{H_p \theta}{\sin \psi} = \frac{150 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 10^{-1}}{\sqrt{1 - (20/30)^2} \cdot 0,5} \approx 8 \cdot 10^5 \text{ м}^2. \quad (22)$$

Входное отношение сигнал/помеха будет

$$\left(\frac{P_c}{P_n}\right)_{\text{вх од}} = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{эп}} = \frac{\sigma_{ц}}{G^2(\beta) S_{од} \sigma_0} = \frac{20}{3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^5 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2}} = 2,44 \text{ } (-3,9 \text{ дБ}). \quad (23)$$

В этом случае коэффициент улучшения отношения сигнал/помеха системой обработки должен быть не менее 11,1 дБ. Такой коэффициент улучшения обеспечит система обработки в виде гребенки узкополосных фильтров даже в случае, когда спектр помехи главным лепестком накрывает спектр цели, поскольку фильтрация дает выигрыш  $10 \lg(\Delta f / \Delta f_{ц})$  в отношении сигнал/помеха, который в рассматриваемом примере составляет 25,3 дБ.





### Особенности обнаружения цели

Обнаружение цели на фоне земной поверхности при целеуказании по углам в зоне ДНА можно проводить сигналами с однозначной дальностью или квазинепрерывными сигналами с селекцией цели по доплеровской частоте.

При обнаружении цели сигналом с однозначной дальностью можно использовать короткие импульсы с большой скважностью для уменьшения облучаемой площади. В этом случае, однако, будет затруднено обнаружение цели, особенно с малой ЭПР, при ее полете на малых высотах, что требует дополнительного введения доплеровской фильтрации.

Для обнаружения сигнала по скорости обычно используют квазинепрерывные импульсные последовательности с высокой частотой повторения  $F_{\Pi}$ , превышающей значение, соответствующее возможной максимальной скорости сближения ракеты с целью. При этом при малых скоростях цели с малой ЭПР часто невозможно обнаружение полезного сигнала с частотой доплеровского сдвига  $f_{\text{дц}}$ , перекрываемой главным лепестком спектра помех, создаваемых отражениями от Земли (рис. 7).

Интересный подход к обнаружению цели, спектр которой накрыт полосой помехи от земной поверхности, при использовании моноимпульсной антенны, т.е. антенны как с суммарной, так и с разностной ДНА, изложен в работах [1, 4] по применению радиолокаторов с синтезированной апертурой.

Как показано на рисунке 7, цель и помеха имеют различные доплеровские сдвиги частоты, хотя они находятся на одной линии

визирования. При совмещении же доплеровских частот они будут в различных угловых направлениях, что и полагается в основу предлагаемого в работе метода.

Определим на основе выражений (1) и (2) необходимую величину отклонения максимума ДНА от направления на цель  $\Delta\varphi$ , при котором  $f_{\text{дп}}$  совпадет с  $f_{\text{дц}}$ ,

$$\frac{2V_p \cos(\varphi - \Delta\varphi)}{\lambda} = \frac{2(V_p \cos \varphi + V_c \cos \gamma)}{\lambda}. \quad (24)$$

Воспользовавшись соотношением  $f(x_0 - \Delta x) \approx f(x_0) - f'(x_0)\Delta x$ , представим  $\cos(\varphi - \Delta\varphi)$  в виде

$$\begin{aligned} \cos(\varphi - \Delta\varphi) &\approx \cos \varphi - \Delta\varphi (-\sin \varphi) = \\ &= \cos \varphi + \Delta\varphi (\sin \varphi) \end{aligned} \quad (25)$$

после подстановки которого в (24) получим

$$V_p \cos \varphi + \Delta\varphi V_p \sin \varphi \approx V_p \cos \varphi + V_c \cos \gamma. \quad (26)$$

Из (26) определяется значение необходимого углового отклонения  $\Delta\varphi$ , рад

$$\Delta\varphi \approx \frac{V_c \cos \gamma}{V_p \sin \varphi}. \quad (27)$$

Значение  $\Delta\varphi$  может быть вычислено на борту ракеты с использованием данных инерциальной системы и передаваемых по каналу радиокоррекции координат и составляющих скорости цели.

При реализации отклонения ДНА на требуемую величину  $\Delta\varphi$  спектр помехового сигнала в разностном канале с доплеровским сдвигом  $f_{\text{дп}}$ , находящегося в одном фильтре с  $f_{\text{дц}}$ , будет повторять форму квадрата разностной ДНА по мощности, имея нулевую

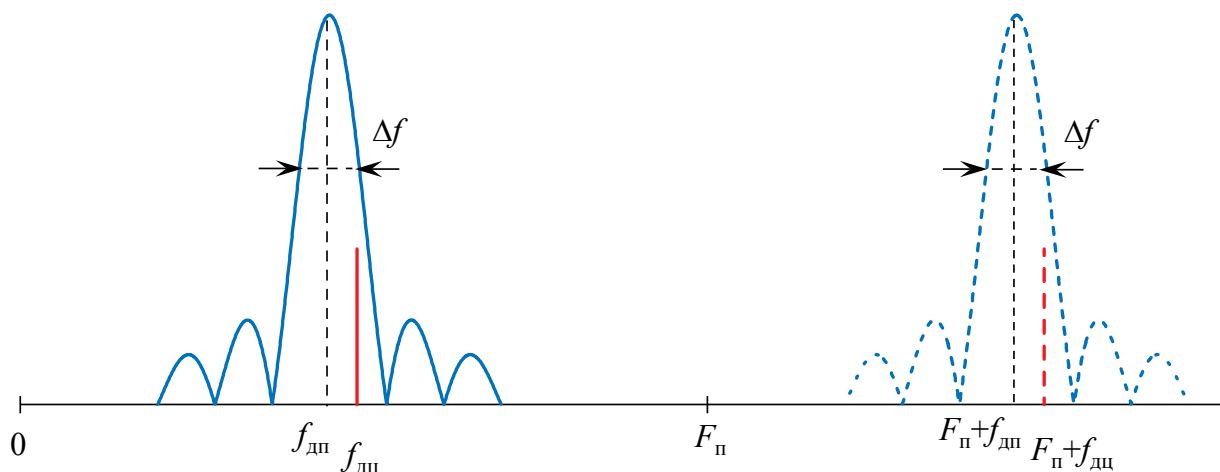


Рис. 7. Спектры сигналов от цели и помех в суммарном канале

интенсивность на частоте  $f_{\text{дп}}$ , а интенсивность полезного сигнала будет соответствовать разностной ДНА в направлении на цель, смещенном относительно нуля на угол  $\Delta\varphi$ .

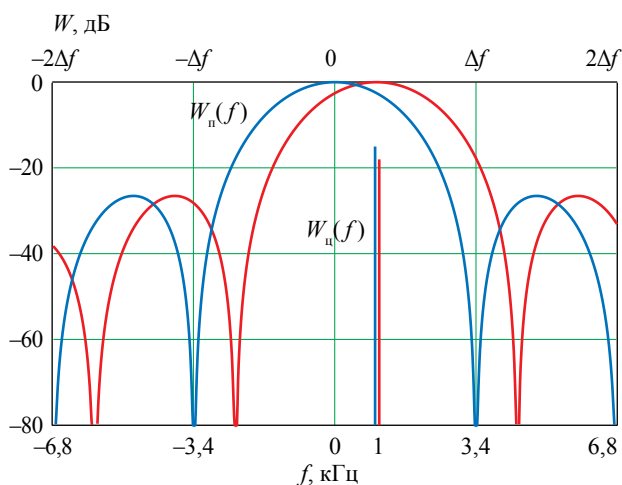
Указанное смещение, однако, не должно превышать половины ширины ДНА, что существенно ограничивает возможности применения этого метода. В соответствии с формулой (27) требуемое условие  $\Delta\varphi < \theta/2$  выполнимо для малоскоростных целей при достаточно большом значении угла  $\varphi$ , что может быть обеспечено на начало поиска целей при формировании соответствующих траекторий полета ракеты.

Оценим возможность метода, применяющего моноимпульсную антенну, для обнаружения цели в наиболее сложном случае, когда используется непрерывный сигнал и спектр сигнала цели накрыт главным лепестком спектра помехи от подстилающей поверхности.

Пусть характеристики помехи, ДНА суммарного канала и значение полосы спектра сигнала цели такие же, как в примере с расчетом коэффициента улучшения для непрерывного сигнала.

Отметим, что для разностного канала при равномерном распределении поля в апертуре антенны нормированная ДНА по мощности имеет вид

$$G_{\Delta}(\beta) = \left( \frac{1,38 \cdot \sin^2 \left( \pi \frac{d}{2\lambda} \sin \beta \right)}{\pi \frac{d}{2\lambda} \sin \beta} \right)^2. \quad (28)$$



**Рис. 8.** Спектры сигналов цели и помехи в суммарном канале в случае: когда максимум ДНА направлен на цель (—) и когда он смещен на угол  $\Delta\varphi$  (—)

Спектр помехи в разностном канале по форме совпадает с квадратом ДНА разностного канала и задается формулой

$$W_{\text{пд}}(f) = \left( \frac{1,38 \cdot \sin^2 \left( \pi \frac{f}{2\Delta f} \right)}{\pi \frac{f}{2\Delta f}} \right)^4. \quad (29)$$

При рассмотрении накрытия спектра цели спектром помехи предположим, что смещение по доплеровской частоте спектра сигнала цели относительно максимума спектра помехи равно 1 кГц. Тогда в соответствии с формулой (1) и данными таблицы 1 для  $\varphi = 15^\circ$  получаем

$$f_{\text{дц}} = \frac{2V_{\text{ц}} \cos \gamma}{\lambda} + \frac{2V_{\text{р}} \cos \varphi}{\lambda} = 1 + f_{\text{дп}} = 1 + 128,8 = 129,8 \text{ кГц.}$$

На рисунке 8 синим цветом изображены спектры сигналов цели и помехи в суммарном канале, выраженные в децибелах, для случая, когда максимум ДНА направлен на цель. На этом и последующих рисунках для удобства ось частот сдвинута на величину  $f_{\text{дп}} = 128,8$  кГц так, чтобы в новых координатах этой частоте соответствовала нулевая частота.

Определим поправку  $\Delta\varphi$ , при которой обеспечивается сдвиг спектра помехи на 1 кГц путем смещения углового положения максимума ДНА суммарного канала и, соответственно, нуля ДНА разностного канала, на основе формулы (27)

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &\approx \frac{V_{\text{ц}} \cos \gamma}{V_{\text{р}} \sin \varphi} = \frac{2V_{\text{ц}} \cos \gamma / \lambda}{2V_{\text{р}} \sin \varphi / \lambda} = \\ &= \frac{1000 [\text{Гц}]}{2 \cdot 2000 \left[ \frac{\text{М}}{\text{с}} \right] \cdot \sin 15^\circ / (3 \cdot 10^{-2} [\text{м}])} = (30) \\ &= 2,9 \cdot 10^{-2} \text{ рад } (1,66^\circ). \end{aligned}$$

При таком угловом смещении ДНА ( $\Delta\varphi = 1,66^\circ$ ) цель будет находиться уже не в максимуме ДНА суммарного канала и мощность сигнала от цели уменьшится на величину

$$\begin{aligned} 10 \lg G^2(\Delta\varphi) &= 10 \lg \left( \frac{\sin \left( \pi \frac{d}{\lambda} \sin \Delta\varphi \right)}{\pi \frac{d}{\lambda} \sin \Delta\varphi} \right)^4 = \\ &= 40 \lg \frac{\sin \left( \pi \frac{30}{3} \sin 1,66^\circ \right)}{\pi \frac{30}{3} \sin 1,66^\circ} = -2,47 \text{ дБ.} \end{aligned}$$



При этом спектр помехового сигнала сдвинется по частоте и его максимум будет на доплеровской частоте сигнала цели – график на рисунке 8, изображенный красным цветом.

На рисунке 9 изображены спектры сигналов цели и помехи в разностном канале для случая, когда нуль разностной ДНА смещен относительно направления на цель на угол  $\Delta\varphi$ .

Как видно из рисунка 9, спектр помехи в разностном канале обращается в нуль на доплеровской частоте цели. При рассмотрении прохождения помехи через узкополосный фильтр с полосой  $\Delta f_\phi = 10$  Гц, настроенный на частоту цели, отметим, что максимальное значение спектра помехи в разностном канале будет на краях фильтра

$$W_{\text{н}\Delta}\left(\frac{\Delta f_\phi}{2}\right) = \left(\frac{1,38 \cdot \sin^2\left(\pi \frac{\Delta f_\phi}{4\Delta f}\right)}{\pi \frac{\Delta f_\phi}{4\Delta f}}\right)^4 = \left(\frac{1,38 \cdot \sin^2\left(\pi \frac{10}{4 \cdot 3400}\right)}{\pi \frac{10}{4 \cdot 3400}}\right)^4 = 1,03 \cdot 10^{-10}, (-99,9 \text{ дБ}). \quad (31)$$

Уровень сигнала цели в разностном канале будет ослаблен на величину

$$10\lg G_{\Delta}^2(\Delta\varphi) = 10\lg\left(\frac{1,38 \cdot \sin^2\left(\pi \frac{d}{2\lambda} \sin\Delta\varphi\right)}{\pi \frac{d}{2\lambda} \sin\Delta\varphi}\right)^4 = 40\lg\left(\frac{1,38 \cdot \sin^2\left(\pi \frac{30}{6} \sin 1,66^\circ\right)}{\pi \frac{30}{6} \sin 1,66^\circ}\right) = -9,3 \text{ дБ}.$$

Поскольку ширина ДНА в разностном канале приблизительно в два раза больше, чем в суммарном, то входная мощность помехи в разностном канале будет на 3 дБ больше и полоса помехи в разностном канале будет в два раза больше и составит  $2\Delta f = 6,8$  кГц. С учетом ослабления сигнала цели в разностном канале на 9,3 дБ отношение сигнал/помеха, рассчитанное по формуле (13) для суммарного канала в случае непрерывного сигнала, уменьшится в разностном канале на  $3 + 9,3 = 12,3$  дБ. Входное отношение сигнал/помеха в разностном канале составит  $-40 - 12,3 = -52,3$  дБ, и требуемый коэффициент улучшения

отношения сигнал/помеха должен быть не менее  $52,3 + 15 = 67,3$  дБ.

Обработка гребенкой узкополосных фильтров улучшит отношение сигнал/помеха на

$$10\lg\left(\frac{2\Delta f}{\Delta f_{\text{ц}}}\right) = 10\lg\left(\frac{6800}{10}\right) = 28,3 \text{ дБ},$$

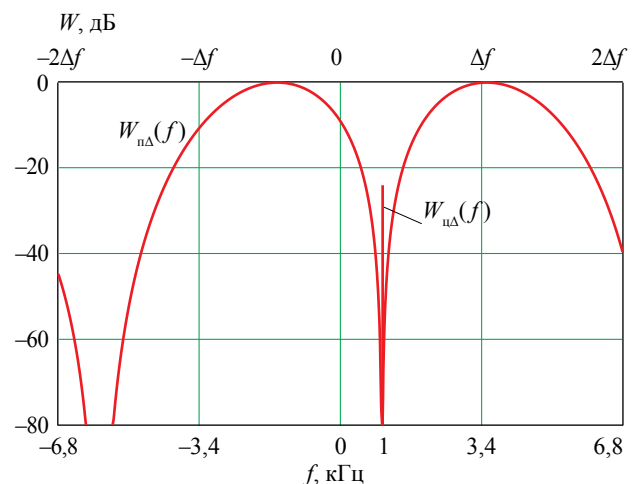
и с учетом формы спектра помехи в разностном канале на частоте цели с уровнем  $-99,9$  дБ коэффициент улучшения теоретически составит  $28,3 + 99,9 = 128,2$  дБ, что значительно превышает требуемый коэффициент для крупноразмерной цели.

Таким образом, за счет более сильного подавления помехового сигнала по сравнению с ослаблением полезного сигнала система обработки в виде гребенки узкополосных фильтров в разностном канале со смещением ДНА на  $\Delta\varphi$  позволяет обеспечить обнаружение сигнала цели на фоне подстилающей поверхности и при накрытии в суммарном канале спектра цели спектром помехи.

## Заключение

Проведена оценка спектра помехового сигнала от земной поверхности.

Рассмотрено влияние помеховых сигналов от земной поверхности на отношение сигнал/помеха для непрерывных и квазипрерывных сигналов, а также сигналов с односторонней дальностью.



**Рис. 9.** Спектры сигналов цели и помехи в разностном канале, когда нуль разностной ДНА смещен от направления на цель на угол  $\Delta\varphi$



Показана целесообразность рассмотрения для АГСН режима работы со смещением направления ее антенны для обнаружения цели с использованием разностной ДНА.

Дано определение величины необходимого углового отклонения моноимпульсной антенны для обеспечения работы АГСН в условиях накрытия принимаемого полезного сигнала спектром помехи от Земли.

Показано, что для типовых характеристик крупноразмерной цели и помех от земной поверхности в случае сигнала с однозначной дальностью возможно обнаружение цели приемником АГСН в суммарном канале с системой узкополосных доплеровских фильтров. Для непрерывных и квазинепрерывных сигналов обнаружение цели возможно в суммарном канале в случае, когда спектр цели лежит вне главного лепестка спектра помехи.

В случае, когда спектр цели по частоте лежит внутри главного лепестка спектра помехи, обнаружение цели также возможно, но с использованием смещения разностной ДНА.

### Список литературы

1. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
2. Cherwek R. A. Coherent active seeker guidance concepts for tactical missiles // IEEE Eascon'78 Record. 1978. No 25 –27. Sept. P. 199 –202.
3. Справочник по радиолокации. Т. 2. Радиолокационные антенные устройства. Под ред. М. Сколника. М.: Советское радио, 1977. 408 с.
4. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. Под ред. В. Т. Горянова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.

---

### Об авторах

**Горбачев Михаил Алексеевич** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела Научно-технический центр «Научно-исследовательский электромеханический институт» публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: система управления, самонаведение.

**Свистов Владимир Викторович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела Научно-технический центр «Научно-исследовательский электромеханический институт» публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: радиолокация, обработка сигналов.

**Ульянова Екатерина Александровна** – ведущий инженер Научно-технический центр «Научно-исследовательский электромеханический институт» публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: система управления, моделирование и программирование.





## The specifics of functioning of the active homing head exposed to ground surface clutter

Gorbachev M. A., Svistov V. V., Ulyanova E. A.

*NTTs NIEMI, PJSC ALMAZ R&P Corp., Moscow, Russian Federation*

Based on the determined ground surface clutter spectrum, we analyse the specific features of functioning of the active homing head (AHH) in relation to different types of radiated signals. With respect to AHH functioning, the paper gives recommendations for use of target data acquired against the Earth's background by monopulse synthetic aperture radars.

**Keywords:** interference signal spectrum, Doppler shift, antenna radiation pattern, specific radar cross-section, active homing head

---

### Information about the authors

**Gorbachev Mikhail Alekseyevich** – Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of Department, NTTs NIEMI, PJSC ALMAZ R&P Corp., Moscow, Russian Federation.

Science research interests: control system, homing.

**Svistov Vladimir Viktorovich** – Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of Department, NTTs NIEMI, PJSC ALMAZ R&P Corp., Moscow, Russian Federation.

Science research interests: radiolocation, signal processing.

**Ulyanova Ekaterina Aleksandrovna** – Lead Engineer, NTTs NIEMI, PJSC ALMAZ R&P Corp., Moscow, Russian Federation.

Science research interests: control system, modelling and programming.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-36-46>  
УДК 621.396.962.25

## Радиолокационные датчики высоты трехмиллиметрового диапазона длин волн

М. А. Аникушин, В. В. Власов, А. В. Трифонов

Публичное акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Импульс»,  
Москва, Российская Федерация

Рассмотрены особенности проектирования радиолокационных датчиков высоты трехмиллиметрового диапазона длин волн на основе отечественных сверхвысокочастотных модулей М55323, М55328. Приведены отдельные результаты натурных испытаний.

**Ключевые слова:** частотная модуляция, энергетический потенциал, дальность действия, подстилающая поверхность

**Для цитирования:** Аникушин М. А., Власов В. В., Трифонов А. В. Радиолокационные датчики высоты трехмиллиметрового диапазона длин волн // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 4. С. 36–46. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-36-46>

**For citation:** Anikushin M. A., Vlasov V. V., Trifonov A. V. 3-mm wavelength range radar altitude sensors // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 4. P. 36–46. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-36-46>

Поступила 20.08.2021 Отрецензирована 24.09.2021 Одобрена 13.10.2021 Опубликована 27.12.2021

### Введение

В оборонной промышленности широко используются датчики высоты (ДВ), задачей которых является выдача сигнала на какое-либо исполнительное устройство на определенной высоте.

В настоящее время в качестве ДВ на высотах порядка единиц и десятков метров часто используются лазерные устройства, поскольку они достаточно просты, обладают высокой помехозащищенностью по отношению к искусственным и активным помехам и могут работать при больших скоростях движения ДВ. В то же время им присущ ряд недостатков, которые перечислены ниже.

1. При изготовлении лазерных ДВ требуется прецизионная настройка и регулировка оптической системы, что снижает технологичность и повышает цену изделия.

2. Лазерные ДВ не работают по водной поверхности.

3. Лазерные ДВ не всепогодны. Наиболее опасными для лазерных ДВ являются пассивные естественные помехи: облака, туманы, дождь, снег, дым, пыль, солнечная засветка. При работе в этих условиях имеется определенная вероятность получения отказов за счет затухания сигнала, а также ложных срабатываний.

В связи с этим встает вопрос о разработке альтернативного ДВ, лишенного указанных недостатков. В качестве такового может рассматриваться радиолокационный ДВ трехмиллиметрового диапазона длин волн.

Для измерения расстояния до подстилающей поверхности (ПП) на сравнительно небольших высотах служат системы ближней радиолокации (СБРЛ) с непрерывным излучением частотно-модулированного (ЧМ) сигнала, которые по сравнению с СБРЛ, где используется импульсное излучение сигнала, имеют ряд преимуществ.

© Аникушин М. А., Власов В. В., Трифонов А. В., 2021



Разрешающая способность по дальности СБРЛ с импульсным излучением сигнала тем выше, чем меньше длительность зондирующего импульса. Работа с очень малым по длительности излучаемым импульсом достаточной мощности требует тщательной конструктивной проработки изделия и связана с большими трудностями в части минимизации влияния паразитных элементов конструкции. При этом СБРЛ становится крайне сложной в настройке и дорогой.

ЧМ СБРЛ могут обеспечить очень высокую точность измерения весьма малых расстояний до ПП, используя определенный математический алгоритм вычислений без существенных аппаратных затрат.

Целью настоящей работы является оценка и анализ возможных способов реализации ДВ на основе малогабаритных приемо-передающих сверхвысокочастотных (СВЧ) модулей М55323 и М55328 гомодинного типа.

Ниже в таблице приведены основные технические параметры рассматриваемых модулей.

В этих модулях применяется непрерывное ЧМ излучение, а гетеродинным сигналом является часть излучаемого сигнала. Использование одной приемо-передающей антенны значительно упрощает построение схемы обработки принятого сигнала и в целом повышает надежность ДВ.

В миллиметровом диапазоне длин волн на выходе смесителя приемного тракта ДВ с ЧМ присутствуют гармоники паразитной амплитудной модуляции (ПАМ), амплитуда которых превышает амплитуду гармоник спектра полезного сигнала на 60–70 дБ. Данное

обстоятельство, а также высокие значения частоты Доплера при возможных больших скоростях ДВ накладывают ограничения в выборе способов обработки принимаемого сигнала. В результате всесторонней проработки возможных вариантов построения ДВ с учетом указанных выше особенностей наиболее подходящими для решения поставленной задачи оказались, по нашему мнению, всего два способа обработки принимаемого сигнала. При этом основным критерием при переборе различных вариантов являлись простота и надежность реализуемого ДВ.

### Основная часть

Зависимость амплитуд гармоник спектра преобразованного сигнала на выходе СВЧ-модуля от высоты определяется законом модуляции излучаемого сигнала и уровнем отраженного сигнала. Наиболее ярко эта зависимость проявляется в случае модуляции по закону несимметричной пилообразной функции. В первом способе обработки сигнала, который называется спектральным, как раз используется такая модуляция. Ниже приводится его описание.

Как известно, спектр принятого и преобразованного сигнала состоит из множества гармоник, кратных частоте модуляции. При движении ДВ спектр преобразованного сигнала как бы «рассыпается»: вместо одной гармоники появляется пара гармоник, каждая из которых на оси частот отстоит на величину частоты Доплера вправо и влево от  $k$ -той гармоники спектра неподвижного ДВ. В случае симметричной модулирующей функции амплитуды каждой из пар гармоник одинаковы.

Таблица

Основные технические параметры СВЧ-модулей

| Тип модуля                                        | М55323           | М55328                                                       |
|---------------------------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------|
| Рабочая частота, ГГц                              | $94,00 \pm 0,75$ | В соответствии с заданием на изделие специального применения |
| Диапазон перестройки частоты генератора, МГц      | $>80$            | $>300$                                                       |
| Крутизна электрической перестройки частоты, МГц/В | $20 \pm 5$       | 40–100                                                       |
| Выходная мощность, мВт                            | $>1$             | 3–10                                                         |
| Диапазон выходных частот, МГц                     | 0,05–1           | 0,1–30                                                       |
| Энергетический потенциал, дБ                      | $>94$            | $>135$                                                       |
| Питание, В                                        | $5,0 \pm 0,1$    | $6,0 \pm 0,5$                                                |
| Ток потребления, А                                | $<0,8$           | $<0,75$                                                      |



В случае же модуляции по закону несимметричной пилообразной функции амплитуды гармоник в каждой паре существенно разнятся. При этом, если «пила» имеет отрицательный наклон, гармоника с большей амплитудой находится на оси частот правее относительно гармоники с меньшей амплитудой, а если «пила» имеет положительный наклон, то все наоборот.

Из  $k$ -той и  $(k+1)$ -той пар составляющих спектра преобразованного сигнала с помощью полосовых фильтров (ПФ) выделяются гармоники с большой амплитудой. Сигналы с выходов фильтров детектируются амплитудными детекторами и подаются на схему вычитания. В итоге формируется дискриминационная характеристика.

В работе [1] приводится вид этой характеристики. Нулю дискриминационной характеристики соответствует высота, равная  $c(k+0,5)/2F_d$ , где  $c$  – скорость света,  $F_d$  – полный размах девиации частоты. На высотах, превышающих это значение, уровень выходного сигнала будет лежать в области отрицательных значений, не поднимаясь выше нуля.

Крутизна дискриминационной характеристики в зависимости от высоты определяется следующим выражением [1]:

$$S = 1,27(2k+1)/H,$$

где  $S$  – крутизна, нормированная относительно максимальной амплитуды  $k$ -той гармоники;  $k$  – номер гармоники;  $H$  – высота.

При  $k=3$  получаем  $S=8,9/H$ , что обеспечивает хорошую точность по высоте срабатывания.

Выделение полезного сигнала на фоне очень большого сигнала ПАМ может потребовать использования дополнительных мер. В частности, применение синхронного режекторного фильтра позволяет относительно просто эффективно подавить мешающие гармоники ПАМ [1]. Более качественно отфильтровать полезный сигнал можно, если после ПФ использовать смесители, гетеродинными сигналами которых являются соответственно  $k$ -тая и  $(k+1)$ -тая гармоники модулирующей функции.

Рассматриваемый способ выделения полезного сигнала на фоне сигнала ПАМ использует частотный сдвиг полезного сигнала за счет эффекта Доплера. Главным недостатком описанного способа обработки сигнала является условие относительного постоянства скорости движения ДВ. Если скорость движения ДВ варьируется в широких пределах, требуются широкополосные полосовые фильтры с большой степенью прямоугольности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), т.е. фильтры высокого порядка. Кроме того, необходима автоматическая регулировка усиления или амплитудный ограничитель, потому что динамический диапазон отраженного сигнала может составлять 50 дБ и более. Нелинейность модуляционной характеристики генератора СВЧ-модуля не должна превышать единиц процентов.

Большим преимуществом данного способа обработки сигнала является то, что в районе высоты срабатывания примерно до 90 % энергии преобразованного сигнала сосредоточено в одной единственной  $k$ -той гармонике с большой амплитудой [1]. Данное обстоятельство и относительно узкая полоса пропускания приемного тракта способствуют существенно повышению энергетического потенциала ДВ с описанным способом обработки сигнала.

Частота Доплера определяется по следующей формуле:

$$F_{\text{доп}} = \frac{2 \cdot V}{\lambda}, \quad (1)$$

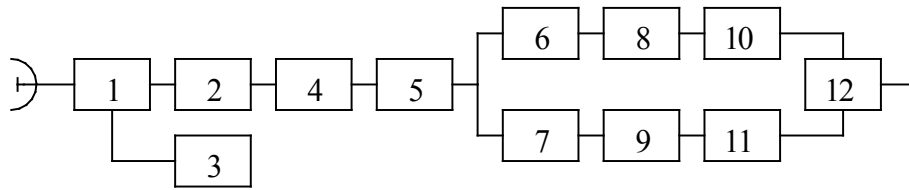
где  $F_{\text{доп}}$  – частота Доплера;  
 $V$  – скорость движения ДВ в направлении излучения зондирующего сигнала;  
 $\lambda$  – длина волны зондирующего сигнала.

Анализ технических возможностей модулей в соответствии с их частотными параметрами и с учетом (1) приводит к следующим выводам относительно использования рассмотренного способа обработки сигнала.

Модуль М55323 позволяет реализовать ДВ с дозвуковой скоростью подхода к ПП, а модуль М55328 позволяет реализовать ДВ на скоростях подхода к ПП до 900 м/с и более.

Для реализации описанного способа обработки двух гармоник преобразованного





**Рис. 1.** Упрощенная структурная схема ДВ: 1 – СВЧ-модуль M55328; 2 – фильтр верхних частот (ФВЧ); 3 – модулятор; 4 – усилитель; 5 – амплитудный ограничитель; 6 – ПФ основного канала; 7 – ПФ помехового канала; 8 – усилитель основного канала; 9 – усилитель помехового канала; 10 – амплитудный детектор основного канала; 11 – амплитудный детектор помехового канала; 12 – схема вычитания

сигнала необходимо обязательное условие движения ДВ к ПП с достаточно большой скоростью. Иначе маломощные гармоники полезного сигнала будут находиться совсем рядом с мощными гармониками сигнала ПАМ и задача селекции гармоник полезного сигнала будет крайне затруднена.

Второй способ обработки сигнала можно назвать интегральным. Здесь также формируется дискриминационная характеристика, но только в полосе пропускания ПФ попадает не одна гармоника сигнала, а несколько. При таком способе обработки сигнала условие движения ДВ не является обязательным. На рисунке 1 представлена упрощенная структурная схема ДВ, реализующего интегральный способ обработки сигнала.

Схема работает следующим образом.

Модуляция несущей частоты СВЧ-модуля осуществляется по синусоидальному закону, т. к. при этом количество гармоник сигнала ПАМ невелико, а уровень высших гармоник весьма мал. На выходе СВЧ-модуля после смешивания гетеродинного и отраженного от ПП сигнала получается преобразованный сигнал, частота которого изменяется во времени по закону модуля синуса, а амплитуда этой частоты имеет следующую зависимость [1]:

$$f_{\text{бм}} = \frac{2\pi \cdot F_{\text{д}} \cdot F_{\text{М}} \cdot H}{c}, \quad (2)$$

где  $f_{\text{бм}}$  – амплитуда частоты преобразованного сигнала;

$F_{\text{М}}$  – частота модуляции.

Преобразованный сигнал с выхода смесителя СВЧ-модуля проходит через ФВЧ, подавляющий гармоники сигнала ПАМ. Далее сигнал усиливается, ограничивается по амплитуде и одновременно поступает на ПФ основного

и помехового каналов соответственно. АЧХ ПФ частично перекрываются, причем ПФ помехового канала является более высокочастотным по сравнению с ПФ основного канала. После прохождения ПФ сигнал приобретает еще и амплитудную модуляцию, что позволяет его детектировать. По мере приближения ДВ к ПП ширина спектра преобразованного сигнала уменьшается пропорционально высоте. На высотах, превышающих заданную высоту срабатывания, сигнал присутствует в ПФ обоих каналов. По мере приближения ДВ к заданной высоте срабатывания на выходе ПФ помехового канала число спектральных гармоник сигнала становится все меньше и уровень их уменьшается. При этом уменьшается и амплитуда сигнала на выходе ПФ помехового канала. После прохождения ПФ сигналы усиливаются, детектируются и поступают на схему вычитания. Разность сигналов основного и помехового каналов представляет собой зависимость выходного напряжения от высоты.

Эта зависимость получила название функции селекции. По достижении выходным напряжением определенного положительного уровня происходит срабатывание порогового устройства. Опытным путем установлено, что функция селекции получается достаточно гладкой и крутой, если полоса пропускания ПФ превышает частоту модуляции  $F_{\text{М}}$  в 5–10 раз. При этом крутизна функции селекции, нормированная относительно максимума выходного напряжения, равна примерно  $9/H$ . Высоту срабатывания можно определить из (2) при условии, когда величина  $f_{\text{бм}}$  будет равна верхней частоте среза ПФ основного канала:

$$H_0 = \frac{f_{\text{б}} \cdot c}{2\pi \cdot F_{\text{д}} \cdot F_{\text{М}}}, \quad (3)$$



где  $H_0$  – высота срабатывания;  
 $f_v$  – верхняя частота среза ПФ основного канала.

За счет эффекта Доплера амплитуда частоты сигнала на выходе СВЧ-модуля в соседних полупериодах частоты модуляции будет отличаться на величину  $2F_{\text{доп}}$  [1, стр. 58]. Поэтому величина  $f_v$  должна быть много больше диапазона доплеровских частот для минимизации динамической ошибки определения высоты срабатывания.

Нетрудно видеть, что как в спектральном, так и в интегральном способе обработки сигнала высота срабатывания обратно пропорциональна величине полного размаха девиации частоты  $F_d$ . Эта зависимость позволяет весьма просто изменять высоту срабатывания путем изменения амплитуды модулирующего напряжения.

Чтобы реализовать какой-либо из рассмотренных способов обработки сигнала, в первую очередь нужно уверенно выделить сигнал на фоне шумов. Это обеспечивается при отношении сигнал/шум на выходе СВЧ-модуля примерно 20 дБ. Величина энергетического потенциала в некоторой полосе частот при определенном отношении сигнал/шум приводится в технической документации на СВЧ-модуль. После пересчета на требуемую полосу пропускания приемного тракта ДВ полученное значение потенциала необходимо приравнять к потенциалу, полученному из основной формулы радиолокации. И после несложных преобразований можно получить расчетную формулу для максимально достижимой высоты срабатывания ДВ:

$$H_{\text{MAX}} \approx \alpha \sqrt{G \cdot \sigma_{\text{уд}}} \cdot \cos \vartheta, \quad (4)$$

где  $H_{\text{MAX}}$  – максимально достижимая высота срабатывания ДВ;

$\alpha$  – числовой коэффициент, зависящий от значения энергетического потенциала ДВ и длины волны излучаемого сигнала;

$G$  – коэффициент усиления антенны;

$\sigma_{\text{уд}}$  – удельная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) ПП, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;

$\vartheta$  – угол подхода ДВ к ПП (угол зондирования относительно вертикали или зенитный угол).

Величина  $\alpha$  определяется из следующего соотношения:  $\alpha = 2,5 \cdot 10^{\frac{\Pi}{20}-4}$ , где  $\Pi$  – энергетический потенциал ДВ в децибелах.

В случае использования СВЧ-модуля М55328  $\Pi = \Pi_M - 10 - 20 \lg \sqrt{\frac{\Delta F}{1 \cdot 10^3}}$ , где  $\Pi_M$  – паспортное значение потенциала модуля,  $\Delta F$  – полоса пропускания приемного тракта ДВ до амплитудного детектора в герцах.

С целью проверки предложенной расчетной методики был изготовлен и опробован опытный образец ДВ с интегральным способом обработки сигнала на основе модуля М55328. Предполагаемая скорость движения ДВ 900 м/с. В качестве антенны использовалась рупорная коническая антенна АРК-03 производства фирмы «Элмика» с коэффициентом усиления 21 дБ. Ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) составляла порядка 13°.

При скорости движения ДВ 900 м/с частота Доплера согласно (1) составляет 600 кГц. Исходя из этого верхняя частота среза и полоса пропускания ПФ основного канала были выбраны соответственно 6 и 1,8 МГц. Так как полоса пропускания ПФ должна превышать частоту модуляции не менее чем в 5 раз, величина  $F_M$  была выбрана равной 270 кГц. Максимальное значение величины  $F_d$  у использованного СВЧ-модуля составляло 380 МГц, а энергетический потенциал  $\Pi_M = 130$  дБ. Подставляя найденные величины  $F_d$ ,  $F_M$  в (3), получаем минимальное значение высоты срабатывания  $H_{\text{MIN}} = 2,8$  м. Рассчитанные по вышеприведенным формулам энергетический потенциал ДВ и коэффициент  $\alpha$  составили соответственно 87,5 дБ и 6. После подстановки найденной величины  $\alpha = 6$  и величины  $G = 126$  в (4) было получено следующее соотношение:

$$H_{\text{MAX}} \approx 67,3 \sqrt{\sigma_{\text{уд}}} \cdot \cos \vartheta. \quad (5)$$

В [2] содержатся усредненные данные по отражательным характеристикам различных ПП при разных углах зондирования от вертикали для длины волны  $\lambda = 3,2$  мм. Анализ совокупности данных, приводимых



в [2], применительно к полученному соотношению (5) позволяет сделать следующие выводы.

Для выбранных СВЧ-модуля и антенны максимальная высота срабатывания в пределах угла  $\vartheta = \pm 30^\circ$  не превышает 20 метров по таким подстилающим поверхностям, как открытый грунт, пашня, гравий, трава, болото, снег. По водной поверхности, сухому асфальту и бетону для высоты срабатывания  $H_0 = 20$  м угол  $\vartheta$  должен находиться в пределах  $\pm 15^\circ$ . Для обеспечения высоты срабатывания  $H_0 = 30$  м по любой подстилающей поверхности при  $\vartheta = \pm 30^\circ$  величина  $G$  должна составлять не менее 40 дБ.

После изготовления опытного образца ДВ была проведена серия натурных испытаний с целью подтверждения его функционирования в соответствии с задаваемыми характеристиками. На рисунке 2 показан внешний вид приемо-передающего блока опытного образца ДВ.

Приемный тракт ДВ выполнен целиком на отечественной элементной базе с использованием радиоэлементов для поверхностного и навесного монтажа. Радиоэлементы распаяны на печатной плате в виде кольца с внешним диаметром 80 мм и внутренним диаметром 25 мм. Антенна и СВЧ-модуль расположены по центру основания ДВ.

Во время натурных испытаний ДВ подвешивался на беспилотный летательный аппарат (окоптер). После взлета со стартовой площадки окоптер с ДВ перемещался в зону исследуемой ПП. После чего осуществлялся вертикальный подъем на высоту, значительно превышающую заданную высоту срабатывания. Затем происходил почти равномерный спуск со скоростью 0,2–0,3 м/с по той же траектории. Выходное напряжение ДВ при помощи модуля ZETLAB оцифровывалось с частотой 100 кГц, и по каналу связи Wi-Fi в режиме реального времени происходила передача цифровой информации и ее запись для последующей обработки.

Система подвеса обеспечивала жесткую фиксацию ДВ в одном из двух положений: направление главного лепестка ДНА по нормали к ПП и под углом в  $30^\circ$  к нормали к ПП. Смена высоты срабатывания осуществлялась за счет изменения величины девиации частоты

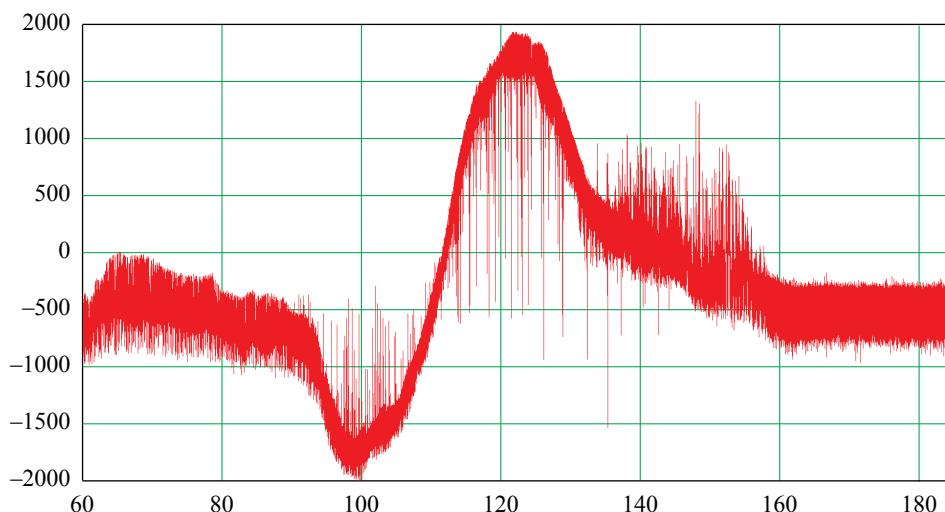
$F_d$  согласно (3). Это достигалось простым изменением номинала подборного резистора в электрической схеме ДВ. Задаваемая высота срабатывания выбиралась из трех значений: 3, 15 и 30 метров.

Данные о текущей высоте с привязкой ко времени выдавал бортовой баровысотометр окоптера, имеющий погрешность  $\pm 0,5$  м. Для испытаний были выбраны две типовые ПП: грунт с травяным покрытием и спокойная водная поверхность в летнее время года в средней полосе. На рисунке 3 представлена зависимость во времени выходного напряжения ДВ для проверки расчетной высоты срабатывания 30 метров над водной поверхностью при направлении главного лепестка ДНА по нормали к ПП.

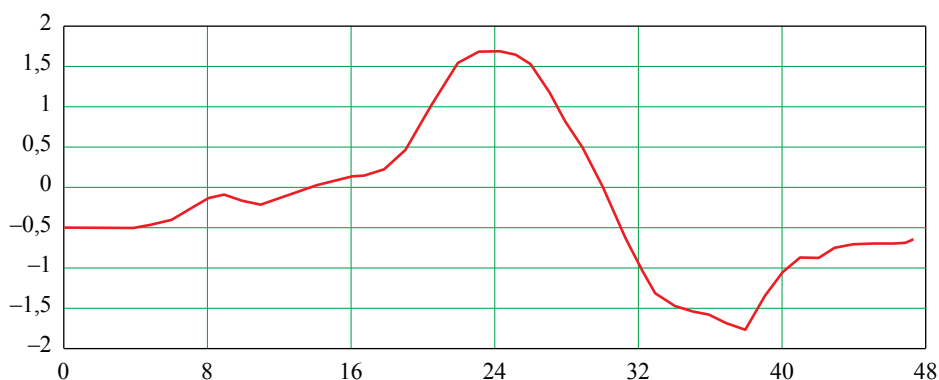
На рисунке 4 представлено усредненное выходное напряжение в зависимости от высоты, привязанной к текущему времени после сопоставления с записанными во времени данными от баровысотомера. Высоте срабатывания соответствует постоянный положительный уровень напряжения вблизи точки перехода выходного напряжения ДВ из отрицательной области в положительную.



Рис. 2. Приемо-передающий блок опытного образца ДВ



**Рис. 3.** Выходное напряжение ДВ во времени при спуске с высоты примерно 50 метров



**Рис. 4.** Усредненное выходное напряжение ДВ в вольтах в зависимости от высоты в метрах

Выходное напряжение ДВ имеет флюктуирующий характер. Длительность отдельных выбросов выходного напряжения ДВ лежит в пределах 2–20 мс и обусловлена в основном изменением направления излучения зондирующего сигнала из-за переменных ветровых нагрузок на октокоптер и его вибрации. Амплитудный детектор изготовленного ДВ имеет постоянную времени в десятки раз меньше, т. к. рассчитан на скорость движения ДП порядка 900 м/с и поэтому отрабатывает флюктуации преобразованного сигнала. В районе перехода через ноль функция селекции имеет большую крутизну, и уровень флюктуаций не будет существенно влиять на точность фиксации заданной высоты срабатывания. На высотах, превышающих высоту срабатывания, максимальный уровень флюктуаций лежит в области отрицательных напряжений и не может привести к преждевременному

срабатыванию. То есть разработанный ДВ достаточно универсален и сохраняет свою работоспособность в очень широком диапазоне скоростей подхода к ПП: от 0 до 900 м/с. Для того чтобы функция селекции не имела резких выбросов и была достаточно гладкой, необходимо согласование постоянной времени амплитудного детектора со скоростью движения ДВ. При этом динамическая ошибка фиксации высоты срабатывания, обусловленная инерционностью амплитудного детектора, будет минимальной.

На рисунке 5 представлена зависимость усредненного выходного напряжения ДВ при полете на низкой высоте над грунтом с травяной растительностью. Здесь же приведена зависимость выходного напряжения ДВ от расстояния до кирпичной стены здания, снятая по отдельным точкам в моменты, когда ДВ был неподвижен.





Для оценки помехозащищенности ДВ рассмотрим одну из возможных тактических ситуаций. Станция помех (СП), прикрывающая некоторый объект, расположена от него на расстоянии в несколько десятков метров. ДВ начинает реагировать на отраженный от ПП сигнал на высотах также в несколько десятков метров. Следовательно, можно считать, что расстояние от СП до ДВ составляет порядка 100 м. Антенна СП имеет слабонаправленную диаграмму направленности, поскольку заранее невозможно определить точное направление подхода ДВ. Полагаем, что СП излучает шумовую заградительную помеху, как это часто бывает.

В рассматриваемом ДВ предусмотрен помеховый канал обработки сигнала, реагирующий на наличие помехи и исключающий преждевременное срабатывание. Возможна только блокировка ДВ. Помехозащищенность ДВ определяется уровнем мощности СП, при котором происходит его срабатывание или блокировка. И если этот уровень превышает мощность СП, то ДВ считается помехозащищенным.

Помехозащищенность рассмотренного ДВ обеспечивается за счет низкого уровня боковых лепестков, малой ширины основного лепестка ДНА и широкого диапазона частот, в пределах которого может находиться рабочая частота СВЧ-модуля.

Мощность СП, при которой сигнал помехи блокирует ДВ, определяется соотношением:

$$P_{\text{пом}} = \frac{(4\pi D)^2 \cdot P_{\text{пр}} \cdot 2\Delta f \cdot K_{\text{зп}}}{G_{\text{пом}} \cdot G \cdot \beta \cdot \lambda^2 \cdot \Delta F}, \quad (6)$$

где  $D$  – расстояние от ДВ до СП;

$P_{\text{пр}}$  – чувствительность ДВ;

$\Delta f$  – полоса частот, в пределах которой может находиться несущая частота СВЧ-модуля;

$K_{\text{зп}}$  – коэффициент схемной помехозащищенности;

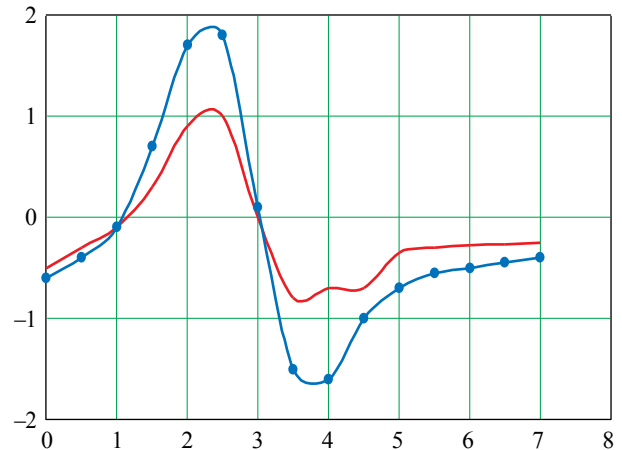
$G_{\text{пом}}$  – коэффициент усиления антенны СП;

$G$  – коэффициент усиления антенны ДВ;

$\beta$  – уровень боковых лепестков ДНА ДВ;

$\Delta F$  – полоса пропускания приемного тракта ДВ до амплитудного детектора.

Полагаем  $D = 100$  м;  $\Delta f = 1,5$  ГГц;  $G_{\text{пом}} = 10$ ;  $G = 126$ ;  $\beta = 0,1$ ;  $\lambda = 3,2 \cdot 10^{-3}$  м;  $\Delta F = 1,8$  МГц.



**Рис. 5.** Выходное напряжение ДВ при  $\theta = 30^\circ$ ,  $H_0 = 3$  м  
— усредненное выходное напряжение ДВ в вольтах в зависимости от высоты в метрах при полете; — выходное напряжение ДВ в вольтах в зависимости от расстояния до стены здания в метрах

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{изл}}}{\Pi} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{10^{8,75}} = 5,3 \cdot 10^{-12} \text{ Вт},$$

где  $P_{\text{изл}}$  – мощность излучения СВЧ-модуля;  $\Pi$  – энергетический потенциал ДВ.

Принимаем  $K_{\text{зп}} = 20$  дБ. Такое значение  $K_{\text{зп}}$  определено для шумовой заградительной помехи применительно к похожим ДВ сантиметрового диапазона длин волн. При этом получается отношение сигнал/шум на входе и на выходе амплитудного детектора, равное примерно единице, и ДВ сохраняет свою работоспособность.

После подстановки в (6) получаем:

$$P_{\text{пом}} = \frac{(4\pi \cdot 100)^2 \cdot 5,3 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 10^9 \cdot 100}{10 \cdot 126 \cdot 0,1 \cdot (3,2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,8 \cdot 10^6} \approx 1080 \text{ Вт}.$$

Таким образом, блокировка ДВ теоретически возможна, если СП излучает непрерывный сигнал мощностью не менее 1080 Вт в диапазоне 94 ГГц. Такой уровень мощности СП диапазона 94 ГГц с непрерывным излучением в настоящее время не реализован. В открытых источниках имеются сведения о генераторах и усилителях трехметрового диапазона длин волн мощностью до 150 Вт в непрерывном режиме и до нескольких киловатт – в импульсном режиме работы. Эти усилители выполнены на основе ламп бегущей волны или пролетных клистронов. Известно также, что скважность выходных импульсов у мощных приборов этого типа



составляет 8–10, а длительность не превышает десятков микросекунд. Реализовать же такие мощные передатчики на практике весьма непростая задача.

В итоге получается, что длительность импульса излучаемого сигнала мощной СП во много раз меньше постоянной времени амплитудного детектора приемника ДВ. То есть такая СП не представляет опасности: ДВ не будет реагировать на ее излучение в силу инерционности амплитудного детектора приемного тракта ДВ. Можно считать, что ДВ устойчив к воздействию активных организованных помех.

Также хорошо известно, что в трехмиллиметровом диапазоне длин волн при работе на малых дальностях воздействие естественных помех незначительно [3].

Например:

- туман водностью 10 мг/м<sup>3</sup> дает ослабление 0,5 дБ/км;
- пылевое облако с плотностью 1 г/м<sup>2</sup> – 0,2 дБ/км;
- сильный дождь интенсивностью 60 мм/час – 4 дБ/км.

Откуда следует вывод, что ДВ устойчив к воздействию организованных и естественных помех.

Для решения задачи реализации ДВ со скоростью движения 900 м/с можно применить также и спектральный способ обработки сигнала. При этом для формирования дискриминационной характеристики целесообразно использовать третью и четвертую пару гармоник преобразованного сигнала. СВЧ-часть ДВ остается без изменений. Выбираем частоту модуляции  $F_M = 2,5F_{\text{доп}} = 1,5$  МГц и полосу пропускания ПФ порядка 0,5 МГц из условия, чтобы крайние гармоники в каждой из пар не накладывались друг на друга. Полагая полосу пропускания ДВ 0,5 МГц и проводя аналогичный расчет, как и в случае интегрального способа обработки сигнала, получаем следующее выражение для максимально возможной высоты срабатывания:

$$H_{\text{MAX}} \approx 128 \sqrt{\sigma_{\text{уд}}} \cdot \cos \vartheta. \quad (7)$$

Выражение для  $H_{\text{MAX}}$  получено из условия достаточности энергетики ДВ на определенной

высоте. Это является необходимым, но недостаточным условием для нормальной работы ЧМ СБРЛ. Необходимо еще, чтобы время задержки зондирующего сигнала было намного меньше периода частоты модуляции [1]. Это эквивалентно выполнению условия:

$$H \ll \frac{c}{2F_M}. \quad (8)$$

После подстановки  $F_M = 1,5$  МГц в (8) получаем  $H \ll 100$  м. При этом, по сравнению с рассмотренным выше интегральным способом обработки сигнала, диапазон различных вариантов использования ДВ значительно расширен по энергетике (допускается больший угол зондирования и худшая удельная ЭПР в разных комбинациях). Подставляя, например,  $H_{\text{MAX}} = 20$  м в (7), получаем условие для возможных вариантов применения ДВ со спектральным способом обработки сигнала:

$$\sqrt{\sigma_{\text{уд}}} \cdot \cos \vartheta \geq 0,15.$$

Минимально возможная высота срабатывания при спектральном способе обработки сигнала находится из соотношения  $H_{\text{MIN}} = c(k + 0,5)/2F_d$  при  $k = 3$  и максимальном значении  $F_d = 380$  МГц. В итоге получаем  $H_{\text{MIN}} = 0,9$  м.

### Заключение

Рассмотрены спектральный и интегральный способы обработки сигнала для радиолокационного ДВ трехмиллиметрового диапазона длин волн на основе СВЧ-модуля гомодинного типа. Изготовлен и испытан опытный образец ДВ с интегральным способом обработки сигнала. Полученные результаты испытаний полностью согласуются с расчетными данными.

Проведено сравнение рассмотренных способов обработки сигнала на конкретном примере. Показано, что использование спектрального способа обработки сигнала позволяет существенно расширить диапазон реализуемых высот срабатывания снизу по сравнению с интегральным способом обработки сигнала. Но при этом необходима высокая степень линейности модуляционной характеристики СВЧ-модуля, а также достаточно высокая и относительно постоянная скорость движения ДВ. В случае



интегрального способа обработки сигнала требования к линейности модуляционной характеристики СВЧ-модуля не столь критичны и скорость движения ДВ может варьироваться от нуля до очень высоких значений.

Независимо от используемого способа обработки сигнала установка заданной высоты срабатывания в значительных пределах возможна изменением номинала всего одного резистора. Это позволяет унифицировать линейку радиолокационных ДВ путем использования одной универсальной платы приемника.

По сравнению с лазерным ДВ радиолокационный ДВ имеет ряд преимуществ, а именно:

- работоспособность по любым ПП;
- помехозащищенность к воздействию естественных и организованных помех;

- высокая технологичность в серийном производстве;
- меньшие габариты.

### Список литературы

1. Комаров И. В., Смольский С. М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний. М.: Горячая линия – Телеком, 2010.
2. Павельев В. А., Хаминов Д. В. Рассеяние электромагнитных волн миллиметрового диапазона природными и антропогенными факторами. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
3. Быстров Р. П., Загорин Г. К., Соколов А. В., Федорова Л. В. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов. Монография. Под ред. Р. П. Быстрова, А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2008. 320 с.

---

### Об авторах

**Аникушин Максим Алексеевич** – начальник лаборатории Публичного акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Импульс», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, компьютерное моделирование и программирование.

**Власов Владимир Владимирович** – старший инженер-исследователь Публичного акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Импульс», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: радиолокация, цифровая обработка радиолокационных сигналов, статистический анализ информации.

**Трифонов Александр Васильевич** – ведущий инженер Публичного акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Импульс», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: радиолокация с излучением непрерывных ЧМ колебаний, системы термоэлектрического охлаждения.



### 3-mm wavelength range radar altitude sensors

Anikushin M. A., Vlasov V. V., Trifonov A. V.

*PJSC NPP Impuls, Moscow, Russian Federation*

In this study, we analyse the specific features of design of 3-mm wavelength range radar altitude sensors based on domestic-made super high frequency modules M55323 and M55328. Some results of full-scale tests are given.

**Keywords:** frequency modulation, energy potential, operating range, underlying terrain

---

#### Information about the authors

**Anikushin Maksim Alekseyevich** – Head of Laboratory, PJSC NPP Impuls, Moscow, Russian Federation.  
Science research interests: digital signal processing, computer-aided modelling and programming.

**Vlasov Vladimir Vladimirovich** – Senior Research Engineer, PJSC NPP Impuls, Moscow, Russian Federation.  
Science research interests: radar systems, digital processing of radar signals, statistical data analysis.

**Trifonov Aleksandr Vasilievich** – Lead Engineer, PJSC NPP Impuls, Moscow, Russian Federation.  
Science research interests: frequency-modulated continuous-wave radiolocation, thermoelectric cooling systems.





<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-47-56>  
УДК: 623.462.22

## Уточнение аэродинамического момента ракеты по результатам летных испытаний

В. Н. Акимов, А. А. Костюков, Е. Н. Кравчук, К. О. Розанцев

Акционерное общество «Долгопрудненское научно-производственное предприятие», Долгопрудный, Российская Федерация

В статье проведено уточнение аэродинамического момента ракеты на основе анализа летных испытаний и результатов расчетов в программе вычислительной газодинамики. Приведены результаты имитационного математического моделирования в сравнении с данными из летных испытаний, показывающие повышение сходимости за счет предложенного уточнения.

**Ключевые слова:** зенитная управляемая ракета, аэродинамический момент, летные испытания, аэродинамические характеристики

**Для цитирования:** Акимов В. Н., Костюков А. А., Кравчук Е. Н., Розанцев К. О. Уточнение аэродинамического момента ракеты по результатам летных испытаний // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 4. С. 47–56. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-47-56>

**For citation:** Akimov V. N., Kostyukov A. A., Kravchuk E. N., Rozantsev K. O. Refining the aerodynamic moment of the missile based on flight test results // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 4. P. 47–56. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-47-56>

Поступила 04.10.2021 Отрецензирована 01.11.2021 Одобрена 16.11.2021 Опубликована 27.12.2021

При проектировании и разработке современных и перспективных маневренных беспилотных летательных аппаратов, таких как зенитные управляемые ракеты (ЗУР), важную роль играет соответствие теоретических аэродинамических характеристик экспериментальным (полученным по результатам летных испытаний), в частности, аэродинамических характеристик, описывающих действие аэродинамического момента.

По теоретическим аэродинамическим характеристикам определяются аэродинамические усилия, действующие на ЗУР, и динамические характеристики ЗУР как объекта управления. Поэтому точность определения аэродинамических характеристик, и в частности аэродинамического момента, напрямую

влияет на оптимальность выбора конструктивно-силовой компоновки ЗУР и в итоге на достижение минимальных габаритно-массовых характеристик ЗУР, а также на качество переходных процессов при выполнении ЗУР функциональных задач в соответствии с требованиями технического задания на разработку.

Задача определения теоретических аэродинамических характеристик ЗУР является достаточно сложной и трудоемкой в связи с наличием широких диапазонов различных режимов полета (диапазоны изменения чисел Маха, углов атаки, высот полета, отклонения аэродинамических рулей, углов аэродинамического крена).

Кроме этого, наиболее остро стоит задача точного определения теоретических аэродинамических характеристик в режимах полета, когда ЗУР статически неустойчива. В этом случае ошибки в определении аэродинамических характеристик могут приводить

к потере устойчивости либо к снижению маневренности.

В настоящей работе уточняется определение аэродинамического момента на примере осесимметричной ЗУР. Она представляет собой одноступенчатую ракету нормальной аэродинамической схемы, крылья и аэродинамические рули которой расположены по схеме «ХХ».

Аэродинамический момент описывается уравнениями в трех проекциях на оси связанной системы координат (ССК)  $OXYZ$ . Данные проекции обозначаются  $M_x, M_y, M_z$  [1] (рис. 1).

Проекцию момента  $M_x$  называют моментом крена (момент относительно продольной оси  $OX$ ),  $M_y$  – моментом рысканья (момент относительно поперечной оси  $OY$ ),  $M_z$  – моментом тангажа (момент относительно поперечной оси  $OZ$ ) [1].

Моменты  $M_x, M_y, M_z$  зависят от скорости и высоты полета, от пространственного угла атаки, угла аэродинамического крена, углов отклонения аэродинамических рулей. Кроме того, на величину моментов влияет угловая скорость вращения корпуса ЗУР, а также производные пространственного угла атаки, углов отклонения аэродинамических рулей.

Обычно [2–5] при проектировании и разработке маневренных осесимметричных беспилотных летательных аппаратов (в том числе ЗУР), а также в практике разработки ЗУР

принимается, что аэродинамический момент действует в плоскостях симметрии ЗУР, то есть плоскости действия моментов  $M_x, M_y, M_z$  проходят через продольную ось (рис. 1).

Уравнения проекций аэродинамического момента на оси ССК выглядят следующим образом [2–5]:

$$\begin{aligned} M_x &= [m_{x\alpha}^{ko} + m_{x\delta}^{ko} - m_x(\delta_{эл}) - m_x(\omega_x)] \cdot q \cdot S_M \cdot d_M; \\ M_y &= -F_z \cdot (x_m - x_d) - F_z(\delta_z) \cdot (x_m - x_p) + \\ &\quad + m_y(\omega_y) \cdot q \cdot S_M \cdot L; \\ M_z &= F_y \cdot (x_m - x_d) + F_y(\delta_y) \cdot (x_m - x_p) + \\ &\quad + m_z(\omega_z) \cdot q \cdot S_M \cdot L, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $m_{x\alpha}^{ko}, m_{x\delta}^{ko}$  – коэффициенты момента крена (косого обдува), который возникает независимо от угла отклонения аэродинамических рулей и представляет собой суммарный результат перекрестного влияния продольных каналов управления на канал крена [6];  $q$  – скоростной напор;  $S_M$  – площадь мишени;  $d_M$  – мишень ЗУР;  $L$  – длина ЗУР;  $m_x(\delta_{эл})$  – коэффициент момента крена, вызванный отклонением элеронов;  $m_x(\omega_x), m_y(\omega_y), m_z(\omega_z)$  – коэффициенты момента демпфирования, вызванного наличием угловой скорости вращения ЗУР;  $F_y, F_z$  – проекции нормальной аэродинамической силы, вызванной наличием угла атаки;  $x_m$  – координата центра масс ЗУР от носка ракеты;  $x_d$  – координата центра давления силы от носка ракеты;  $x_p$  – координата оси вращения рулей от носка ракеты;  $F_y(\delta_y), F_z(\delta_z)$  – проекции дополнительной

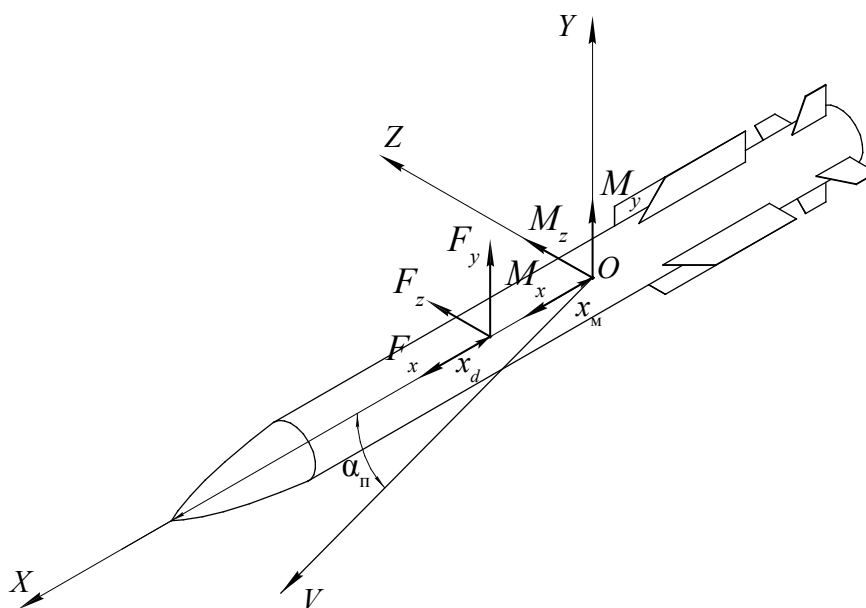


Рис. 1. Связанная система координат  $OXYZ$



нормальной силы, вызванной отклонением аэродинамических рулей  $\delta_y, \delta_z$  в продольных каналах управления.

Коэффициент момента крена  $m_{xu}^{ko}$  характеризует момент косоуго обдува, возникающий из-за несимметричного расположения вихрей, сходящихся с корпуса ЗУР, относительно расположенных сзади неотклоненных несущих поверхностей ( $\delta = 0$ ). Коэффициент момента крена  $m_{x\delta}^{ko}$  характеризует момент косоуго обдува, возникающий из-за несимметричного обтекания отклоненных аэродинамических рулей ( $\delta \neq 0$ ), находящихся с наветренной и подветренной сторон [5].

Уравнения проекций аэродинамического момента на оси ССК в случае отсутствия вращения ЗУР и при нулевых углах отклонения рулей выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} M_x &= m_{xu}^{ko} \cdot q \cdot S_M \cdot d_M; \\ M_y &= -F_z \cdot (x_M - x_d); \\ M_z &= F_y \cdot (x_M - x_d). \end{aligned} \quad (2)$$

Уточнение определения проекций аэродинамического момента (1) и (2) предлагается выполнять с учетом действия аэродинамического момента вне плоскостей симметрии ЗУР.

Из теоретической механики [7] известно, что в случае, когда плоскость действия момента не проходит через ось симметрии (рис. 2), уравнения моментов выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} M_x &= -F_z \cdot (y_M - y_d) + F_y \cdot (z_M - z_d); \\ M_y &= -F_x \cdot (z_M - z_d) - F_z \cdot (x_M - x_d); \\ M_z &= F_x \cdot (y_M - y_d) + F_y \cdot (x_M - x_d), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $y_d, z_d$  – координаты точки приложения аэродинамической силы от оси  $OX$ ;  $y_M, z_M$  – координаты центра масс от оси  $OX$ ;  $F_x$  – продольная составляющая аэродинамической силы.

С учетом уравнений (3) проекции аэродинамического момента (1) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} M_x &= -F_z \cdot (y_M - y_d) + F_y \cdot (z_M - z_d) + \\ &+ [m_{x\delta}^{ko} - m_x(\delta_{эл}) - m_x(\omega_x)] \cdot q \cdot S_M \cdot d_M; \\ M_y &= -F_x \cdot (z_M - z_d) - F_z \cdot (x_M - x_d) - \\ &- F_z(\delta_z) \cdot (x_M - x_p) + m_y(\omega_y) \cdot q \cdot S_M \cdot L; \\ M_z &= F_x \cdot (y_M - y_d) + F_y \cdot (x_M - x_d) + \\ &+ F_y(\delta_y) \cdot (x_M - x_p) + m_z(\omega_z) \cdot q \cdot S_M \cdot L. \end{aligned} \quad (4)$$

Как показывает практика разработки и изготовления сверхзвуковых осесимметричных ЗУР, отклонения центра масс относительно плоскостей симметрии незначительны и координатами  $y_M$  и  $z_M$  можно пренебречь. Тогда уравнения моментов в случае отсутствия вращения ЗУР и при нулевых углах отклонения рулей выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} M_x &= y_d \cdot F_z - z_d \cdot F_y; \\ M_y &= z_d \cdot F_x - (x_M - x_d) \cdot F_z; \\ M_z &= -y_d \cdot F_x + (x_M - x_d) \cdot F_y. \end{aligned} \quad (5)$$

Из сравнительного анализа уравнений (2) и (5) следует, что:

- момент косоуго обдува, возникающий из-за несимметричного расположения вихрей, сходящихся с корпуса ЗУР, относительно расположенных сзади несущих поверхностей определяется проекциями нормальной аэродинамической силы и координатами точки приложения этих сил,

- наличие момента  $M_x$  у ЗУР в различных режимах полета показывает, что центр давления аэродинамической силы не находится в плоскостях симметрии,

- кроме основных моментов от проекций нормальной силы в плоскостях  $OY$  и  $OZ$  (в продольных каналах управления), действует момент от продольной силы.

Необходимость уточнить определение аэродинамического момента рассматриваемой ЗУР выявлена по результатам сравнительного анализа переходных процессов, полученных в летных испытаниях и математическим моделированием.

Кроме этого, проведены расчеты обтекания планера ЗУР для различных режимов полета в пакете вычислительной газодинамики. Задача рассмотрена в трехмерной постановке, используемая математическая модель, основана на решении усредненных уравнений Навье – Стокса, замкнутых с помощью SST  $k-\omega$  модели турбулентности. Результаты анализа расчетов показали, что из-за асимметрии аэродинамических сил на планере ЗУР, и в том числе на несущих поверхностях, аэродинамическая сила всей ЗУР действует по линии, не пересекающейся с продольной осью ЗУР,

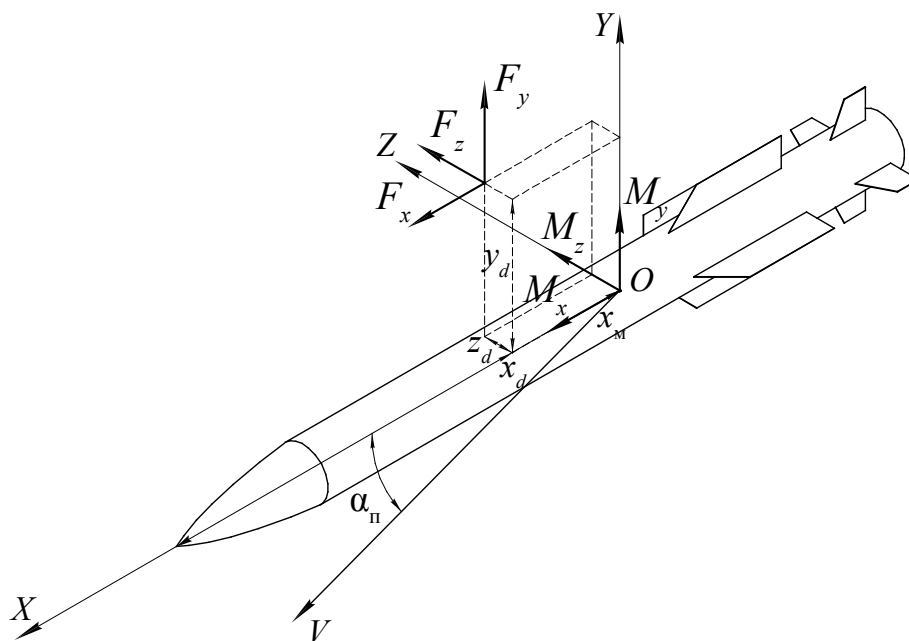


Рис. 2. Плоскость действия момента не проходит через ось симметрии

то есть проекции аэродинамического момента действуют вне плоскостей симметрии ЗУР.

Сравнение переходных процессов проводилось по результатам моделирования на имитационной математической модели системы стабилизации (ИММ СС) [8]. В состав ИММ СС входит математическая модель внешних сил (моментов), созданная на основе уравнений (1). Модель аэродинамических сил и моментов, используемая в данных моделях, сформирована на основе поканального представления аэродинамических сил (моментов) [3].

Следует отметить, что для повышения сходимости результатов моделирования с результатами летных испытаний, а также для выбора оптимальных настроек системы стабилизации расчет относительной координаты центра давления планера ЗУР осуществлялся с поправками, зависящими от времени работы двигателя и скоростного напора. Данные поправки в основном сформированы по результатам летных испытаний.

На рис. 3–5 приведены характеристики ЗУР в двух режимах полета (а – активный участок полета, б – пассивный), в которых зафиксированы расхождения по переходным процессам (рис. 3, 4). Перегрузки и углы отклонения рулей в продольных каналах управления  $\bar{n}_y$ ,  $\bar{n}_z$ ,  $\bar{\delta}_y$ ,  $\bar{\delta}_z$  определены относительно

их максимальных значений для данной ЗУР и приведены в зависимости от времени полета, отнесенного к времени работы двигателя.

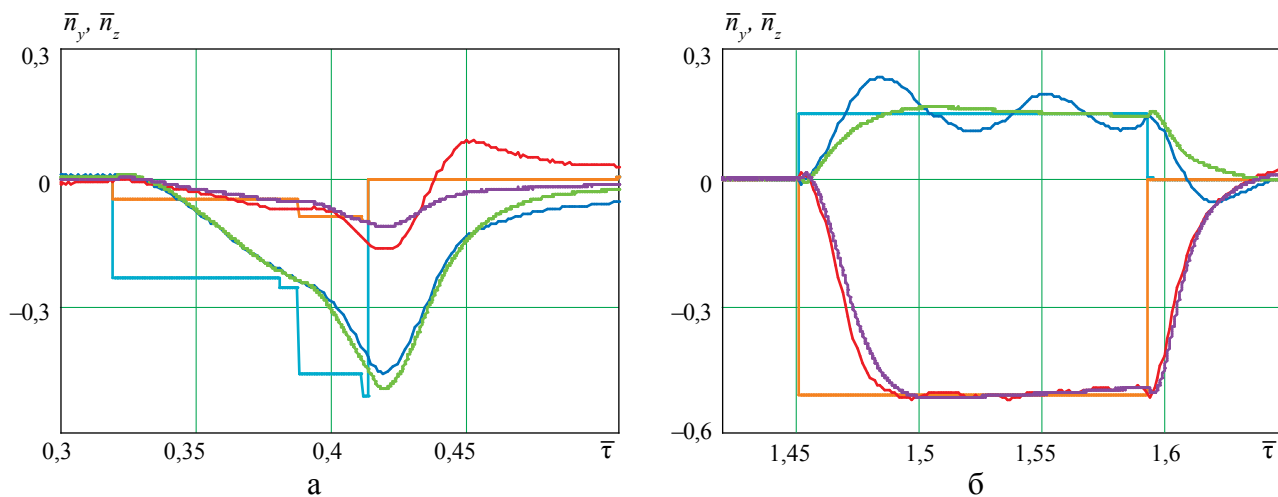
В данных режимах ЗУР отрабатывает ступенчатые несимметричные команды управления (рис. 3, линии 1, 2), в процессе которых становится статически неустойчивой на активном участке и статически устойчивой на пассивном (рис. 5).

Как показывает моделирование, в соответствии с продольной балансировкой разному уровню команд управления (относительных перегрузок в режиме а)  $\bar{n}_y > \bar{n}_z$  и в режиме б)  $\bar{n}_y < \bar{n}_z$ ) должны соответствовать разные уровни отклонения рулей в продольных каналах управления (в режиме а –  $\bar{\delta}_y < \bar{\delta}_z$  и в режиме б –  $\bar{\delta}_y > \bar{\delta}_z$ ), но данного соответствия в пусках не наблюдается. При этом наблюдаются значительные расхождения в переходных процессах в канале управления с меньшим уровнем команд.

Таким образом, результаты анализа летных испытаний, результатов моделирования на ИММ СС и расчетов в программе вычислительной газодинамики показали необходимость уточнения определения аэродинамического момента.

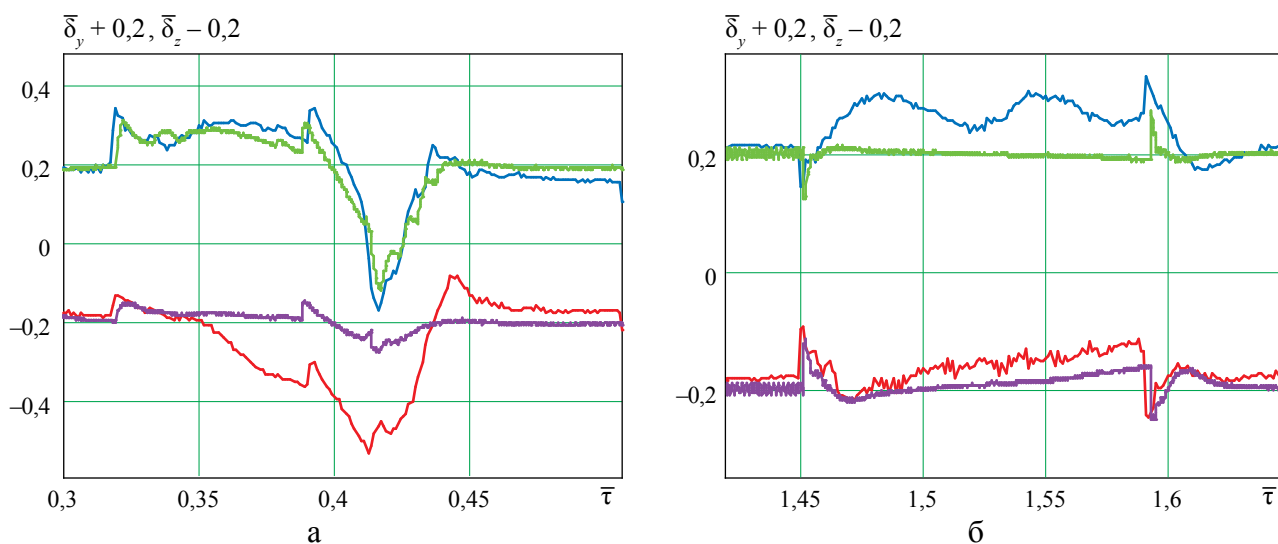
Для уточнения определения аэродинамического момента (уточнения ИММ СС) в соответствии с уравнениями (4), (6) необходимо





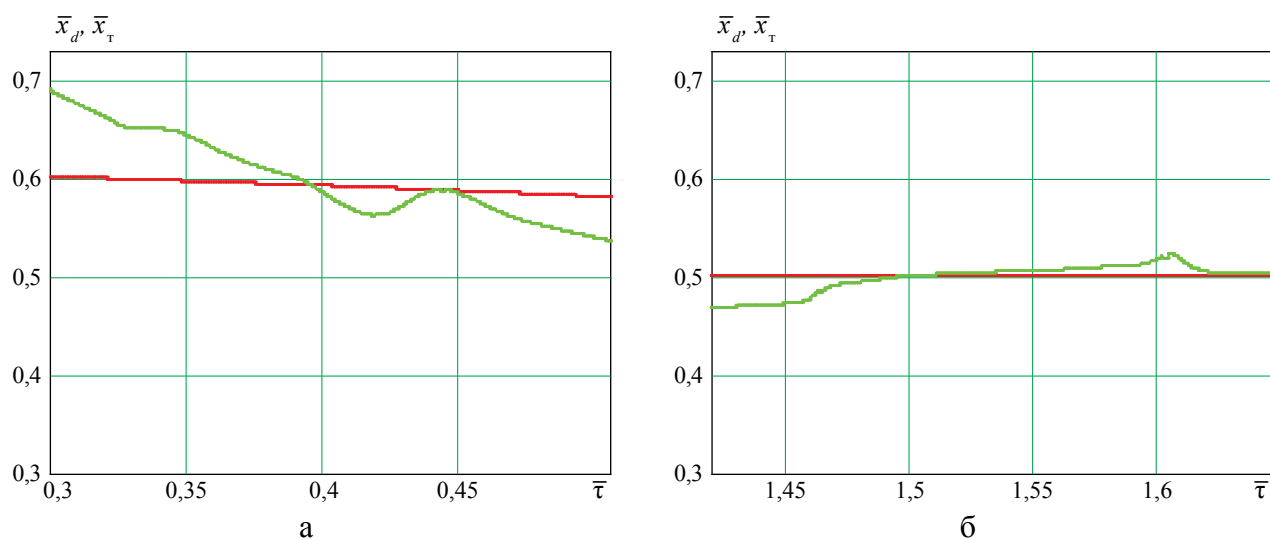
**Рис. 3.** Относительные поперечные перегрузки в продольных каналах управления  $Y$  и  $Z$

—, — заданные; —, — реализованные в пуске; —, — по результатам моделирования



**Рис. 4.** Относительные значения углов отклонения рулей в каналах управления

—, — реализованные в пуске; —, — по результатам моделирования



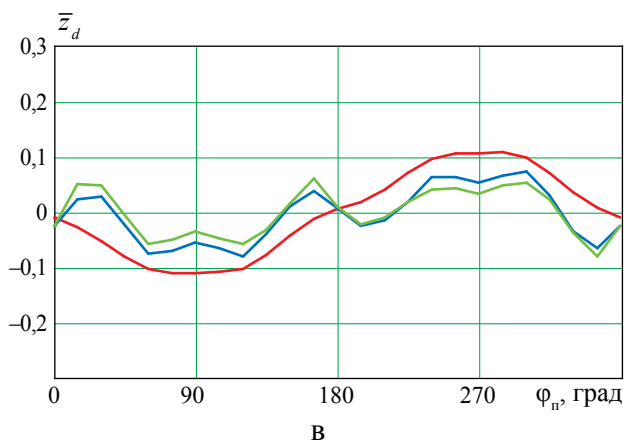
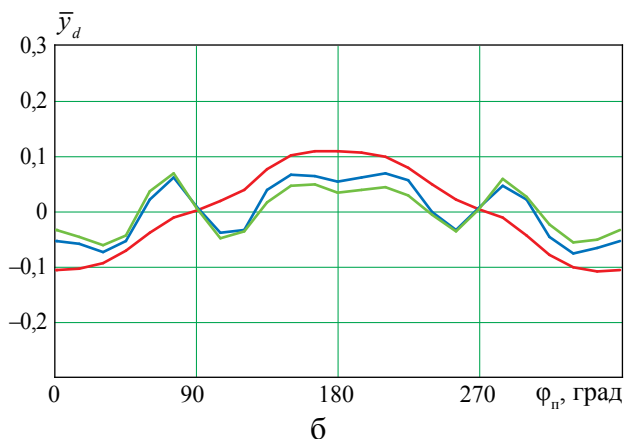
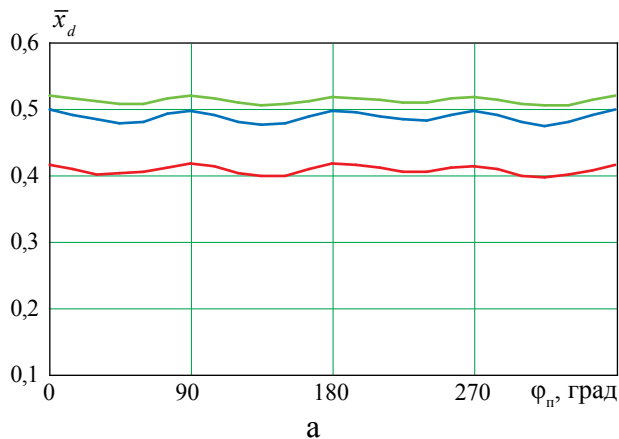
**Рис. 5.** Относительные координаты по оси  $X$

— — центр масс, — — центр давления



определение координат точки приложения аэродинамической силы  $x_d, y_d, z_d$ .

Наиболее доступным способом определения координат  $x_d, y_d, z_d$  и других аэродинамических характеристик в различных режимах полета является расчет пространственного обтекания планера ЗУР в программе вычислительной газодинамики.



**Рис. 6.** Относительные значения  $x_d, y_d, z_d$  в зависимости от угла аэродинамического крена для разных углов атаки  
—  $\alpha_n = 4^\circ$ , —  $\alpha_n = 8^\circ$ , —  $\alpha_n = 12^\circ$

По результатам расчетов пространственного обтекания планера ЗУР в различных режимах при отсутствии вращения корпуса ЗУР определяются проекции вектора аэродинамических сил ( $F_x, F_y, F_z$ ) и вектора аэродинамического момента ( $M_x, M_y, M_z$ ) на оси ССК.

На основании уравнений (3) и использования правила сложения векторов определяются координаты  $x_d, y_d, z_d$ :

$$\begin{aligned} M_x &= y_d \cdot F_z - z_d \cdot F_y; \\ M_y &= -(x_m - x_d) \cdot F_z + z_d \cdot F_x; \\ M_z &= -y_d \cdot F_x + (x_m - x_d) \cdot F_y; \\ F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}; \\ M &= \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}; \\ d &= \sqrt{(x_m - x_d)^2 + y_d^2 + z_d^2}; \\ d &= M/F, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $F$  – модуль вектора аэродинамических сил;  $M$  – модуль вектора аэродинамического момента;  $d$  – плечо вектора аэродинамического момента относительно носка ЗУР.

Определенные таким образом координаты представлены на рисунке 6 в виде значений, отнесенных к длине ЗУР, для некоторых режимов.

В общем случае полученные значения  $x_d$ , а также  $d$  близки значениям  $x_d$ , используемым в ИММ СС, которые получены на основе испытаний в аэродинамических трубах и уточнены по результатам летных испытаний.

Наибольший интерес представляют значения  $y_d, z_d$ , которые определяют степень влияния продольной составляющей аэродинамической силы  $F_x$  на моменты  $M_y, M_z$ .

Анализ полученных расчетных значений  $y_d, z_d$  показывает, что координаты зависят от числа Маха, пространственного угла атаки, угла аэродинамического крена  $\phi_n$  [1] и углов отклонения аэродинамических рулей.

По результатам многочисленных расчетов в программе вычислительной газодинамики для рассматриваемой ЗУР составлены табличные значения координат центра давления  $x_d, y_d, z_d$ , на основе которых проведено уточнение определения аэродинамического момента в ИММ СС в соответствии с выражениями (4), (5) и устранены поправки, зависящие от времени работы двигателя



и скоростного напора. Кроме этого, результаты расчетов обтекания планера позволили сформировать математическую модель аэродинамических сил и моментов на основе полопаточного представления сил (моментов) [3, 9]. Данная модель повышает сходимость результатов моделирования с результатами летных испытаний.

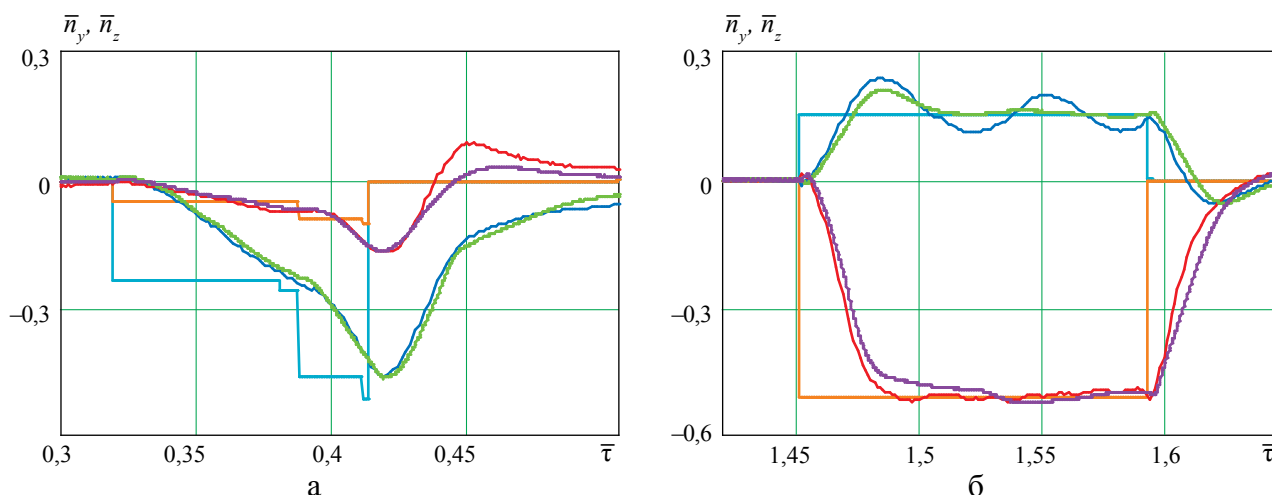
Результаты моделирования на уточненной таким образом ИММ СС для рассмотренных ранее режимов полета (рис. 3–5) приведены на рисунках 7–10.

На рисунке 10 представлены изменения относительных координат  $\bar{y}_d, \bar{z}_d$  по относительному времени.

Из анализа рисунков 3–5 и 7–10 следует, что уточнение определения проекций

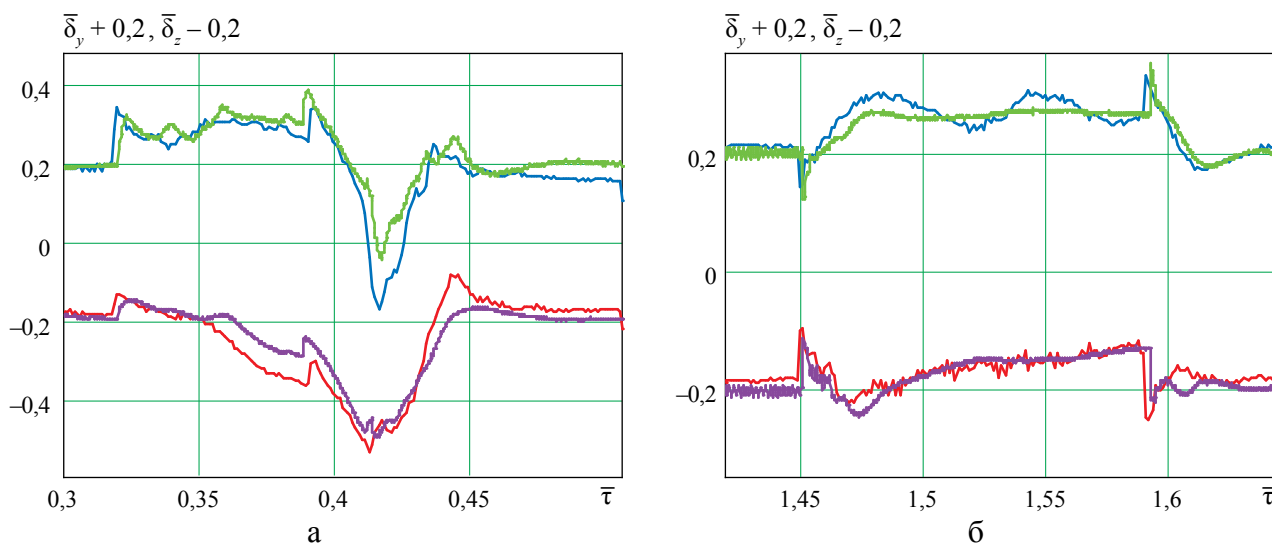
аэродинамического момента в соответствии с выражениями (4), (5) (за счет устранения допущения о симметричности действия аэродинамического момента) существенно повышает сходимость результатов моделирования с результатами летных испытаний в режимах с несимметричным обтеканием планера.

Моделирование на ИММ СС позволило уточнить настройки системы стабилизации, эффективность и правильность которых подтверждены успешными летными испытаниями. Статистическое моделирование показало, что выбранные настройки системы стабилизации обеспечивают повышение точности наведения и вероятности поражения средств воздушного нападения, особенно в условиях противоракетных маневров.



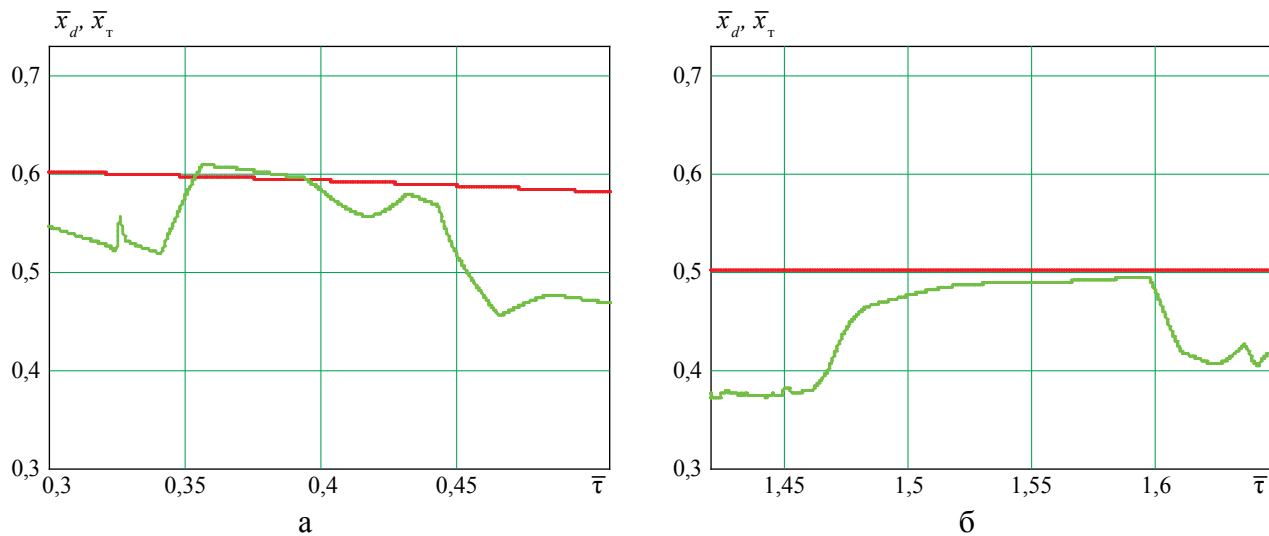
**Рис. 7.** Относительные поперечные перегрузки в продольных каналах управления  $Y$  и  $Z$

—, — заданные; —, — реализованные в пуске; —, — по результатам моделирования

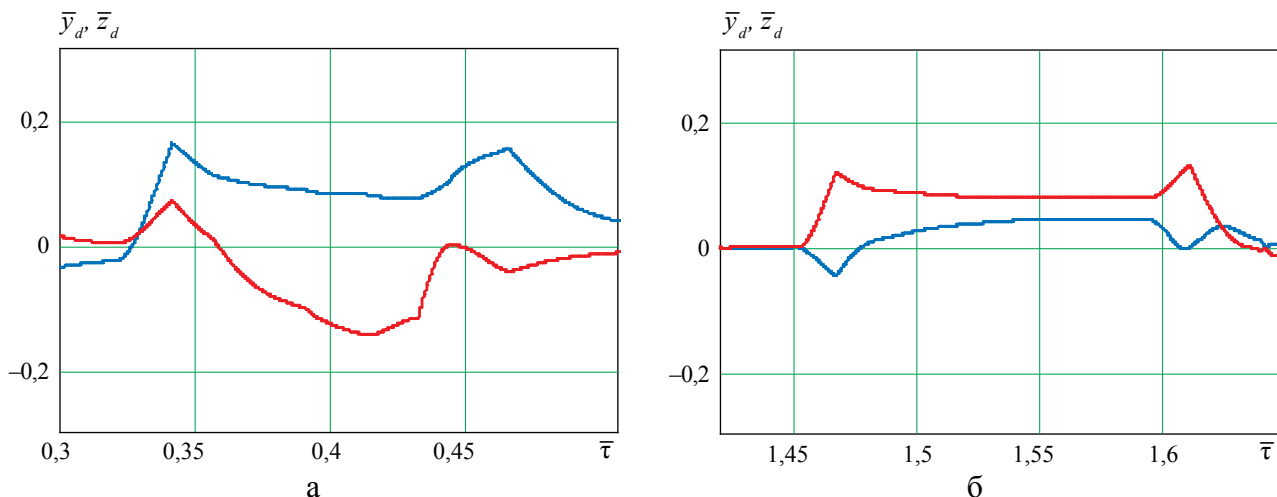


**Рис. 8.** Относительные значения углов отклонения рулей в каналах управления

—, — реализованные в пуске; —, — по результатам моделирования



**Рис. 9.** Относительные координаты по оси  $X$   
— центр масс, — центр давления



**Рис. 10.** Относительные координаты центра давления  
— по оси  $Y$ , — по оси  $Z$

Исследование различных режимов полета математическим моделированием на ИММ СС и сравнение с результатами летных испытаний рассматриваемой ЗУР показало:

- уточнение определения аэродинамического момента в соответствии с выражениями (4), (5) позволяет повысить сходимость аэродинамических и динамических характеристик ЗУР, полученных по результатам летных испытаний и моделирования;

- в режимах полета с симметричным обтеканием планера (схема «+» –  $\varphi_n = 0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  и схема « $\times$ » –  $\varphi_n = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ ), при которых абсолютные значения координат  $y_d$  и  $z_d$  либо близки друг другу, либо одна из них близка к нулю, действие момента

от продольной силы можно компенсировать за счет поправок к моменту нормальной силы или к моменту от отклонения аэродинамических рулей. В инженерной практике в основном этим пользуются для устранения расхождений по аэродинамическим характеристикам;

- в режимах полета с несимметричным обтеканием планера (при углах  $\varphi_n$  в диапазонах  $10^\circ \div 30^\circ, 100^\circ \div 120^\circ, 190^\circ \div 210^\circ$  и  $280^\circ \div 300^\circ$ ), при которых абсолютные значения координат  $y_d$  и  $z_d$  могут значительно отличаться друг от друга, действие момента от продольной силы компенсировать за счет поправок к моменту нормальной силы или к моменту от отклонения аэродинамических рулей практически не представляется возможным.





Таким образом, уточнение определения аэродинамического момента зенитной управляемой ракеты на основании гипотезы о несимметричности его действия позволяет повысить соответствие расчетных аэродинамических характеристик ЗУР экспериментальным, особенно в режимах с несимметричным обтеканием планера.

### Список литературы

1. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. Введ. 1981-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1981. 54 с.
2. Лебедев А. А., Чернобровкин Л. С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов: Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, переработанное и доп. Москва, Машиностроение, 1973. 616 с.
3. Нестеров В. А., Пейсах Э. Е., Рейдель А. Л., Соколовский Г. А., Станкевич А. И. Основы проектирования ракет класса «воздух–воздух» и авиационных катапультных установок для них: Учебник. Под общ. ред. В. А. Нестерова. Москва: Дрофа, 2002. 792 с.
4. Афанасьев П. П., Голубев И. С., Новиков В. Н., Парафесь С. Г., Пестов М. Д., Туркин И. К. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования. Под редакцией И. С. Голубева, И. К. Туркина. Изд. второе, перераб. и дополн. Москва, 2008. 656 с.
5. Мизрохи В. Я. Проектирование управления зенитных ракет: Учебно-научное издание. Москва: Экслибрис-Пресс, 2010. 252 с.
6. Святодух В. К. Динамика пространственного движения управляемых ракет. Москва: Машиностроение, 1969. 270 с.
7. Бутенин Н. В., Лунц Я. Л., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики. В 2 т. Т. I. Статика и кинематика. 3-е изд., стереотип. Москва: Наука, 1979. 272 с.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2007610549, Российская Федерация. Математическая модель системы стабилизации управляемой ракеты / В. Н. Акимов, А. А. Нестеренко, Л. О. Мартынова; 2006614169; заявл. 07.12.2006; опубл. 02.02.2007.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021618149, Российская Федерация. Математическая модель аэродинамических характеристик сверхзвукового осесимметричного беспилотного летательного аппарата на основе пологаточного представления аэродинамических сил / В. Н. Акимов, А. А. Костюков, К. О. Розанцев; 2021617190; заявл. 14.05.2021; опубл. 24.05.2021.

---

### Об авторах

**Акимов Владимир Николаевич** – доктор технических наук, доцент, заместитель генерального директора по науке – главный конструктор публичного акционерного общества «Долгопрудненское научно-производственное предприятие», Долгопрудный, Российская Федерация.

Область научных интересов: ракетостроение, системы управления ракет.

**Костюков Александр Александрович** – начальник отдела публичного акционерного общества «Долгопрудненское научно-производственное предприятие», Долгопрудный, Российская Федерация.

Область научных интересов: ракетостроение, динамика полета ракет.

**Кравчук Евгений Николаевич** – ведущий инженер-конструктор публичного акционерного общества «Долгопрудненское научно-производственное предприятие», Долгопрудный, Российская Федерация.

Область научных интересов: динамика полета ракет, системы стабилизации ракет.

**Розанцев Константин Олегович** – инженер-конструктор публичного акционерного общества «Долгопрудненское научно-производственное предприятие», Долгопрудный, Российская Федерация.

Область научных интересов: аэродинамика ракет, численное моделирование.



## Refining the aerodynamic moment of the missile based on flight test results

Akimov V. N., Kostyukov A. A., Kravchuk E. N., Rozantsev K. O.

*Public Joint-Stock Company “Dolgoprudny Scientific Production Enterprise”, Dolgoprudny, Russian Federation*

This research paper is intended to refine the aerodynamic moment of the missile based on an analysis of flight tests and results of gas dynamics software computations. The paper compares mathematical simulation results with flight test data in order to demonstrate an improved convergence due to the proposed refinement.

**Keywords:** surface-to-air missile, aerodynamic moment, flight tests, aerodynamic characteristics

---

### Information about the authors

**Akimov Vladimir Nikolaevich** – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Deputy General Director for Science – Chief Designer, Public Joint-Stock Company “Dolgoprudny Scientific Production Enterprise”, Dolgoprudny, Russian Federation.

Science research interests: rocket engineering, missile control systems.

**Kostyukov Aleksandr Aleksandrovich** – Head of Department, Public Joint-Stock Company “Dolgoprudny Scientific Production Enterprise”, Dolgoprudny, Russian Federation.

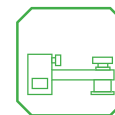
Science research interests: rocket engineering, missile flight dynamics.

**Kravchuk Evgeny Nikolaevich** – Lead Design Engineer, Public Joint-Stock Company “Dolgoprudny Scientific Production Enterprise”, Dolgoprudny, Russian Federation.

Science research interests: missile flight dynamics, missile stabilization systems.

**Rozantsev Konstantin Olegovich** – Design Engineer, Public Joint-Stock Company “Dolgoprudny Scientific Production Enterprise”, Dolgoprudny, Russian Federation.

Science research interests: missile aerodynamics, numerical simulation.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-57-66>

УДК 629.3.02

## Методы оптимизации в проектировании машин

Э. Р. Музафаров

*Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация*

*Акционерное общество «Ижевский электромеханический завод «Купол», Ижевск, Российская Федерация*

В статье рассмотрена проблема подбора оптимальной конструкции машины путем разработки и решения задачи многокритериальной оптимизации методом сведения к единому критерию с применением экспертных весовых коэффициентов. На примере проектирования универсальной машины технологического электротранспорта создана математическая модель параметрической оптимизации конструкции электрической и комбинированной энергосиловых установок и подбора наиболее рациональных компонентов системы с учетом требований заказчика.

**Ключевые слов:** проектирование транспорта, электрическая энергосиловая установка, электротранспорт, методы оптимального проектирования, оптимизация в машиностроении

**Для цитирования:** Музафаров Э. Р. Методы оптимизации в проектировании машин // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 4. С. 57–66. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-57-66>

**For citation:** Muzafarov E. R. Methods of optimisation in machine design // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 4. P. 57–66. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-57-66>

Поступила 11.11.2021 Отрецензирована 01.12.2021 Одобрена 09.12.2021 Опубликована 27.12.2021

### Введение

Машиностроительная отрасль всегда развивалась высокими темпами, и наше время не исключение. Изменяется все в отрасли. Совершенствуются методы конструкторского проектирования, производства, производственного менеджмента. Одним из движителей развития является внедрение и развитие на производстве методов математического моделирования, которые появились еще в древние века. Сегодня все большее влияние при разработке изделий занимают методы цифрового моделирования и оптимального проектирования [1].

Основанные на работах Адамецкого, Ганта, Тейлора, Гастева и других математические модели управления производством применяются на большинстве предприятий.

Существенное влияние на популяризацию аналитического проектирования, управления и производства оказало развитие компьютерных систем. Автоматизация производства, системы мониторинга, электронный документооборот, цифровые двойники – все это инструменты цифровизации предприятия, которые позволяют контролировать всю экономико-производственную систему предприятия.

В России одним из ведущих специалистов по математическим методам оптимизации экономической эффективности предприятия и продукции является доктор технических наук, профессор Хакимзян Амирович Фасхиев. Его работы связаны с повышением экономической эффективности и конкурентоспособности предприятия и его продукции. Его работы имеют как теоретический, так и прикладной характер. Большая часть из них была создана и применяется на производстве КамАЗ, г. Набережные Челны [2].



### Разработка методики оптимизации

На сегодня технологии оптимального проектирования в той или иной мере применяются на всех производствах. Начиная от подбора оптимальной конструкции консервной банки, с учетом ее материала, формы, толщины стенок, массы и других характеристик с одним критерием оптимизации – минимизация себестоимости, и до оптимизации всей конструкции управляемой ракеты для достижения оптимума многокритериальной задачи, где критерием оптимальности является наибольшая дальность полета при наибольшей полезной нагрузке.

Существуют различные методы решения задач многокритериальной оптимизации. В чистом виде почти всегда решение подобных задач является множеством Парето-оптимальных решений. Выбор и обоснование одного конкретного решения из множества является основной проблемой подобных вопросов.

На примере унифицированной машины технологического электротранспорта рассмотрим процесс многокритериальной оптимизации энергосиловой установки электротранспорта.

Унифицированная машина технологического электротранспорта (УМТЭТ) разработана ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» для АО «Сарапульский электрогенераторный завод» в рамках постановления правительства РФ № 218 в целях исполнения проекта по созданию высокотехнологического производства [1].

УМТЭТ представляет собой модульную транспортно-технологическую машину с широким спектром возможных сфер применения. Модульность УМТЭТ позволяет выполнять различные виды работ, таких как транспортировка навалочных и насыпных грузов, использование с рефрижераторной установкой для перевозки скоропортящейся продукции и работы с применением различных видов навесного оборудования, расположенного в передней и задней части машины [3].

Разработка методики оптимизации энергосиловой установки (ЭСУ) масштабируется

и требует определения критериев оптимальности как элементов ЭСУ (локальные критерии), которые можно изменить для достижения требуемых показателей машины, так и критериев оптимальности машины в целом (глобальные критерии), которые зависят от локальных критериев [1].

Проект создания энергосиловой установки, как и любой другой, имеет структурную иерархию и может рассматриваться как набор структурных элементов, из которых формируется изделие. Изменяя масштаб формирования параметрической базы, можно рассматривать:

- микроуровень, изменение материалов и технологии изготовления корпусных, крепежных и других деталей;

- общий уровень, управление характеристиками сборочных единиц, узлов и агрегатов, выбирая из множества стандартных изделий крепежей и базовых деталей (валы, шестерни и т.д.);

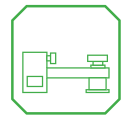
- макроуровень, формирование общего вида изделия из множества стандартных узлов.

Для проектирования машины выгоднее использовать узлы, которые уже освоены производством, таким образом, элементы ЭСУ будут представлять собой набор локальных дискретных характеристик, что сокращает издержки на проектирование машины и позволяет быстрее поставить изделие на серийное производство.

Рассматривая конструктивную схему энергосиловой установки электромобиля, можно выделить 4 узла, показанных на рисунке 1, и их компоновку на рисунке 2, которые имеют наибольшее влияние на все характеристики конструкции [1].

Кроме того, можно выделить взаиморасположение элементов как пятый регулируемый элемент. Помимо описанных выше вариантов, возможна установка электродвигателей непосредственно в колесах либо в мосту ведущей оси машины технологического электротранспорта, но с учетом того, что машина проектируется исходя из узлов, производимых на предприятии, выбор электродвигателя для универсальной машины технологического электротранспорта ограничен выпускаемой серией тяговых





электродвигателей АО «Сарапульский электрогенераторный завод» [1].

Следующим шагом проектирования является определение связи критериев оптимальности с характеристиками узлов.

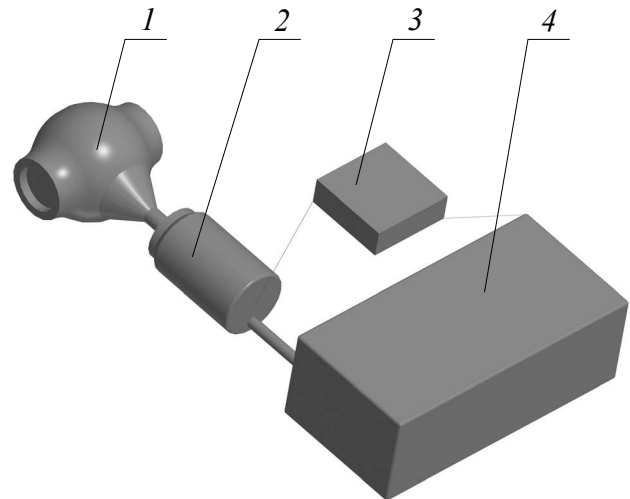
Критерии оптимальности, обоснованные на стадии предпроектных исследований и разработки технического задания на технологическую машину, определяют направления оптимизации на всех последующих этапах создания машины. Критерии, образующие множество частных критериев оптимальности, имеют различные размерности, обычно имеют сложные взаимозависимости и зачастую противоречивы, т.е. улучшение одного критерия неизменно влечет за собой ухудшение другого, что создает наибольшую сложность при решении оптимизационных задач [5].

С учетом вышесказанного задача оптимизации имеет следующую математическую запись [5]:

$$\{O\} \begin{cases} u_1 = f(P_1 \dots P_m) \\ \dots \\ u_n = f(P_1 \dots P_m) \end{cases}$$

где  $\{O\}$  – множество Парето-оптимальных решений,  $u_n$  –  $n$ -й критерий оптимальности,  $P_m$  – набор параметров  $m$  узла; тогда

$$\{O\} \begin{cases} u_1 = f(p_{11}, \dots, p_{1l}; \dots; p_{m1}, \dots, p_{ml}) \\ \dots \\ u_n = f(p_{11}, \dots, p_{1l}; \dots; p_{m1}, \dots, p_{ml}) \end{cases}$$



**Рис. 1.** Основные узлы энергосиловой установки электротранспорта [1]: 1 – редуктор главной передачи, 2 – тяговый электродвигатель, 3 – система управления, 4 – накопитель энергии

где  $p_{ml}$  –  $l$  параметр,  $m$  узла.

Заказчиком, были сформулированы требования, представленные в таблице 1.

Исходя из ограничений, можно сформулировать локальные критерии оптимальности к УМТЭТ, достижение наилучших показателей которых будет достигаться путем оптимизации конструкции энергосиловой установки.

Оставшиеся требования учитываются в процессе оптимизации как заданные ограничения.

Таблица 1

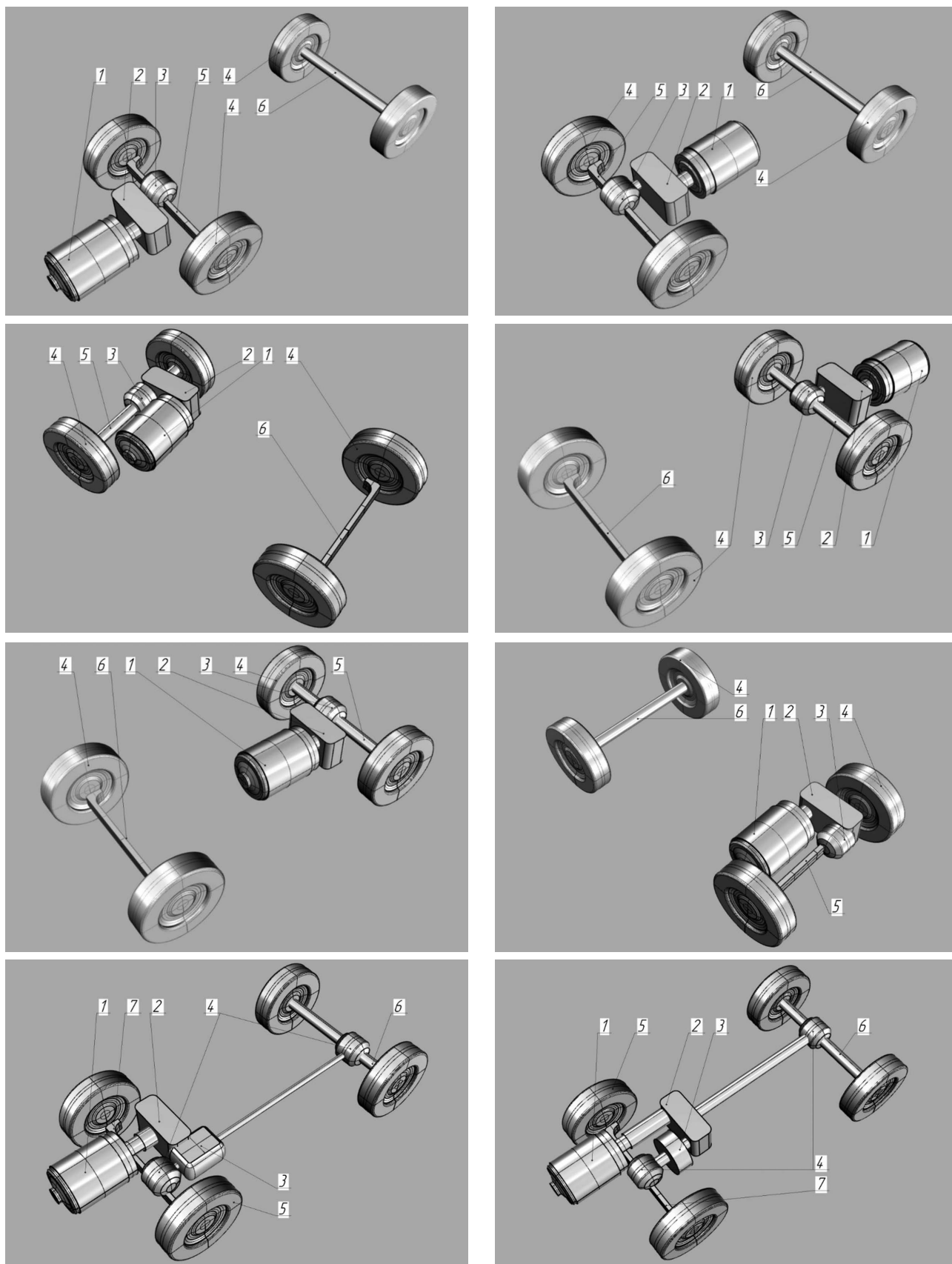
Требования заказчика, описанные в виде ограничений [6]

| № п/п | Наименование                                     | Значение      |
|-------|--------------------------------------------------|---------------|
| g1    | Масса базовая с АКБ и кабиной, кг                | Не более 1500 |
| g2    | Грузоподъемность, кг                             | Не менее 3000 |
| g3    | Время работы, ч                                  | Не менее 8    |
| g4    | Максимальная скорость пустой, км/ч               | Не менее 25   |
| g5    | Максимальная скорость, при полной нагрузке, км/ч | Не менее 20   |
| g6    | Сила тяги на крюке, Н                            | Не менее 5000 |
| g7    | Максимальный преодолеваемый уклон, %             | Не менее 12   |

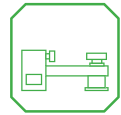
Таблица 2

Локальные критерии оптимальности

| Номер критерия | Наименование                                  | Значение           |
|----------------|-----------------------------------------------|--------------------|
| $u_1$          | Время работы в ездовом цикле, $t$             | Не менее 8 ч       |
| $u_2$          | Максимальная скорость пустой, $V_{п}$         | Не менее 25 км/ч   |
| $u_3$          | Максимальная скорость, полная нагрузка, $V_3$ | Не менее 20 км/ч   |
| $u_4$          | Сила тяги на крюке, $P_{кр}$ Н                | Не менее 5000 Н    |
| $u_5$          | Максимальный преодолеваемый угол, $\alpha$    | Не менее $7^\circ$ |



**Рис. 2.** Возможные варианты компоновочных схем привода УМТЭТ. 1 – тяговый электродвигатель; 2 – колесный редуктор; 3 – дифференциал для вариантов 1–6, раздаточная коробка для варианта 7, муфта включения полного привода для варианта 8; 4 – колесо для вариантов 1–6, колесный редуктор с дифференциалом для вариантов 7, 8; 5 – передний ведущий мост для вариантов 1–3, передний управляемый мост для вариантов 4–6, колесо для вариантов 7, 8; 6 – задний ведущий мост; 7 – передний управляемый мост [4]



Далее необходимо определить влияние изменения входящих параметров на состояние системы, это можно сделать эмпирическим методом, заменяя детали, узлы и управляющие алгоритмы работы, после чего путем корреляционно-регрессионного анализа установить связь.

В этом случае между всевозможными парами параметров необходимо вычислять коэффициент парной корреляции, который характеризует связь между двумя случайными величинами. Если обозначить один параметр через  $y_1$ , а другой – через  $y_2$ , число опытов (измерений) – через  $N$ , т.е. текущий номер опыта  $u = 1, 2, \dots, N$ , то коэффициент парной корреляции  $r$  вычисляется по формуле:

$$r_{y_1, y_2} = \frac{\sum_{u=1}^N (y_{1u} - y_{1cp})(y_{2u} - y_{2cp})}{\sqrt{\sum_{u=1}^N (y_{1u} - y_{1cp})^2 \sum_{u=1}^N (y_{2u} - y_{2cp})^2}},$$

где  $y_{1cp} = \sum_{u=1}^N y_{1u} / N$  и  $y_{2cp} = \sum_{u=1}^N y_{2u} / N$  – средние арифметические [5].

Значения коэффициента парной корреляции  $r_{y_1, y_2}$  могут лежать в пределах от  $-1$  до  $+1$ . Если с ростом значения одного параметра возрастает значение другого, у коэффициента будет знак плюс, а если уменьшается, то знак минус. Чем ближе найденное значение  $r_{y_1, y_2}$  к единице, тем сильнее значение одного параметра зависит от другого. В этом случае в исследованиях (экспериментах) достаточно рассматривать только один из параметров [5].

Для проверки значимости коэффициента парной корреляции нужно сравнить его значение с табличным (критическим) значением  $r$ . Квантили распределения Стьюдента приведены в таблице критических значений коэффициента корреляции Стьюдента [2].

Для пользования этой таблицей нужно знать число степеней свободы  $f = N - 2$  и выбрать определенный уровень значимости, например равный  $\alpha = 0,05$ . Такое значение уровня значимости называют 5 %-ным уровнем риска, что соответствует вероятности верного ответа при проверке нашей гипотезы  $P = 1 - \alpha = 0,95$ , или 95 %. Это значит, что в среднем только в 5 % случаев возможна ошибка при проверке гипотезы [2].

Но далее будет рассмотрен способ, основанный на анализе математических взаимосвязей физических формул.

Математическая формулировка критериев определена следующим образом.

Первый критерий  $u_1$ . Время работы в ездовом цикле  $t$  математически можно описать как процентное соотношение режима нагрузки аккумуляторных батарей и представить в виде формулы:

$$t \geq \frac{E}{\sum_i^n W w_i \tau_i},$$

$$t \rightarrow \max$$

где  $n$  – количество режимов нагружения,  $i$  – номер режима нагружения;  $t$  – полное время смены, (ч);  $w_i$  – потребляемая мощность  $i$ -го режима нагрузки в процентах от режима максимальной нагрузки, (%);  $\tau_i$  – доля времени работы в  $i$ -м режиме, (%);  $E$  – энергия аккумуляторной батареи, (кВт·ч);  $W$  – потребляемая мощность электродвигателя при максимальной нагрузке (кВт).

Второй, третий и пятый критерии  $u_2, u_3$  и  $u_5$ , максимальная скорость пустой  $V_n$  (км/ч), загруженной машины  $V_3$  (км/ч) и максимальный преодолеваемый угол  $\alpha$  (гр) определяются из уравнения мощностного баланса [7]:

$$N_e \eta_{тр} = N_f + N_i + N_g + N_j,$$

где  $N_e \eta_{тр}$  – мощность на ведущих колесах с учетом КПД трансмиссии  $\eta_{тр}$  (кВт);  $N_f$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению колес, которая определяется по формуле [8]:

$$N_f = \frac{P_f V_a}{1000} = \frac{f_a V_a \cos \alpha G_a}{1000}, \text{ (кВт)}$$

где  $V_a$  – скорость движения (м/с);  $P_f$  – сила сопротивления качению колес (кН);  $\alpha$  – угол подъема (град);  $G_a$  – вес автомобиля (Н);  $f_a$  – коэффициент сопротивления качению, зависит от движителя и дорожного покрытия.  $N_i$  – мощность сопротивления подъему, равная [8]:

$$N_i = \frac{P_i V_a}{1000} = \frac{G_a \sin \alpha V_a}{1000}, \text{ (кВт)}$$

где  $P_i$  – сила сопротивления подъему (кН).  $N_g$  – мощность сопротивления воздушной среды, без учета ветра, определяется по формуле [8]:



$$N_b = \frac{P_b V_a}{1000} = \frac{K_o F_a V_a^3}{1000}, \text{ (кВт)}$$

где  $P_b$  – сила сопротивления воздушной среды (кН);  $K_o$  – коэффициент сопротивления воздуха ( $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$ );  $F_a$  – лобовая площадь автомобиля ( $\text{м}^2$ ).

$N_j$  – мощность сопротивления разгону, находится по формуле [8]:

$$N_j = \frac{P_j V_a}{1000} = \frac{G_a j_a \delta_a V_a}{1000 \cdot g}, \text{ (кВт)}$$

где  $P_j$  – сила сопротивления разгону (кН);  $\delta_a$  – коэффициент учета вращающихся масс

автомобиля;  $g$  – ускорение притяжения ( $\sim 9,8 \text{ м/с}^2$ );  $j_a$  – ускорение автомобиля, по формуле [8]:

$$j_a = \frac{D - \Psi}{\delta_a} g, \text{ (м/с}^2\text{)}$$

где  $D$  – динамический фактор автомобиля (кН/кг);  $\Psi$  – коэффициент сопротивления дороги;  $\delta_a$  – коэффициент учета вращающихся масс автомобиля.

С учетом значений мощности, затрачиваемых на преодоление всех видов сопротивлений, уравнение баланса мощностей принимает вид:

$$N_e \eta_{\text{тр}} = \frac{f_a V_a \cos \alpha G_a}{1000} + \frac{G_a \sin \alpha V_a}{1000} + \frac{K_o F V_a^3}{1000} + \frac{G_a j_a \delta_a V_a}{1000 \cdot g}.$$

Из уравнения можно выразить скорость:

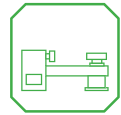
$$V_a = \frac{1}{3 \cdot \sqrt[3]{2} K_o F g} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{729 \cdot 10^6 \cdot N_e^2 \eta_{\text{тр}}^2 K_o^4 F^4 g^4 + 108 K_o^3 F^3 g^3 + 27 \cdot 10^3 \cdot N_e \eta_{\text{тр}} K_o^2 F^2 g^2}{(f_a G_a g \cos(\alpha) + G_a g \sin(\alpha) + G_a \delta_a j_a)^3}} - \frac{\sqrt[3]{2}(f_a G_a g \cos(\alpha) + G_a g \sin(\alpha) + G_a \delta_a j_a)}{\left( \sqrt[3]{\frac{729 \cdot 10^6 \cdot N_e^2 \eta_{\text{тр}}^2 K_o^4 F^4 g^4 + 108 K_o^3 F^3 g^3 + 27 \cdot 10^3 \cdot N_e \eta_{\text{тр}} K_o^2 F^2 g^2}{(f_a G_a g \cos(\alpha) + G_a g \sin(\alpha) + G_a \delta_a j_a)^3}} \right)} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Данное выражение сложно для анализа, поэтому рассмотрим критерии в виде систем уравнений. После преобразования получим следующие системы уравнений для поиска предельной скорости:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_a = \frac{N_f \cdot 1000}{f_a G_3 \cos \alpha} \\ V_a = \frac{N_i \cdot 1000}{G_3 \sin \alpha} \\ V_a = \sqrt[3]{\frac{N_b \cdot 1000}{K_o F_a}} \\ V_a = \frac{N_j \cdot 1000 \cdot g}{G_3 j_a \delta_a} \\ N_e \eta_{\text{тр}} = N_f + N_i + N_b + N_j \end{array} \right. \quad V_3$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_a = \frac{N_f \cdot 1000}{f_a G_{\Pi} \cos \alpha} \\ V_a = \frac{N_i \cdot 1000}{G_{\Pi} \sin \alpha} \\ V_a = \sqrt[3]{\frac{N_b \cdot 1000}{K_o F_a}} \\ V_a = \frac{N_j \cdot 1000 \cdot g}{G_{\Pi} j_a \delta_a} \\ N_e \eta_{\text{тр}} = N_f + N_i + N_b + N_j \end{array} \right. \quad V_{\Pi}$$

$$V_3 \rightarrow \max; V_{\Pi} \rightarrow \max$$



Система для предельного угла подъема из мощностного баланса:

$$\begin{cases} \alpha = \cos^{-1} \frac{N_f * 1000}{f_a G_a V_a} \\ \alpha = \sin^{-1} \frac{N_i * 1000}{G_a V_a} \\ N_e \eta_{тр} = N_f + N_i + N_b + N_j \\ \alpha \rightarrow \max \end{cases}$$

Формула силы тяги на крюке известна [8]:

$$P_{кр} = \frac{M_d i_c \eta_c}{r_k}; P_{кр} \rightarrow \max;$$

где  $P_{кр}$  – сила тяги на крюке (Н);  $M_d$  – момент двигателя (Нм);  $i_c$  – передаточное число трансмиссии;  $\eta_c$  – КПД трансмиссии  $r_k$  – радиус колеса (м).

Локальный оптимум достигается при наибольшем значении  $P_{кр}$ . Тогда в общем виде математическая описание задачи оптимизации ЭСУ УМТЭТ будет выглядеть следующим образом:

$$\{O\} \begin{cases} u_1(p) = t \rightarrow \max \\ u_2(p) = v_o \rightarrow \max \\ u_3(p) = v_3 \rightarrow \max \\ u_4(p) = P_{кр} \rightarrow \max \\ u_5(p) = \alpha \rightarrow \max \\ g_1 \leq 1500 \text{ кг} \\ g_2 \geq 3000 \text{ кг} \\ g_3 \geq 8 \text{ ч} \\ g_4 \geq 25 \text{ км/ч} \\ g_5 \geq 20 \text{ км/ч} \\ g_6 \geq 5000 \text{ Н} \\ g_7 \geq 7^\circ. \end{cases}$$

Для дальнейшего решения задачи необходимо параметры привести в относительную систему координат, а критерий свести к единому  $U(u)$ . Возможны различные способы нормирования. В качестве примера рассмотрим способ логарифмического нормирования, достоинством которого является переход от абсолютных приращений параметров к относительным.

В этом случае  $i$ -й управляемый параметр  $u_i$  преобразуется в безразмерный  $x_i$  следующим образом [7]:

$$x_i = \ln \left( \frac{u_i}{\zeta_i} \right);$$

где  $\zeta_i$  – коэффициент, численно равный единице измерения параметра  $u_i$ . Еще двумя способами

нормирования может быть применение методов статистического анализа через среднее арифметическое [7]:

$$x_i = \frac{u_i}{u_{i \text{ ср}}},$$

где  $u_{i \text{ ср}}$  – среднее арифметическое всех значений  $u_i$  по формуле:

$$u_{i \text{ ср}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_{ij},$$

где  $u_{ij}$  –  $j$ -й управляемый параметр  $u_i$ ; –  $n$  количество всех значений  $u_{ij}$ ; и среднее медианное

$$x_i = \frac{u_i}{\bar{u}_i},$$

где  $\bar{u}_i$  – среднее медианное значение отсортированного ряда  $u_{ij}$ .

Кроме того, критерии могут иметь перпендикулярное направление вектора оптимизации, например, увеличение максимальной достижимой скорости, как правило, приближает получение оптимума, в то время как увеличение времени разгона, напротив, является отрицательным результатом. Для этого можно использовать следующие уравнение [7]:

$$x_i = \frac{u_{ia}}{u_{i \max}} = \frac{u_{i \min}}{u_{ib}},$$

где  $u_{ia}$  – значение возрастающих критериев;  $u_{ib}$  – значение убывающих критериев;  $u_{i \max}$ ,  $u_{i \min}$  – максимальное и минимальное значение критерия. Определить направление движения оптимизации критерия можно следующим образом:

$$\begin{aligned} u_{ia} &\Leftrightarrow \dot{u}_1 \geq [u_i]; \\ u_{ib} &\Leftrightarrow \dot{u}_i \leq [u_i], \end{aligned}$$

где  $\dot{u}_i$  – улучшенные значения критерия,  $[u_i]$  – допустимое значение  $i$ -го критерия.

После формирования условий задачи оптимизации можно приступить к ее решению. Существуют разные способы нахождения оптимума, автором был выбран способ сведения их к единому критерию. Суть этих методов заключается в сведении множества критериев оптимальности к одному посредством различных методик.





К этим методам относятся метод условной максимизации, линейная свертка, методы скаляризации, метод Чебышева и другие. К ним также относятся методы весовых коэффициентов, наиболее распространенные из которых – экспертные методы. Основная идея экспертных методов состоит в том, чтобы использовать интеллект людей, их способность искать и находить решение слабоформализованных задач. В теории экспертных оценок разработан ряд методов проведения экспертизы. Рассмотрим два метода.

1. Метод ранжирования заключается в следующем. Пусть экспертиза проводится группой из  $L$  экспертов, которые являются квалифицированными специалистами в той области, где принимается решение. Метод ранжирования основан на том, что каждого эксперта просят расставить частные критерии проектируемого объекта в порядке их важности. Цифрой 1 обозначают наиболее важный частный критерий, цифрой 2 – следующий по важности частный критерий и т.д. Эти ранги преобразовываются таким образом, что ранг 1 получает оценку  $m$  (число частных критериев), ранг 2 – оценку  $m - 1$  и т.д. до ранга  $m$ , которому присваивается оценка 1. Обозначим полученные оценки  $r_{ik}$ , где  $i$  – это номер  $i$ -го эксперта,  $k$  – это номер  $k$ -го критерия. Тогда результаты опроса экспертов можно свести в таблицу 3 [2].

$$r_i = \sum_{j=1}^L r_{ji}, i = 1, 2, \dots, m.$$

В  $(L+1)$  строке стоят суммы оценок, полученных критериями от экспертов. Тогда весовые коэффициенты определяются следующим образом [2]:

$$\lambda_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^m r_i} - (i = 1, 2, \dots, m).$$

2. Метод приписывания баллов основан на том, что эксперты оценивают важность частного критерия по шкале. При этом разрешается оценивать важность дробными величинами или приписывать одну и ту же величину из выбранной шкалы нескольким критериям. Обозначим через  $h_{ik}$  – балл  $i$ -го эксперта для  $k$ -критерия, тогда

$$r_{ik} = \frac{h_{jk}}{\sum_{k=1}^m h_{jk}}, i = 1, 2, \dots, m;$$

где  $h_{jk}$  – сумма  $i$ -й строки.  $r_{ik}$  – называют весом, подсчитанным для  $k$  критерия  $i$ -м экспертом [2].

Отсюда, учитывая, что  $r_i = \sum_{j=1}^L r_{ji}$ , получим  $\lambda_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^m r_i}$ .

Метод приписывания баллов более трудоемкий в расчетах, но удобнее для экспертной оценки и позволяет дать более точную оценку.

Тогда с учетом экспертных весовых коэффициентов и нормализации математическая формулировка задачи оптимизации принимает следующий вид:

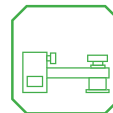
$$\begin{cases} U = \sum_{i=0}^n \left[ \lambda_1 \left( \frac{u_{ia}}{u_{i \max}} \right) + \lambda_2 \left( \frac{u_{i \min}}{u_{ib}} \right) \right] \\ (u_{ia}) \geq [u_i], \\ (u_{ib}) \leq [u_i], \end{cases}$$

где  $U$  – единое приведенное значение критерия для системы,  $i$  – номер критерия,  $n$  – количество вариантов комбинаций узлов,  $\lambda_1$  – экспертный весовой коэффициент  $i$ -го возрастающего критерия;  $\lambda_2$  – экспертный весовой коэффициент  $i$ -го убывающего критерия  $u$ ,  $[u_i]$  – допустимое значение  $i$ -го критерия,  $u_{ia}$  – значение возрастающих критериев,  $u_{ib}$  – значение

Таблица 3

Сводная таблица результатов опроса экспертов [2]

| Эксперты        | Критерии |          |          |          |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
|                 | $F_1$    | $F_2$    | $\dots$  | $F_m$    |
| 1               | $r_{11}$ | $r_{12}$ | $\dots$  | $r_{1m}$ |
| 2               | $r_{21}$ | $r_{22}$ | $\dots$  | $r_{2m}$ |
| $\vdots$        | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ |
| $L$             | $r_{L1}$ | $r_{L2}$ | $\dots$  | $r_{Lm}$ |
| $\Sigma$ оценок | $r_1$    | $r_2$    | $\dots$  | $r_m$    |



убывающих критериев,  $u_{i \max}$ ,  $u_{i \min}$  – максимальное и минимальное значение критерия;  $\dot{u}_{la}$ ,  $\dot{u}_{lb}$  – улучшенные значения критерия.

Тогда после преобразований получим итоговую формулу, которая имеет следующий вид:

$$\begin{cases} U = \lambda_1 \left( \frac{u_1}{u_{1 \max}} \right) + \lambda_2 \left( \frac{u_2}{u_{2 \max}} \right) + \\ + \lambda_3 \left( \frac{u_3}{u_{3 \max}} \right) + \lambda_4 \left( \frac{u_4}{u_{4 \max}} \right) + \lambda_5 \left( \frac{u_5}{u_{5 \max}} \right) \rightarrow \max \\ g_{1...7} \leq 1 \end{cases}$$

При нахождении максимального значения приведенного критерия можно говорить о достижении оптимальности конструкции энергосиловой установки машины технологического электротранспорта.

### Заключение

В ходе работы была разработана методика получения оптимальных эксплуатационных характеристик технологического электротранспорта путем применения в его конструкции наиболее рациональной (оптимальной) конструкции энергосиловой установки для произвольных критериев.

Следующим шагом является формирование параметрической базы из возможных параметров и определение итоговой конфигурации машины. Разработанная методика может применяться не только для разработки электромотов, но и для принятия наилучшего решения во многих проектах, например:

- при проектировании гибридного автомобиля с комбинированной энергосиловой установкой [8–10];
- при проектировании узлов и агрегатов машин [11];
- при оптимизации загрузки производственных мощностей предприятия [5];
- при внедрении методов бережливого производства и сокращения издержек предприятия [2].

И даже для решения качественных задач, таких как повышение комфорта эксплуатации автомобиля [12].

Применение подобных методик проектирования позволяет увеличить скорость проектирования объектов, уменьшает издержки постановки на производство и позволяет

улучшать показатели изделия без ухудшения других характеристик.

Результатом продвинутого моделирования является цифровой двойник изделия и производства, на этом уровне автоматический анализ может давать не только информацию об оптимальных характеристиках, но и выстраивать сложные прогностические модели, что дает предприятию существенное рыночное преимущество.

### Список литературы

1. Музафаров Э. Р., Филькин Н. М. Основы создания методики оптимизации энергосиловой установки технологической машины электротранспорта. В сб.: Выставка инноваций – 2020 (осенняя сессия). Сборник материалов XXX Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. 2021. С. 120–123.
2. Фасхиев Х. А., Нуретдинов Д. И. Экономическая эффективность, качество и конкурентоспособность транспортных средств: учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение». Набережные Челны, 2009.
3. Филькин Н. М. и др. Унифицированная платформа наземного электротранспорта. Патент на промышленный образец 102998. Приоритет промышленного образца 13.04.2017 г.
4. Музафаров Э. Р., Филькин Н. М. Обоснование выбора компоновочной схемы привода унифицированной машины технологического электротранспорта. В сб.: Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства: мат-лы IV Всероссийской научно-практической конференции. Ижевск, 2020. С. 74–80.
5. Музафаров Э. Р., Музафаров Р. С., Филькин Н. М. Разработка математической модели и оптимизация загрузки производственных мощностей: мат-лы V Всероссийской научно-практической конференции «Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства», Ижевск: ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2021.
6. Филькин Н. М., Тарасова М. А., Музафаров Э. Р. Создание унифицированной



машины технологического электротранспорта. Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2019. Т. 1. С. 132–135.

7. Умняшкин В. А., Филькин Н. М., Музафаров Р. С. Теория автомобиля: учеб. пособие. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2006. 272 с.

8. Умняшкин В. А., Филькин Н. М., Музафаров Р. С. Выбор мощности тягового электродвигателя, двигателя внутреннего сгорания и параметров накопителей гибридных силовых установок автомобилей: учеб. пособие. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. 137 с.

9. Якимович Б. А., Филькин Н. М., Музафаров Э. Р., Музафаров Р. С., Заварзин А. А., Домбрачев А. Н. Привод наземного транспортного средства на электротяге. Патент на полезную модель RU 180266 U1, 07.06.2018. Заявка № 2017138881 от 08.11.2017 г.

10. Якимович Б. А., Филькин Н. М., Музафаров Э. Р., Музафаров Р. С., Заварзин А. А., Домбрачев А. Н. Силовой агрегат наземного транспортного средства на электротяге. Патент на полезную модель RU 179362 U1, 11.05.2018. Заявка № 2017140293 от 20.11.2017 г.

11. Филькин Н. М., Музафаров Э. Р., Музафаров Р. С., Заварзин А. А., Домбрачев А. Н., Ефремов В. Н., Коршунов А. И., Кузнецов С. В., Каданин П. Ю. Накопитель электрической энергии. Патент на полезную модель RU 183395 U1, 21.09.2018. Заявка № 2017122099 от 22.06.2017 г.

12. Филькин Н. М., Музафаров Э. Р., Музафаров Р. С., Домбрачев А. Н. Панель управления транспортного средства технологического назначения на электротяге. Патент на полезную модель RU 185067 U1, 19.11.2018. Заявка № 2018123405 от 27.06.2018 г.

## Об авторе

**Музафаров Эльдар Раисович** – аспирант Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова, сотрудник акционерного общества «Ижевский электромеханический завод «Купол», Ижевск, Российская Федерация.

Область научных интересов: колесные и гусеничные машины, численные методы оптимизации.

## Methods of optimisation in machine design

Muzafarov E. R.

*Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation  
Izhevsk Electromechanical Plant Kupol, JSC, Izhevsk, Russian Federation*

The paper is devoted to the problem of optimal machine design selection by developing and solving the problem of multi-criteria optimisation, using the method suggesting a unified criterion with the use of weighting factors based on expert estimates. Based on the example of the design of a multi-purpose machine for service electric transport, a mathematical model of parametric optimisation of the design of electric and combined propulsion plants is developed. The most efficient system components are selected to meet the customer's requirements.

**Keywords:** transport vehicles design and engineering, electric propulsion plant, electric transport, optimal design methods, optimisation in machine building.

## Information about the author

**Muzafarov Eldar Raisovich** – Postgraduate Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk Electromechanical Plant Kupol, JSC, Izhevsk, Russian Federation.

Science research interests: wheeled and tracked vehicles, numerical methods of optimisation.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-67-75>

УДК 004.414.23

## Виртуализация ОС «Эльбрус»

С. А. Рыбаков

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА – Российский технологический университет", Москва, Российская Федерация*

*Акционерное общество «МЦСТ», Москва, Российская Федерация*

Важнейшим шагом на пути к высокопроизводительным и безопасным системам виртуализации является добавление аппаратной поддержки этой технологии в микропроцессорах. В статье представлен обзор адаптированных для архитектуры «Эльбрус» методов виртуализации с учетом аппаратной поддержки, добавленной в микропроцессорах нового поколения «Эльбрус-16С».

**Ключевые слова:** виртуализация, вычислительный ресурс, параллельное исполнение, операционная система, гипервизор

**Для цитирования:** Рыбаков С. А. Виртуализация ОС «Эльбрус» // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 4. С. 67–75. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-67-75>

**For citation:** Rybakov S. A. Elbrus OS Virtualization// Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 4. P. 67–75. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-67-75>

*Поступила 03.03.2021 Отрецензирована 16.03.2021 Одобрена 11.11.2021 Опубликовано 27.12.2021*

### Введение

Виртуализация – это технология предоставления абстрагированного от аппаратного обеспечения набора вычислительных ресурсов, памяти и ресурсов ввода-вывода логически изолированным вычислительным процессам. Слой программного обеспечения, обеспечивающий параллельное исполнение и изоляцию вычислительных процессов, а также эмуляцию для них аппаратных ресурсов, называется гипервизором. Технология виртуализации позволяет запустить на одном сервере несколько независимых операционных систем (ОС), повышая таким образом степень утилизации вычислительных ресурсов этого сервера. Легкость масштабирования виртуальной инфраструктуры привела к широкому применению этой технологии при организации облачных вычислений. В статье приведено описание основных программных и аппаратных средств поддержки виртуализации архитектуры «Эльбрус».

### Паравиртуализация и полная виртуализация

Паравиртуализация – это техника виртуализации, при которой гостевая ОС подготавливается к исполнению в виртуализированной среде, для чего ее ядро незначительно модифицируется. При паравиртуализации привилегированные инструкции, исполнение которых запрещено в гостевом режиме, подменяются на гипервызовы – прямые передачи управления гипервизору. Достойной производительности гостевых систем позволяет добиться характерная паравиртуализации оптимизация: замена одним гипервызовом нескольких последовательных привилегированных инструкций. Однако применение паравиртуализации ограничивается возможностью модификации кодов ОС.

Полной виртуализацией называется техника виртуализации, при которой гостевые ОС запускаются без изменений. При этом запрещенные для гостя привилегированные инструкции гипервизор обязан либо подменить с помощью двоичной трансляции, либо прервать и эмулировать. По производительности



полная виртуализация уступает паравиртуализации, особенно в области виртуализации ввода-вывода. Этот недостаток часто компенсируется установкой дополнительных, паравиртуализированных драйверов устройств в гостевые ОС.

### Гипервизор *QEMU-KVM*

В ОС «Эльбрус» в роли гипервизора выступает связка пользовательского приложения *QEMU (Quick Emulator)* [1] и модулей ядра ОС *Linux KVM (Kernel Virtual Machine)* [2]. При этом *QEMU* отвечает в основном за начальную настройку ВМ и эмуляцию ввода-вывода, а *KVM* – за предоставление ВМ вычислительных ресурсов и эмуляцию гостевой виртуальной памяти (поддержание актуальности таблиц страниц). Для передачи управления в *KVM QEMU* использует специальные системные вызовы *IOCTL (Input/Output Control)*.

Каждый процесс *QEMU* эмулирует одну виртуальную машину. Гостевые вычислительные ядра (*vCPU*) и виртуальные устройства ввода-вывода эмулируются отдельными потоками процесса *QEMU*, исполняющимися параллельно. Оперативная память ВМ эмулируется с помощью виртуальной памяти процесса *QEMU*.

В отличие от автономных гипервизоров типа 1, запускаемых непосредственно на аппаратном обеспечении, приложение *QEMU*, запускаемое поверх ОС (называемой хостовой), является гипервизором 2-го типа. Однако благодаря модулям *KVM*, имеющим прямой доступ к оборудованию, достигается высокий уровень производительности виртуализации, не уступающий гипервизорам 1-го типа.

### Аппаратная поддержка виртуализации в микропроцессорах «Эльбрус»

Добавленная в микропроцессорах «Эльбрус-16С» нового поколения аппаратная поддержка виртуализации [3] позволяет достичь полной виртуализации системы и запускать ОС «Эльбрус» без изменений. Добавление слоя динамической двоичной трансляции между *QEMU* и гостевой ОС позволяет запускать в ВМ ОС *Linux* или *Windows* архитектуры *Intel x86*. Аппаратная поддержка также улучшает

защиту и производительность режима паравиртуализации. Рассмотрим подробнее три области, в которых были проведены аппаратные доработки: средства виртуализации вычислительных ресурсов, памяти и ввода-вывода.

### Виртуализация вычислительных ресурсов

Основной цикл запуска ВМ гипервизором изображен на рисунке 1. После начальной настройки ВМ *QEMU* передает управление в *KVM*, где программно переключается часть рабочего состояния (пассивный контекст) гипервизор-гость. Переключение оставшегося и наиболее критичного активного контекста производится атомарно, при выполнении новой инструкции запуска гостя *glaunch*. Атомарность переключения контекста достигается за счет введения дублирующего комплекта регистров (теневое контекста) и аппаратного переключения ролей активного и теневого контекста при входе и выходе из гостевого режима. В активный контекст входят регистры, необходимые для работы гипервизора во время запуска гостя, например указатели на стеки и таблицы страниц. Реализация переключений контекстов «Эльбрус» ближе к варианту *MIPS VM* [4], чем вариантам *Intel* [5] и *AMD* [6], производящим атомарное переключение при помощи структуры данных в памяти.

В предыдущих поколениях микропроцессоров «Эльбрус» были определены два режима исполнения: привилегированный (для ядра ОС) и пользовательский (для прикладных программ). В микропроцессорах «Эльбрус-16С» поддержано два новых режима: гостевой привилегированный и гостевой пользовательский. И если отличий гостевого пользовательского режима от обычного практически нет, то на гостевой привилегированный режим накладываются дополнительные ограничения: ряд действий в этом режиме приводит к принудительному возврату в гипервизор, перехвату (аналог *VM-Exit* в *Intel VMX* [5], *VMEXIT* в *AMD SVM* [6] и *Hypervisor trap* в *ARM* [7]).

Перехваты возникают при попытке гостя выполнить привилегированное действие (например, доступ к устройству ввода-вывода), при возникновении некоторых особых ситуаций на стороне гипервизора (например,



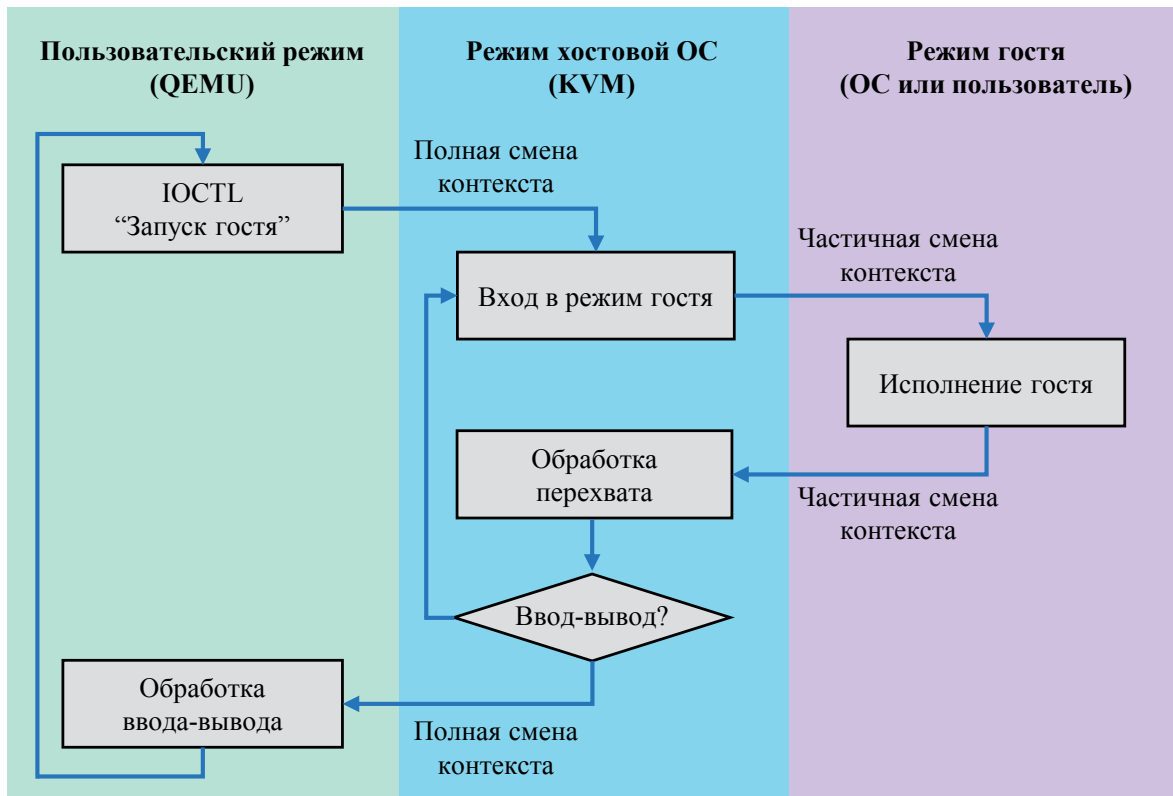


Рис. 1. Цикл запуска ВМ гипервизором QEMU-KVM

прерывание или отказ страницы), а также при доступе гостя к ресурсам виртуализации (вложенная виртуализация не поддерживается). Главной задачей гипервизора является устранение причины перехвата и перезапуск гостя – для этого причина всегда сохраняется на специально введенных регистрах *intc\_info*.

В качестве оптимизации при входе в перехват пассивный контекст переключается лишь частично. И если причину удастся устранить в KVM, то после обратного переключения контекста гость перезапускается. Если же при обработке перехвата требуется выход в QEMU (для эмуляции ввода-вывода), то переключается и оставшаяся часть пассивного контекста. Таким образом, с точки зрения производительности перехваты с выходом в QEMU являются значительно более тяжелыми.

Механизм паравиртуальных гипервизоров был также поддержан аппаратно командами *hcall* (аналог *VMMCALL* в AMD [6]) и *hret*. Использование новых команд вместо системных вызовов для явного вызова гипервизора из гостевой ОС позволяет полноценно использовать новые гостевые режимы исполнения

и повысить защиту паравиртуализации, а также сэкономить на переключении контекстов.

### Виртуализация подсистемы памяти

Физическая память виртуальной машины эмулируется гипервизором с помощью виртуальной памяти QEMU. Таким образом, при виртуализации можно различить четыре основных типа адресов: системные физические HPA (*Host Physical Address*), системные виртуальные HVA (*Host Virtual Address*), гостевые физические GPA (*Guest Physical Address*) и гостевые виртуальные GVA (*Guest Virtual Address*). В новом поколении процессоров «Эльбрус» поддержаны два механизма трансляции гостевых адресов в системные физические: теневого и двухуровневый.

При трансляции гостевых адресов в теневом режиме (рис. 2) не используется формируемая гостевой ОС таблица страниц (ТС): вместо нее работает формируемая гипервизором теньевая таблица страниц. Поскольку процесс поиска изменений в гостевой ТС может быть достаточно долгим, гостевая ТС полностью закрывается по записи, каждое изменение ТС гостем (запись элемента ТС PTE,

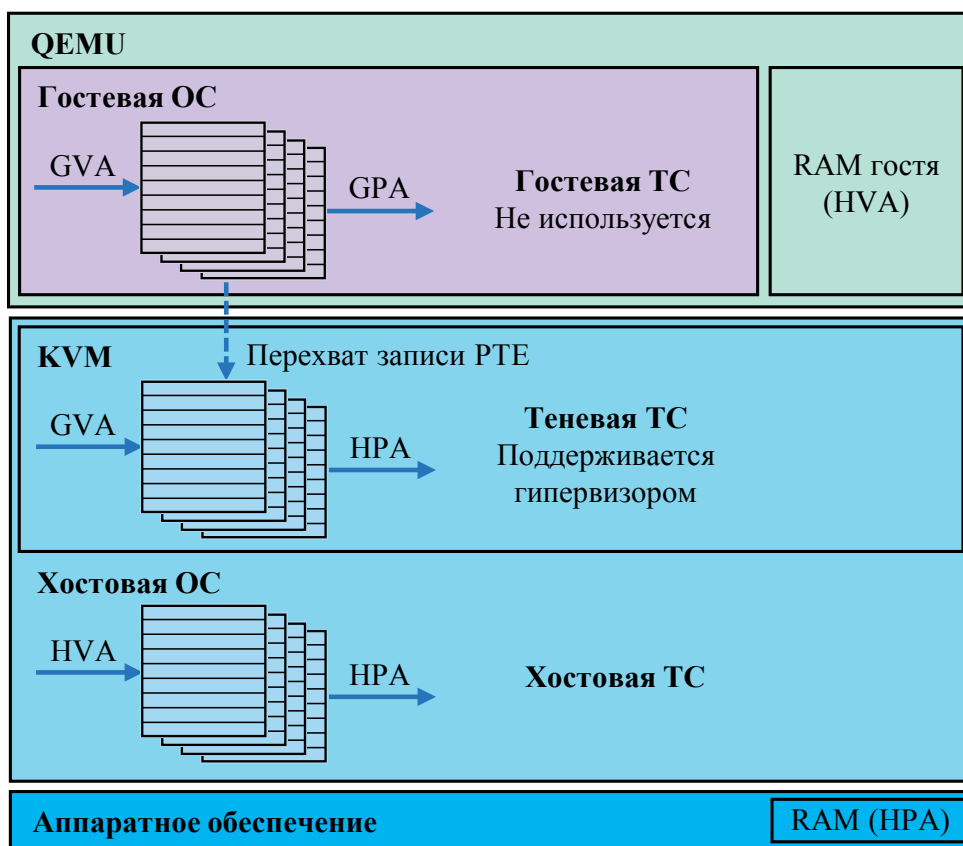


Рис. 2. Трансляция адресов по теневым таблицам страниц

Page Table Entry) перехватывается и отображается в теневой таблице. Программный механизм теневой трансляции используется для паравиртуализации на многих архитектурах (например, *Intel Virtual TLB* [5]), но в архитектуре «Эльбрус» этот механизм поддержан и аппаратно. Это позволяет кэшировать промежуточные и конечные результаты гостевых трансляций, увеличивая производительность паравиртуализации.

При полной виртуализации гипервизор не должен вмешиваться в организацию гостевой ТС. Механизм двухуровневой трансляции адресов (*Two-Dimensional Paging, TDP*) позволяет транслировать гостевые адреса в два независимых этапа: трансляция *GVA-GPA* производится по гостевым таблицам, а трансляция *GPA-HPA* – по таблицам гипервизора (рис. 3). Аналогичные механизмы двухуровневой трансляции есть и на других архитектурах: *EPT* [5], *Nested Paging* [6] и *Two-Stage Address Translation* [7]. Главным недостатком этого механизма по сравнению с теневыми таблицами является введение дополнительных ступеней трансляции для каждого уровня таблиц гостя,

что значительно увеличивает суммарное число шагов трансляции адреса.

### Виртуализация подсистемы ввода-вывода

Большинство устройств, предоставляемых гипервизором в пользование виртуальным машинам, являются программными моделями, независимыми от реального аппаратного обеспечения сервера. Подход, при котором виртуальный ввод-вывод полностью отделяется от физического, называется интерпозицией ввода-вывода [8].

При интерпозиции гипервизор получает возможность гибкой настройки ввода-вывода ВМ с точностью до конкретных моделей и свойств каждого отдельного устройства. При этом для эмуляции нескольких виртуальных устройств можно использовать одно физическое, консолидируя таким образом физический ввод-вывод. И наоборот, одна модель с лучшими характеристиками производительности и отказоустойчивости может обслуживаться несколькими реальными устройствами. Наконец, состояние программной модели устройства, доступное гипервизору

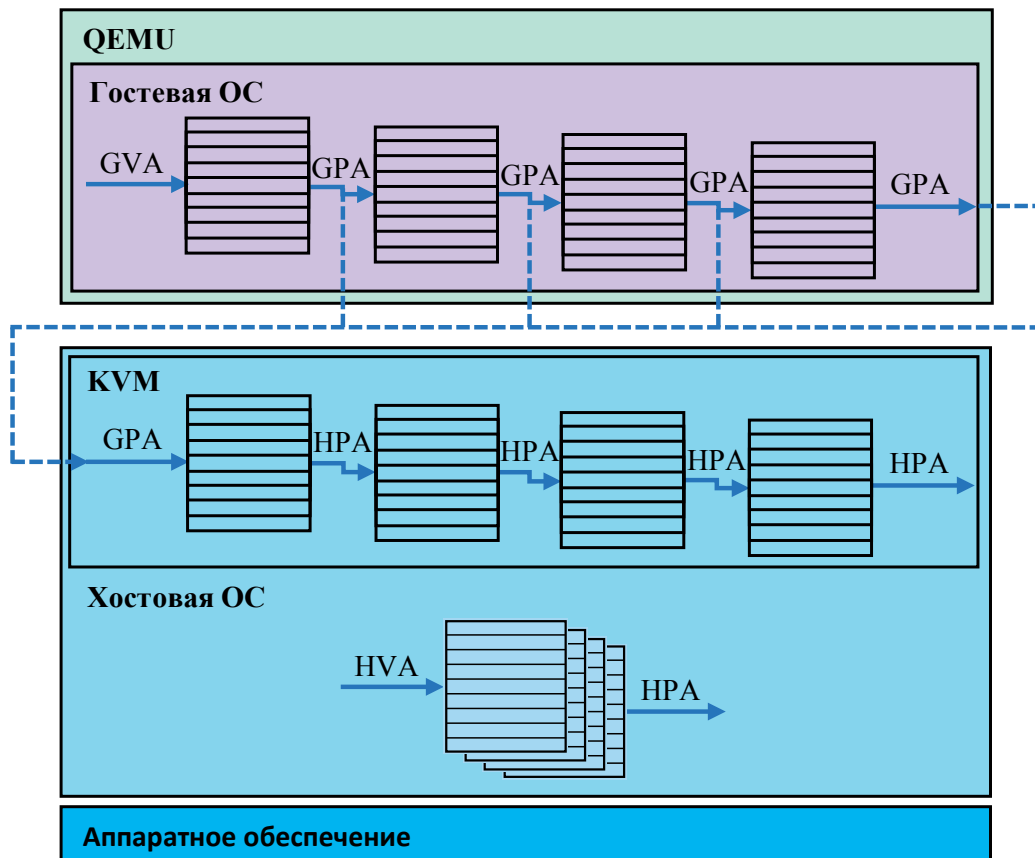


Рис. 3. Двухуровневая трансляция адресов

в произвольный момент времени, может быть легко сохранено в виде файла и позднее восстановлено при перезапуске ВМ.

### Эмуляция ввода-вывода

Эмулятор *QEMU* содержит большое число моделей устройств ввода-вывода, доступных для использования в виртуальных машинах. При этом доступ драйверов гостевой ОС к регистрам устройства обеспечивается через перехваты, доставка прерываний гостю осуществляется через *KVM*, а механизм *DMA* (*Direct Memory access*) эмулируется благодаря тому, что модель и гостевая ОС работают на общей виртуальной памяти процесса *QEMU*. Однако из-за частых тяжеловесных перехватов с выходом в *QEMU* производительность работы с эмулируемым устройством часто оказывается неоптимальной.

### Virtio – паравиртуализация ввода-вывода

Вместо эмуляции реальных устройств гипервизор *QEMU-KVM* позволяет гостям работать со специальными виртуальными устройствами,

предназначенными для эффективной виртуализации, – *virtio* [9]. Использование *virtio* позволяет значительно уменьшить число перехватов и гостевых прерываний, однако требует установки дополнительных, паравиртуальных драйверов в гостевые системы. Для поддержки *virtio* в ОС Эльбрус были включены и адаптированы соответствующие драйверы диска, сетевого адаптера и серийного порта.

### Прямое назначение (проброс) устройства

Наибольшей производительности ввода-вывода в ВМ можно добиться, передав гостю в монопольное пользование физическое устройство. При этом приходится отказаться от всех преимуществ интерпозиции. В частности, метод прямого назначения устройства плохо масштабируется: в отличие от виртуальных устройств, генерируемых гипервизором по необходимости, реальных устройств на любом сервере может быть лишь ограниченное количество.

Для обеспечения безопасного проброса устройства гостю необходима аппаратная поддержка виртуализации. Во-первых, работать



с устройством ВМ будет по гостевым адресам (*GVA/GPA*), которые необходимо транслировать в системные (*HPA*). Во-вторых, гость получает возможность, по ошибке либо намеренно, работать с чужой памятью по *DMA* либо генерировать некорректные *MSI*-прерывания (*Message Signaled Interrupts*).

Функциональность и безопасность проброша в проектах «Эльбрус» обеспечиваются блоком *IOMMU* (*Input/Output Memory Management Unit*) и контроллером прерываний *EPIC* (*Elbrus Programmable Interrupt Controller*) [10]. По аналогии с *MMU* (*Memory Management Unit*), *IOMMU* поддерживает режим двухмерной трансляции *DMA* адресов с трансляцией *GVA-GPA* по гостевым таблицам, а *GPA-HPA* – по гипервизорным. Защита от вредоносного поведения проброшенного устройства осуществляется за счет использования для каждого *PCI* (*Peripheral Component Interconnect*) устройства отдельной таблицы страниц. *EPIC* осуществляет изоляцию, маршрутизацию и прямую доставку прерываний от устройства гостевой ОС.

Работа с устройством по гостевым адресам *DMA* порождает еще одну проблему. Во избежание отказов страниц при *DMA* драйвер устройства подкачивает и фиксирует в памяти (резидентизирует) все страницы выделяемого буфера. Таким образом, при пробросе гипервизору необходимо резидентизировать всю гостевую физическую память, которая может быть использована для *DMA*. Другими словами, вместе с устройством гипервизор передает гостю в монопольное пользование часть своей оперативной памяти и теряет возможность оптимизации этой памяти.

Механизм трансляции *DMA* адресов в *IOMMU* «Эльбрус» в целом схож с аналогом

*AMD* [11], однако имеется и несколько отличий. Во-первых, на «Эльбрусе» доступно только 3 фиксированных размера страниц: 4 Кб, 2 Мб и 1 Гб, в отличие от произвольного (кратного 4 Кб) размера страниц на *AMD*. Во-вторых, на «Эльбрусе» не поддерживается интерфейс *PASID PCI Express* (*Process Address Space ID*, идентификаторы адресного пространства процесса). Таким образом, трансляция *DMA* от нескольких устройств, проброшенных одной ВМ, будет производиться по единой ТС, без изоляции этих устройств друг от друга.

Сравнение всех трех рассмотренных методов виртуализации ввода-вывода приведено в таблице.

### Виртуализация прерываний

Независимо от выбранного метода виртуализации ввода-вывода гипервизор обязан доставлять гостевой ОС прерывания от предоставленных ей устройств. Однако в отсутствие аппаратной поддержки программная доставка гостевых прерываний приводит к значительным потерям производительности ВМ. Во-первых, для доставки прерывания гостевому *vCPU* гипервизор обязан снять его с исполнения. Во-вторых, при обработке прерывания гостевая ОС неоднократно обращается к контроллеру прерываний (в частности, для определения вектора прерывания и для сигнала об окончании обработки прерывания), что также приводит к перехвату или гипервызову. По аналогии с многими другими архитектурами, в ОС «Эльбрус» применяется программная оптимизация: модель контроллера прерываний реализована в модулях *KVM* во избежание тяжеловесного переключения контекста при выходе в *QEMU*.

Таблица

Сравнение методов виртуализации ввода-вывода

| Метод виртуализации ввода-вывода                         | Эмуляция устройства | Virtio  | Прямое назначение устройства |
|----------------------------------------------------------|---------------------|---------|------------------------------|
| Необходимость установки паравиртуализированных драйверов | Нет                 | Да      | Нет                          |
| Необходимость аппаратной поддержки                       | Нет                 | Нет     | Да                           |
| Преимущества интерпозиции ввода-вывода                   | Да                  | Да      | Нет                          |
| Оптимизация гостевой памяти гипервизором                 | Да                  | Да      | Нет                          |
| Масштабируемость                                         | Высокая             | Высокая | Низкая                       |
| Производительность                                       | Низкая              | Высокая | Максимальная                 |



В то же время аппаратная поддержка позволяет еще сильнее увеличить производительность гостевой системы.

В микропроцессорах «Эльбрус» нового поколения регистры контроллера прерываний *EPIC* были продублированы на каждом вычислительном ядре [12], что позволило разрешить гостю работать с копиями регистров напрямую, без перехватов. При снятии гостя с исполнения (выходе в *QEMU* либо смене процесса планировщиком) гипервизор сохраняет контекст *EPIC* в память. При этом атомарность переключения гостевого контекста *EPIC* поддерживается аппаратно. Гостевые прерывания также отличаются от гипервизорных на аппаратном уровне, и если прерывания гипервизора могут прервать исполнение гостя (вызвать перехват), то гостевые прерывания никак не влияют на работу гипервизора. Если при доставке гостевого прерывания целевой *vCPU* оказывается снят с исполнения, то прерывание сохраняется в оперативную память и доставляется в момент постановки *vCPU* на физическое ядро.

Механизм виртуализации прерываний с полным дублированием регистров контроллера «Эльбрус» отличается от аналога в архитектуре *Intel* [13], где гостевые запросы к регистрам контроллера сводятся к обращениям в оперативную память с аппаратной эмуляцией побочных эффектов для отдельных регистров.

### Сравнение показателей производительности

Для оценки производительности ВМ использовался бенчмарк *UnixBench* версии 5.1.2. Тесты были запущены дважды: внутри ВМ и напрямую на сервере, без слоя виртуализации. Каждый тест *UnixBench* запускался в 16 экземплярах, равномерно загружая таким образом всю машину. Сервер и ВМ были сконфигурированы идентично с точки зрения как аппаратного, так и программного обеспечения. При этом каждое из 16 ядер ВМ было привязано к соответствующему реальному ядру микропроцессора «Эльбрус-16С». Ввод-вывод на ВМ осуществлялся через *virtio*. Версия гипервизора *QEMU* 2.8.0, *Linux/KVM* 5.4.143-rt63. Результаты замеров изображены на рисунке 4.

Ожидаемо вычислительные тесты *Dhrystone 2* и *Whetstone* не показали значимого понижения производительности в ВМ. Худшие результаты показали тесты скорости копирования файлов: замедление при работе с *virtio* достигло 13 %. Тесты производительности ядра ОС показали замедление от 4 до 11 % в зависимости от числа необходимых перехватов. Понижение общего индекса производительности системы составило 7,8 %.

### Выводы

В статье представлены программные решения, основанные на гипервизоре *QEMU-KVM*,

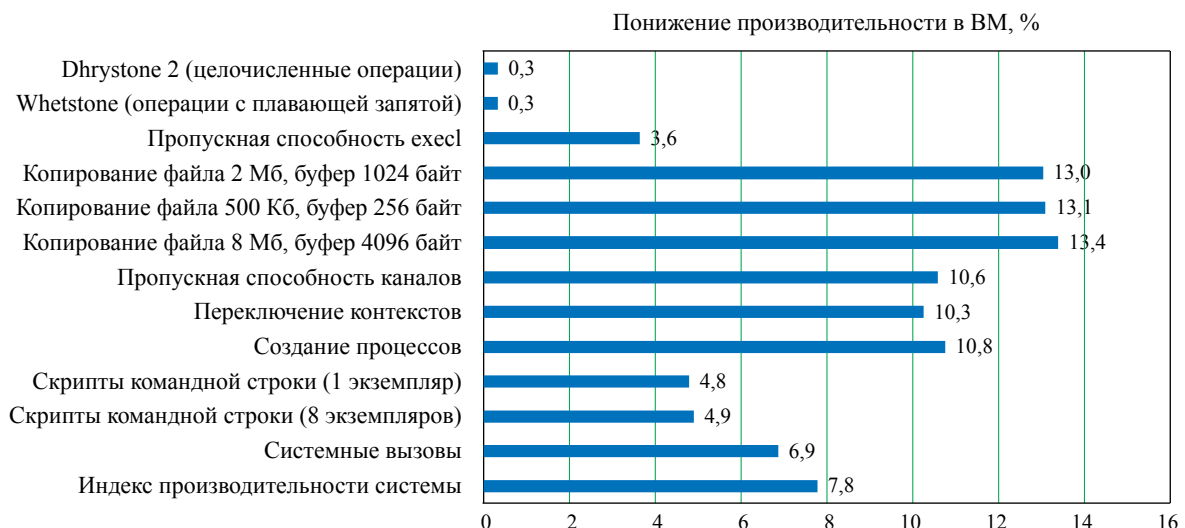


Рис. 4. Понижение показателей производительности тестов *UnixBench* в ВМ





а также аппаратные доработки архитектуры «Эльбрус», направленные на поддержку режима полной виртуализации, улучшение защиты режима паравиртуализации и повышение производительности обоих режимов. Аппаратные решения включают: новые режимы исполнения и переходы между ними, механизмы теневой и двухуровневой трансляции виртуальных адресов, двухуровневую трансляцию *DMA* адресов, изоляцию устройств ввода-вывода друг от друга, а также изоляцию, маршрутизацию и доставку гостевых прерываний. Совокупный результат представленных новаций соответствует уровню передовых разработок архитектур *x86* (Intel и AMD), *MIPS* и *ARM*.

### Список литературы

1. Bellard F. QEMU, a Fast and Portable Dynamic Translator // Proceedings of the FREENIX Track: 2005 USENIX Annual Technical Conference. P. 41–46.
2. Kivity A., Kamay Y., Laor D. et al. KVM: The Linux virtual machine monitor // Proceedings of the 2007 Ottawa Linux Symposium (OLS). 2007. P. 225–230.
3. Знаменский Д. В., Блинников А. В. Аппаратная поддержка виртуализации архитектуры «Эльбрус» // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 5. С. 60–66.
4. MIPS64® Architecture for Programmers Volume IV-i: Virtualization Module of the MIPS64® Architecture, Document Number: MD00847 Revision 1.06, December 10, 2013. URL: <https://www.mips.com/?do-download=virtualization-module-of-the-mips64-architecture> (дата обращения: 27.02.2021).
5. Intel® 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual Volume 3C: System Programming Guide, Part 3, Order Number: 326019-060US, September 2016. URL: <https://www.intel.ru/content/dam/www/public/us/en/documents/manuals/64-ia-32-architectures-software-developer-vol-3c-part-3-manual.pdf> (дата обращения: 27.02.2021).
6. AMD64® Architecture Programmer's Manual Volume 2: System Programming, rev.3.33, AMD Corp., 2020. URL: <https://www.amd.com/system/files/TechDocs/24593.pdf> (дата обращения: 27.02.2021).
7. Arm® Instruction Set Version 1.0 Reference Guide, Issue 0100-00, 25 October 2018. URL: [https://static.docs.arm.com/100076/0100/arm\\_instruction\\_set\\_reference\\_guide\\_100076\\_0100\\_00\\_en.pdf](https://static.docs.arm.com/100076/0100/arm_instruction_set_reference_guide_100076_0100_00_en.pdf) (дата обращения: 27.02.2021).
8. Bugnion, E., Nieh, J., Tsafir, D. Hardware and Software Support for Virtualization. Synthesis Lectures on Computer Architecture. 2017.
9. Russell R. Virtio: towards a de-facto standard for virtual I/O devices // ACM SIGOPS Operating Systems Review 42, 5. 2008. P. 95–103.
10. Рыбаков С. А., Поляков Н. Ю. Виртуализация подсистемы ввода-вывода микропроцессоров «Эльбрус» // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 3. С. 34–39.
11. AMD I/O Virtualization Technology (IOMMU) Specification Revision 2.0. 2011. URL: <http://developer.amd.com/wordpress/media/2012/10/48882.pdf> (дата обращения: 27.02.2021).
12. Рыбаков С. А., Деменко Р. В. Виртуализация подсистемы прерываний микропроцессоров «Эльбрус» // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 5. С. 68–72.
13. Intel Virtualization Technology for Directed I/O (VT-d) Architecture Specification. October 2014. URL: <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/product-specifications/vt-directed-io-spec.pdf> (дата обращения: 27.02.2021).

### Об авторе

**Рыбаков Степан Андреевич** – аспирант федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», старший программист акционерного общества «МЦСТ», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: виртуализация операционных систем.



## Elbrus OS Virtualization

Rybakov S. A.

*RTU MIREA, Moscow, Russian Federation*

*MCST JSC, Moscow, Russian Federation*

A milestone on the way towards high-performance and secure virtualization systems is the implementation of hardware support for this technology in microprocessors. The article provides an overview of the virtualization methods adapted for the Elbrus architecture, taking into account the hardware support implemented in the next generation Elbrus-16S microprocessors.

**Keywords:** virtualization, computational resource, parallel execution, operating system, hypervisor

---

### Information about the author

**Rybakov Stepan Andreyevich** – Postgraduate Student, RTU MIREA, Senior Programmer, MCST JSC, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: operating system virtualization.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-76-93>

УДК 621.391.812.7

## Моделирование отражательных характеристик осесимметричных радиолокационных объектов методом интегральных уравнений

А. А. Рунов

Публичное акционерное общество «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел», Москва, Российская Федерация

Разработаны методика и программное обеспечение расчета радиолокационной эффективной поверхности рассеяния осесимметричных объектов – тел вращения на основе метода интегральных уравнений первого рода для электрического поля. Предложены алгоритмы вычислений матрицы взаимных сопротивлений и функции Грина кольцевого источника, обеспечивающие их точность, необходимую для получения устойчивого решения. Предложен способ оценки точности аппроксимации решения азимутальными гармониками. Приведено сравнение с тестовыми примерами и показана применимость для решения практических задач.

**Ключевые слова:** дифракция электромагнитных волн, эффективная поверхность рассеяния, метод интегральных уравнений

**Для цитирования:** Рунов А. А. Моделирование отражательных характеристик осесимметричных радиолокационных объектов методом интегральных уравнений // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 4. С. 76–93. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-76-93>

**For citation:** Runov A. A. Modelling of the reflectance profile of axisymmetrical radiolocation objects using the integral equation method // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 4. P. 76–93. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-4-76-93>

Поступила 04.08.2021 Отрецензирована 23.08.2021 Одобрена 01.12.2021 Опубликована 27.12.2021

Оценка эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) радиолокационных объектов является одной из актуальных задач в радиолокации. Одним из широко применяемых теоретических методов расчета ЭПР является метод интегральных уравнений (ИУ) [1]. Метод ИУ обладает принципиально более высокой точностью по сравнению с геометрической теорией дифракции (ГТД) [2] и методом краевых волн (МКВ) [3] во всем диапазоне своего применения и монополюсно используется в области резонансного и рэлеевского рассеяния, где ГТД и МКВ неприменимы.

Формулировка задачи дифракции методом интегральных уравнений возможна в виде ИУ I или в виде ИУ II рода. В общем

случае она является некорректно поставленной задачей по Тихонову, то есть неустойчивой к погрешностям в исходных данных. Таким образом, возникает проблема точности получаемых решений. Решения электродинамических задач на основе ИУ II рода в большинстве практических случаев (например, для идеально проводящих тел) являются более устойчивыми по отношению к решениям на основе ИУ I рода, поэтому исторически при решении практических задач давалось предпочтение ИУ II рода.

Вместе с тем для ряда случаев, например дифракции на неоднородных диэлектрических объектах, ИУ II рода неприменимы, поскольку их размерность катастрофически возрастает. Единственной возможностью решения подобных задач является использование ИУ I рода.

© Рунов А. А., 2021



Также ИУ I рода обладает преимуществом при решении задачи дифракции на тонких диэлектрических оболочках (в части размерности уравнения). Развитие вычислительной техники и ее широкая доступность обеспечили техническую возможность детального анализа вычислительных процессов, сопровождающих решение ИУ, и их совершенствования. На практике это позволяет повысить точность исходных данных (точность вычисления матрицы взаимных сопротивлений и правой части ИУ) и избежать необходимости применения регуляризирующих процедур. В результате удастся создать алгоритмы решения дифракционной задачи на идеально проводящих объектах на основе ИУ I рода, не уступающие по вычислительной эффективности и точности алгоритмам, основанным на ИУ II рода. Разработанные алгоритмы применимы для решения задач дифракции электромагнитных волн на тонких диэлектрических оболочках и для неоднородных диэлектрических сред. Приводимые ниже методика решения задачи дифракции на основе ИУ первого рода и примеры решаемых задач являются иллюстрацией подобного подхода.

В методе ИУ в общем случае размерность дифракционной задачи (например, на неоднородном диэлектрическом теле) является трехмерной (объемной). Для металлических тел за счет применения граничных условий на поверхности размерность такой задачи снижается до двумерной.

Достаточно представительной выборкой радиолокационных объектов являются металлические тела вращения, для которых учет осевой симметрии при математической формулировке задач дифракции позволяет дополнительно снизить размерность до одномерной [1].

В дальнейшем изложении рассматривается решение дифракционной задачи на металлических объектах – телах вращения, в качестве метода решения используется метод ИУ.

Задача дифракции электромагнитных волн (ЭМВ) на поверхности идеально проводящего тела может быть сформулирована в виде ИУ I рода для электрического поля. Граничные условия для электрического поля на идеально проводящей поверхности определяются как [4]:

$$[\mathbf{n}, \mathbf{E}] = 0,$$

где:  $\mathbf{n}$  – единичный вектор нормали к идеально проводящей поверхности;

$\mathbf{E}$  – вектор электрического поля на идеально проводящей поверхности;

$[\mathbf{n}, \mathbf{E}]$  – векторное произведение векторов  $\mathbf{n}$  и  $\mathbf{E}$ .

В данной формуле и далее по тексту символы, исполненные прямым жирным шрифтом, обозначают векторные величины.

В более наглядном для рассматриваемой задачи виде граничные условия можно представить как:

$$\mathbf{E}_\tau = 0,$$

где  $\mathbf{E}_\tau$  – тангенциальная составляющая электрического поля на идеально проводящей поверхности.

С учетом данных граничных условий для суммарного поля  $\mathbf{E}$  соотношение для падающего (первичного) и рассеянного (вторичного) полей на поверхности идеально проводящего тела определяется как:

$$\mathbf{E}_\tau^i + \mathbf{E}_\tau^s = 0, \quad (1)$$

где:  $\mathbf{E}_\tau^i$  – тангенциальная составляющая падающего (первичного) электрического поля;

$\mathbf{E}_\tau^s$  – тангенциальная составляющая рассеянного (вторичного) электрического поля.

В формуле (1) и далее по тексту верхний индекс  $i$  для векторов электрического поля  $\mathbf{E}$  означает падающее поле, верхний индекс  $s$  – рассеянное поле.

Для комплексных гармонических величин рассеянное электрическое поле можно определить как функцию от векторного  $\mathbf{A}$  и скалярного  $\Phi$  потенциалов на поверхности тела:

$$\mathbf{E}^s = -j\omega\mathbf{A} - \nabla\Phi, \quad (2)$$

$$\text{где: } \mathbf{A}(s) = \mu \iint_{S'} \mathbf{J}(S') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS', \quad (3)$$

$$\Phi(s) = \frac{1}{\varepsilon} \iint_{S'} \sigma(S') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS'. \quad (4)$$

В формулах (3), (4) используются следующие обозначения:

$\mathbf{J}(S')$  – распределение плотности электрического тока на поверхности проводника;



$\sigma(S')$  – распределение плотности электрических зарядов на поверхности проводника;  
 $S$  – поверхность проводника, соответствующая точкам наблюдения (измерения) потенциалов  $A(s)$  и  $\Phi(s)$ ;

$S'$  – поверхность проводника, соответствующая точкам интегрирования плотности тока  $\mathbf{J}(S')$  и плотности заряда  $\sigma(S')$ , в описываемой модели  $S$  и  $S'$  геометрически совпадают;

$s$  – точка наблюдения (измерения) потенциалов  $A(s)$  и  $\Phi(s)$ ;

$R$  – расстояние между точками наблюдения и интегрирования;

$\mu, \varepsilon$  – абсолютные магнитная и электрические проницаемости вакуума;

$k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;

$\lambda$  – длина волны в свободном пространстве;

$\nabla$  – векторный дифференциальный оператор набла, операция  $\nabla\Phi(s)$  определяет градиент скалярной функции  $\Phi(s)$  в точке наблюдения  $s$ ;  
 $j$  – мнимая единица.

С учетом (1) и (2) задача дифракции в виде ИУ для электрического поля формулируется как:

$$\mathbf{E}^i(s) = j\omega A(s) + \nabla\Phi(s). \quad (5)$$

Уравнение (5) с учетом (3) и (4) содержит две неизвестные величины –  $\mathbf{J}(S')$  и  $\sigma(S')$ , которые в каждой точке  $s'$  поверхности  $S'$  связаны уравнением непрерывности:

$$\nabla\mathbf{J}(s') = -j\omega\sigma(s'), \quad (6)$$

где  $\nabla$  – скалярный дифференциальный оператор набла, операция  $\nabla\mathbf{J}(s')$  определяет градиент векторной функции  $\mathbf{J}(s')$  в точке интегрирования  $s'$ .

С учетом (6) уравнение (5) может быть представлено в виде, содержащем одну неизвестную функцию  $\mathbf{J}(s')$ .

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^i(s) = j\omega\mu \iint_{S'} \mathbf{J}(S') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS' - \\ - \frac{1}{j\omega\varepsilon} \nabla \iint_{S'} \nabla\mathbf{J}(S') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS'. \end{aligned} \quad (7)$$

Для ИУ электродинамики аналитические решения возможны для ограниченного количества геометрий, на которых переменные интегрирования разделяются. Получить

аналитическое решение для тел произвольной формы не удастся, поэтому на практике подобные уравнения решаются численными методами, в соответствии с которыми ИУ аппроксимируется системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) или матричным уравнением и решается способами, традиционными для данных математических объектов.

Для сведения интегрального уравнения к дискретному обычно используются проекционные методы, например метод моментов (МОМ) [5] или его разновидности. В МОМ для ИУ типа (7) искомая плотность электрического тока  $\mathbf{J}(S')$  (неизвестная функция) и первичное поле  $\mathbf{E}^i(S)$  (известная функция) аппроксимируются наборами базисных и весовых функций. Наборы функций должны быть полными и по возможности содержать ортогональные составляющие.

Искомая плотность электрического тока  $\mathbf{J}(S')$  на поверхности  $S'$  аппроксимируется суммой базисных функций с весовыми коэффициентами:

$$\mathbf{J}(S') = \sum_{j=1}^{K_j} I_j \mathbf{J}_j(S'),$$

где:  $\mathbf{J}_j(S')$  –  $j$ -я базисная функция;

$I_j$  – весовой коэффициент  $j$ -й базисной функции;

$j$  – при записи как нижний индекс в  $\mathbf{J}_j(S')$  или нижний индекс в  $I_j$  означает номер базисной функции или ее весового коэффициента;  
 $K_j$  – количество используемых базисных функций.

Используемые для аппроксимации  $\mathbf{J}(S')$  базисные функции  $\mathbf{J}_j(S')$  являются известными (выбранными) функциями, а значения весовых коэффициентов  $I_j$  неизвестны.

Первичное поле  $\mathbf{E}^i(s)$ , соответственно, аппроксимируется суммой весовых функций с соответствующими коэффициентами:

$$\mathbf{E}^i(S) = \sum_{i=1}^{K_w} V_i \mathbf{W}_i(S),$$

где:  $\mathbf{W}_i(S)$  –  $i$ -я весовая функция;

$V_i$  – весовой коэффициент  $i$ -й весовой функции;





$i$  – при записи как нижний индекс в  $\mathbf{W}_i(S)$  или нижний индекс в  $V_i$  означает номер весовой функции или ее весового коэффициента;  $K_W$  количество используемых весовых функций.

В аппроксимации  $\mathbf{E}^i(S)$  известными являются как весовые функции  $\mathbf{W}_i(S)$ , так и их весовые коэффициенты  $V_i$ .

Верхний индекс  $i$  в  $\mathbf{E}^i(S)$ , как отмечалось ранее, означает падающее (первичное) поле.

Для вывода дальнейших соотношений введем скалярное произведение весовых и базисных функций по поверхности  $S$ :

$$\langle \mathbf{W}_i(S), \mathbf{J}_j(S) \rangle = \iint_S \mathbf{W}_i(S), \mathbf{J}_j(S) dS.$$

Далее по тексту выражение вида  $\langle \mathbf{A}(S), \mathbf{B}(S) \rangle$  означает скалярное произведение векторных функций  $\mathbf{A}(S)$  и  $\mathbf{B}(S)$  на поверхности  $S$ .

Тогда:

$$I_j = \langle \mathbf{J}(S'), \mathbf{J}_j(S') \rangle, \quad (8)$$

$$V_i = \langle \mathbf{E}^i(S), \mathbf{W}_i(S) \rangle. \quad (9)$$

Для компактности и наглядности дальнейшего изложения представим (7) в операторном виде:

$$\mathbf{E}^i(S) = \mathbf{L} \{ \mathbf{J}(S') \}.$$

Далее, подставив в данное операторное уравнение дискретную аппроксимацию  $\mathbf{J}(S')$  набором базисных функций  $\mathbf{J}_j(S')$ , получим:

$$\mathbf{E}^i(S) = \mathbf{L} \left\{ \sum_{j=1}^{K_J} I_j \mathbf{J}_j(S') \right\}.$$

С учетом линейности оператора  $\mathbf{L}$  данное уравнение можно представить как:

$$\mathbf{E}^i(S) = \sum_{j=1}^{K_J} I_j \mathbf{L} \{ \mathbf{J}_j(S') \}.$$

Следующим шагом является переход к уравнению в скалярной форме. Для этого, применяя к полученному уравнению операцию его скалярного произведения на поверхности  $S$  с весовыми функциями  $\mathbf{W}_i(S)$ , получаем:

$$\langle \mathbf{W}_i(S), \mathbf{E}^i(S) \rangle = \langle \mathbf{W}_i(S), \sum_{j=1}^{K_J} I_j \mathbf{L} \{ \mathbf{J}_j(S') \} \rangle.$$

С учетом (9) и свойства линейности операции скалярного произведения полученное уравнение можно представить как:

$$V_i = \sum_{j=1}^{K_J} \langle \mathbf{W}_i(S), \mathbf{L} \{ \mathbf{J}_j(S') \} \rangle I_j. \quad (10)$$

На основании (10) получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), являющаяся дискретной аппроксимацией ИУ (7):

$$\sum_{i=1}^{K_W} V_i = \sum_i \iint_S (\mathbf{W}_i(S)) \left( j\omega \mathbf{A} \left( \sum_{j=1}^{K_J} I_j \mathbf{J}_j(S') \right) \right) dS + \sum_i \iint_S (\mathbf{W}_i(S)) \left( \nabla \Phi \left( \sum_{j=1}^{K_J} I_j \mathbf{J}_j(S') \right) \right) dS. \quad (11)$$

Второе слагаемое системы уравнений (11) содержит операцию производной  $\nabla \Phi(\mathbf{J}(S'))$  по координатам точки наблюдения, что достаточно неудобно для последующего численного решения. Для приведения (11) к модификации более приемлемой в вычислительном отношении воспользуемся свойством интегрирования по частям и теоремой о дивергенции векторной величины на замкнутой поверхности. В условно краткой форме второе слагаемое (11) можно записать как:

$$\iint_S \mathbf{W} (\nabla \Phi) dS = \iint_S \nabla (\mathbf{W} \Phi) dS - \iint_S (\nabla \mathbf{W}) \Phi dS. \quad (12)$$

Подынтегральное выражение первого слагаемого (12) содержит дивергенцию векторной величины  $\mathbf{W} \Phi$ . Поскольку уравнение (11) соответствует дифракционной задаче на идеально проводящем теле, в соответствии с используемыми граничными условиями все входящие в него векторные величины являются тангенциальными к поверхностям  $S$  и  $S'$ . По этой причине второе слагаемое (12) равно нулю, так как поверхность  $S$  замкнута. В этих условиях СЛАУ (11) может быть преобразовано к виду более удобному в вычислительном отношении:



$$\sum_i V_i = \sum_i \iint_S (\mathbf{W}_i(S)) \left( j\omega A \left( \sum_{j=1}^{K_j} I_j \mathbf{J}_j(S') \right) \right) dS - \sum_i \iint_S (\nabla(\mathbf{W}_i(S))) \left( \Phi \left( \sum_{j=1}^{K_j} I_j \mathbf{J}_j(S') \right) \right) dS. \quad (13)$$

В отличие от уравнения (11) во втором слагаемом уравнения (13) вместо трудно вычисляемой операции градиента скалярного потенциала  $\nabla\Phi(\mathbf{J}(S'))$  появилась операция дивергенции весовой векторной функции  $\nabla(\mathbf{W}_i(S))$ . Как следствие, векторная функция  $\mathbf{W}_i(S)$  должна быть дифференцируемой, а скалярная функция  $\nabla(\mathbf{W}_i(S))$  – относительно легко вычисляемой.

В матричной форме СЛАУ (13) имеет вид:

$$\|\mathbf{V}\| = \|\mathbf{Z}\| \|\mathbf{I}\|,$$

где:  $\|\mathbf{V}\| = \|\langle \mathbf{E}^i(S), \mathbf{W}_i(S) \rangle\|$  – матрица-столбец коэффициентов разложения первичного (падающего) поля в ряд по весовым функциям;  $\|\mathbf{Z}\| = \|\langle \mathbf{W}_i, \mathbf{L}\{\mathbf{J}_j(S')\} \rangle\|$  – прямоугольная матрица взаимных сопротивлений  $\mathbf{W}_i$  (на поверхности  $S$ ) по отношению к  $\mathbf{J}_j$  (на поверхности  $S'$ );  $\|\mathbf{I}\| = \|\langle \mathbf{J}(S'), \mathbf{J}_j(S') \rangle\|$  – матрица-столбец коэффициентов разложения искомого тока в ряд по базисным функциям  $\mathbf{J}_j(S)$ .

В приведенном выражении, расшифровка и далее по тексту обозначение вида  $\|\mathbf{A}\|$  (символы, исполненные прямым жирным шрифтом, в двойных прямых скобках) означает матрицу.

$$\|\mathbf{Z}\| = \begin{pmatrix} \|\mathbf{Z}_{-n}\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{Z}_{-2}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| \\ \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{Z}_{-1}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| \\ \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{Z}_0\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| \\ \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{Z}_1\| & \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| \\ \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{Z}_2\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \|\mathbf{0}\| & \cdots & \|\mathbf{Z}_n\| \end{pmatrix},$$

где:  $n$  – максимальный («верхний») номер используемой азимутальной гармоники, общее количество гармоник =  $2n + 1$ ;

$\|\mathbf{Z}_n\|$  – матрица взаимных сопротивлений, соответствующая азимутальной гармонике с номером  $n$ ;

$\|\mathbf{0}\|$  – нулевая матрица;

нижний индекс в  $\|\mathbf{Z}_n\|$  означает номер азимутальной гармоники.

В дальнейшем будет рассматриваться случай, когда размерности  $\|\mathbf{V}\|$  и  $\|\mathbf{I}\|$  совпадают (матрица  $\|\mathbf{Z}\|$  – квадратная, т.е.  $K_j = K_w$ ).

С учетом вышеизложенного выражение для элементов матрицы взаимных сопротивлений тела  $\|\mathbf{Z}\|$  с произвольной геометрией в развернутом виде имеет вид:

$$Z_{i,j} = j\omega\mu \iint_S \mathbf{W}_i(S) \iint_{S'} \mathbf{J}_j(S') \frac{e^{-jkR}}{4\pi} dS' dS + \frac{1}{j\omega\epsilon} \iint_S (\nabla \mathbf{W}_i(S)) \iint_{S'} (\nabla' \mathbf{J}_j(S')) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS' dS, \quad (14)$$

где нижние индексы  $i$  и  $j$  обозначают номера строк и столбцов матрицы  $\|\mathbf{Z}\|$ .

Приведенный вывод ИУ (7) или СЛАУ (13) не претендует на оригинальность. Варианты получения подобных ИУ, а также выражений для коэффициентов СЛАУ типа (14) известны и широко приведены в литературе, например в [1], стр. 23–26; [5], стр. 25–30; [6] и др.

Для тел вращения СЛАУ (13) можно модифицировать. Если в (13) использовать  $\mathbf{W}_i(S)$  и  $\mathbf{J}_j(S')$ , которые являются функциями азимутальных координат  $\Phi$  и  $\Phi'$  поверхности тела вращения (рис. 1), то тангенциальные составляющие  $\mathbf{E}_t^i(S)$ ,  $\mathbf{E}_t^s(S)$  (1) и  $\mathbf{J}(S')$  (3) можно разложить в ряд Фурье по азимутальной координате на азимутальные гармоники. В этих условиях, учитывая свойство ортогональности тригонометрических рядов, матрицу  $\|\mathbf{Z}\|$  можно преобразовать к блочно-диагональному виду относительно номеров гармоник  $n$ :



Соответственно, матрицы  $\|V\|$  и  $\|I\|$  будут иметь вид:

$$\|V\| = \begin{bmatrix} \|V_{-n}\| \\ \vdots \\ \|V_{-2}\| \\ \|V_{-1}\| \\ \|V_0\| \\ \|V_1\| \\ \|V_2\| \\ \vdots \\ \|V_n\| \end{bmatrix},$$

$$\|I\| = \begin{bmatrix} \|I_{-n}\| \\ \vdots \\ \|I_{-2}\| \\ \|I_{-1}\| \\ \|I_0\| \\ \|I_1\| \\ \|I_2\| \\ \vdots \\ \|I_n\| \end{bmatrix}.$$

Учитывая ортогональность тригонометрических функций, вычисление матриц  $\|Z\|$ ,  $\|V\|$  и  $\|I\|$ , а также решение СЛАУ (13) можно производить отдельно для каждой гармоники.

При введении системы цилиндрических координат на поверхности тела вращения согласно рисунку 1, матричное уравнение для одного блока, соответствующего  $n$ -й азимутальной гармонике, будет иметь вид:

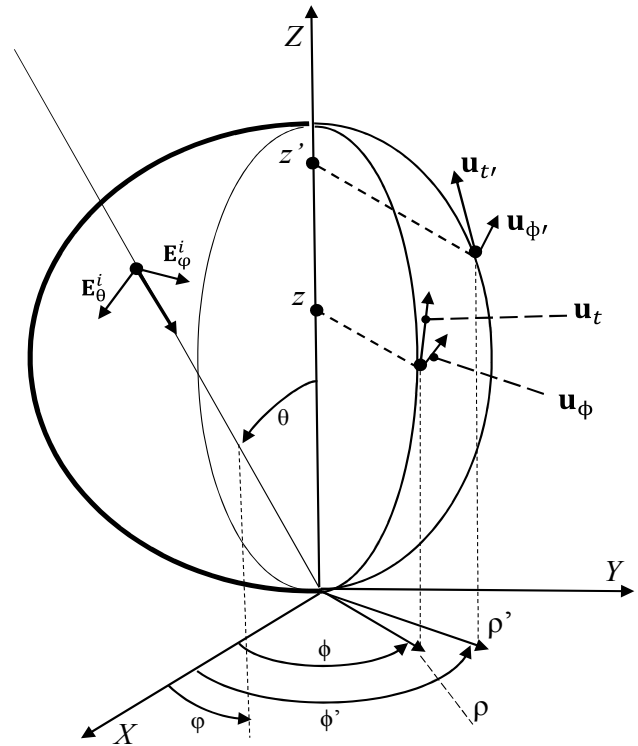
$$\begin{bmatrix} \|Z_n^{t,t'}\| & \|Z_n^{t,\Phi'}\| \\ \|Z_n^{\Phi,t'}\| & \|Z_n^{\Phi,\Phi'}\| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \|I_n^{t'}\| \\ \|I_n^{\Phi'}\| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \|V_n^t\| \\ \|V_n^\Phi\| \end{bmatrix},$$

где:  $n$  – номер азимутальной гармоники;

$\begin{bmatrix} \|Z_n^{t,t'}\| & \|Z_n^{t,\Phi'}\| \\ \|Z_n^{\Phi,t'}\| & \|Z_n^{\Phi,\Phi'}\| \end{bmatrix}$  – квадратная матрица  $\|Z_n\|$ ,

$\|Z_n^{k,l'}\|$  – матрица взаимного сопротивления  $k$ -го компонента касательной составляющей электрического поля к  $l'$ -му компоненту

$$\begin{aligned} (Z_n^{t,t'})_{i,j} = j\omega\mu \int_{t=0}^{t=T} f_i(t) \int_{t'=0}^{t'=T} f_j(t') \left( \sin \vartheta' \sin \vartheta \frac{g_{n+1} + g_{n-1}}{2} \right) + f_j(t') (\cos \vartheta' \cos \vartheta g_n) dt' dt + \\ + \frac{1}{j\omega\epsilon} \int_{t=0}^{t=T} f'_i(t) \int_{t'=0}^{t'=T} f'_j(t') g_n dt' dt, \end{aligned} \quad (15)$$



**Рис. 1.** Система координат на поверхности тела вращения и сферические координаты падающей ЭМВ:  $U_t$ ;  $U_\phi$ ;  $U_{t'}$ ;  $U_{\phi'}$  – единичные векторы, касательные к поверхности тела вращения в точках наблюдения и интегрирования;

$t, t'$  – координаты вдоль образующей тела вращения в точках наблюдения и интегрирования;

$\phi, \phi'$  – координаты, ортогональные образующей тела вращения;

$\theta, \phi$  – сферические координаты направления прихода падающей ЭМВ

поверхностного тока (первый верхний индекс относится к точке наблюдения, второй – к точке интегрирования);

$\begin{bmatrix} \|I_n^{t'}\| \\ \|I_n^{\Phi'}\| \end{bmatrix}$  – матрица-столбец  $\|I_n\|$ ;

$\begin{bmatrix} \|V_n^t\| \\ \|V_n^\Phi\| \end{bmatrix}$  – матрица-столбец  $\|V_n\|$ .

Формулы для элементов матриц  $\|Z_n^{k,l'}\|$  для различных азимутальных гармоник  $n$  будут иметь вид:



$$(Z_n^{t,\phi'})_{i,j} = -\omega\mu \int_{t=0}^{t=T} f_i(t) \int_{t'=0}^{t'=T} f_j(t') \left( \sin \vartheta \frac{g_{n+1} - g_{n-1}}{2} \right) dt' dt + \frac{n}{\omega\epsilon\rho'} \int_{t=0}^{t=T} f'_i(t) \int_{t'=0}^{t'=T} f_j(t') g_n dt' dt, \quad (16)$$

$$(Z_n^{\phi,t'})_{i,j} = +\omega\mu \int_{t=0}^{t=T} f_i(t) \int_{t'=0}^{t'=T} f_j(t') \left( \sin \vartheta \frac{g_{n+1} - g_{n-1}}{2} \right) dt' dt + \frac{n}{\omega\epsilon\rho} \int_{t=0}^{t=T} f_i(t) \int_{t'=0}^{t'=T} f'_j(t') g_n dt' dt, \quad (17)$$

$$(Z_n^{\phi,\phi'})_{i,j} = j\omega\mu \int_{t=0}^{t=T} f_i(t) \int_{t'=0}^{t'=T} f_j(t') \left( \frac{g_{n+1} + g_{n-1}}{2} \right) dt' dt + \frac{n^2}{j\omega\epsilon\rho'\rho} \int_{t=0}^{t=T} f_i(t) \int_{t'=0}^{t'=T} f_j(t') g_n dt' dt, \quad (18)$$

где:

$$g_n = \int_0^\pi \frac{e^{-jkR}}{R} \cos n\phi d\phi; \quad (19)$$

$n$  – номер азимутальной гармоники;

$\vartheta$  – угол между вектором  $\mathbf{u}_t$  и осью  $Z$  (рис. 1);

$\vartheta'$  – угол между вектором  $\mathbf{u}_{t'}$  и осью  $Z$ ;

$\mathbf{u}_t$  – единичный орт, касательный к поверхности тела вращения и направленный вдоль его образующей;

$\mathbf{u}_\phi$  – единичный орт, касательный к поверхности тела вращения и направленный в направлении вращения образующей (перпендикулярно  $\mathbf{u}_t$ );

$t$  – координата на поверхности тела вращения вдоль его образующей;

$\phi$  – координата на поверхности тела вращения в направлении вращения образующей;

$f_i(t)$  – функция, имеющая первую производную  $f'_i(t)$  по  $t$  (координате образующей).

В формулах (15)–(18) нижние индексы  $i$  и  $j$  обозначают номера строк и столбцов, к которым относится данный элемент матрицы  $\|Z\|$ .

В используемой модели в качестве  $f_i(t)$  и  $f_i(t')$  применялись кусочно-треугольные функции с весовыми коэффициентами, являющимися функциями от  $\rho$  и  $\rho'$  в целой степени (рис. 2).

В качестве весовых функций в (15)–(18) выбраны:

$$\mathbf{W}_{i,n}^t = \mathbf{u}_t f_i(t) e^{-jn\phi}, \quad (20)$$

$$\mathbf{W}_{i,n}^\phi = \mathbf{u}_\phi f_i(t) e^{-jn\phi}, \quad (21)$$

В качестве базисных функций выбраны:

$$\mathbf{J}_{j,n}' = \mathbf{u}_{t'} f_j(t') e^{jn\phi'}, \quad (22)$$

$$\mathbf{J}_{j,n}^\phi = \mathbf{u}_{\phi'} f_j(t') e^{jn\phi'}, \quad (23)$$

Если обозначить ориентацию вектора поляризации падающей на тело вращения ЭМВ в плоскости, проходящей через оси  $X$  и  $Z$ , как  $\theta$ -поляризацию, а поляризацию в перпендикулярной плоскости, как  $\phi$ -поляризацию

(рис. 1), то матрицу коэффициентов возбуждения весовых функций  $\|V\|$  можно представить как:

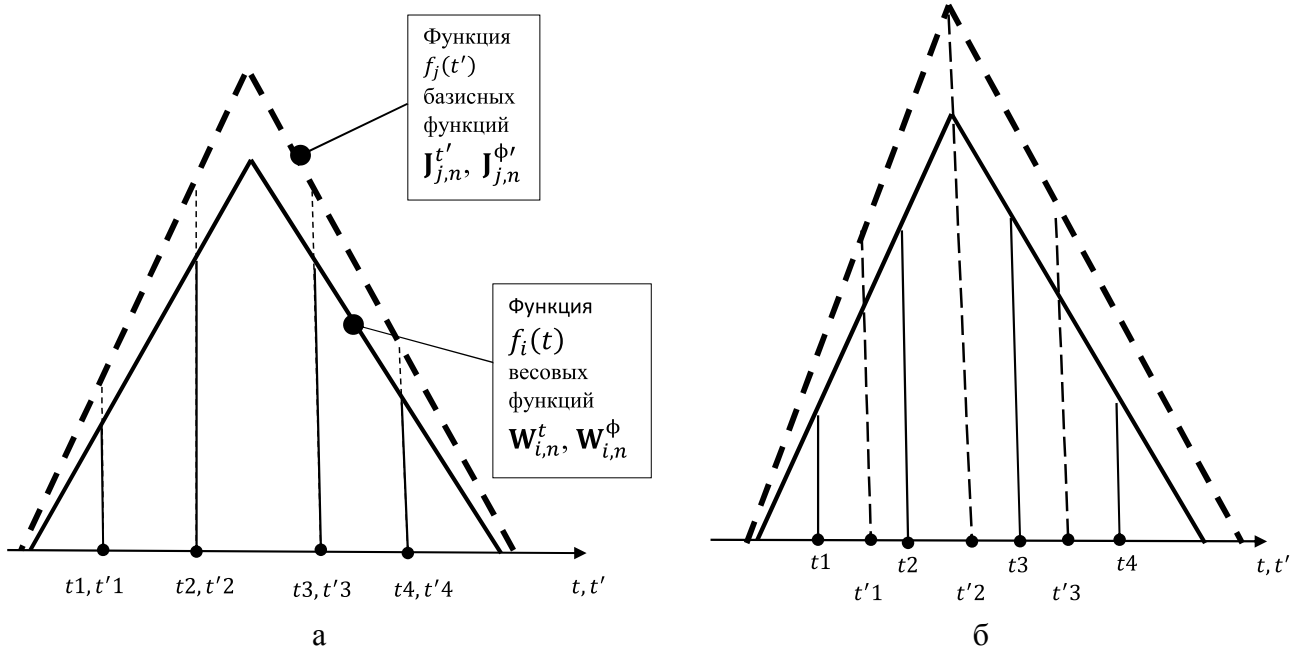
$$\begin{aligned} \|\mathbf{V}_n^{t,\theta}\| &= \|\langle \mathbf{W}_{n,i}^t, \mathbf{E}_\theta^i \rangle\|, \\ \|\mathbf{V}_n^{t,\phi}\| &= \|\langle \mathbf{W}_{n,i}^t, \mathbf{E}_\phi^i \rangle\|, \\ \|\mathbf{V}_n^{\phi,\theta}\| &= \|\langle \mathbf{W}_{n,i}^\phi, \mathbf{E}_\theta^i \rangle\|, \\ \|\mathbf{V}_n^{\phi,\phi}\| &= \|\langle \mathbf{W}_{n,i}^\phi, \mathbf{E}_\phi^i \rangle\|, \end{aligned}$$

где:  $\mathbf{E}_\theta^i$  –  $\theta$ -й компонент электрического поля на поверхности тела вращения (рис. 1);

$\mathbf{E}_\phi^i$  –  $\phi$ -й компонент электрического поля на поверхности тела вращения (рис. 1).

Приведенное выражение для матриц коэффициентов возбуждения весовых функций  $\|V\|$  обеспечивает вычисление  $n$ -й азимутальной гармоники  $t$ -го и  $\phi$ -го компонентов касательных составляющих первичного электрического поля на поверхности тела вращения в системе координат в соответствии с рисунком 1 ( $\mathbf{E}_n^{t,t}$ ,  $\mathbf{E}_n^{i,\phi}$ ) относительно поляризационных компонентов падающей на тело вращения электромагнитной волны ( $\mathbf{E}_\theta^i$ ,  $\mathbf{E}_\phi^i$ ).

Используя представление функции Бесселя I рода целого индекса действительного аргумента интегральным представлением [7]:



**Рис. 2.** Выбор узлов численного интегрирования при вычислении элементов главной диагонали матриц  $\|Z_n^{k,l'}\|$   
 а – координаты узлов численного интегрирования весовых и базисных функций совпадают. Интегрирование по  $t$  и  $t'$  по 4-м точкам; б – координаты узлов численного интегрирования весовых и базисных функций не совпадают. Интегрирование по  $t$  по 4-м точкам, интегрирование по  $t'$  по 3-м точкам.

$$J_n(\rho) = \frac{j^n}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-j\rho \cos \phi} e^{-jn\phi} d\phi,$$

введя обозначение:

$$V_n^{t,\theta} = 2\pi j^{n+1} \int_{t=0}^{t=T} \rho f_i(t) e^{jkz \cos \theta} \left( \cos \theta \sin \vartheta \frac{J_{n+1} - J_{n-1}}{2} \right) + \rho f_i(t) e^{jkz \cos \theta} (j \sin \theta \cos \vartheta J_n) dt, \quad (24)$$

$$V_n^{\phi,\theta} = -2\pi j^{n+1} \int_{t=0}^{t=T} \rho f_i(t) e^{jkz \cos \theta} \left( \cos \theta \frac{J_{n+1} + J_{n-1}}{2J} \right) dt, \quad (25)$$

$$V_n^{t,\varphi} = 2\pi j^{n+1} \int_{t=0}^{t=T} \rho f_i(t) e^{jkz \cos \theta} \left( \sin \vartheta \frac{J_{n+1} + J_{n-1}}{2J} \right) dt, \quad (26)$$

$$V_n^{\phi,\varphi} = +2\pi j^{n+1} \int_{t=0}^{t=T} \rho f_i(t) e^{jkz \cos \theta} \left( \frac{J_{n+1} + J_{n-1}}{2J} \right) dt, \quad (27)$$

где:  $i$  – номер коэффициента возбуждения;  
 $\vartheta$  – угол между вектором  $\mathbf{u}_i$  и осью  $Z$ .

В представленных формулах  $V_n^{p,q} = \langle \mathbf{u}_p^i, \mathbf{W}_{ni}^q \rangle$  является коэффициентом возбуждения  $q$ -го компонента  $n$ -й азимутальной гармоники  $i$ -й весовой функции касательной составляющей электрического поля  $p$ -й поляризации первичной (падающей) ЭМВ. Верхний индекс  $i$  в  $\mathbf{u}_p^i$  означает падающее (первичное)

$$J_n = J_n(k \rho \sin \theta),$$

а также учитывая ориентацию векторных составляющих весовых функций  $\mathbf{W}$  в формулах (20), (21), полные выражения для элементов матрицы  $\|\mathbf{V}\|$  можно представить в виде:

электрическое поле, нижний индекс  $i$  в  $\mathbf{W}_{ni}^q$  означает номер весовой функции. Замена в  $V_n^{p,q}$  скалярного произведения  $\langle \mathbf{E}_p^i, \mathbf{W}_{ni}^q \rangle$  на  $\langle \mathbf{u}_p^i, \mathbf{W}_{ni}^q \rangle$  означает использование в формулах для  $V_n^{p,q}$  первичного электрического поля единичной амплитуды.

С учетом полученных ранее результатов рассеянное осесимметричным объектом поле определяется как:





$$\mathbf{E}^s = \frac{\|\mathbf{E}_\theta^s\|}{\|\mathbf{E}_\phi^s\|} = \frac{-j\omega\mu}{4\pi r} \sum_{n=-k}^{n=k} \left( \frac{\|\mathbf{u}_\theta^s\| \|\mathbf{R}_n^{\theta,t}\| \|\mathbf{R}_n^{\theta,\phi}\| \|\mathbf{I}_n^t\|}{\|\mathbf{u}_\phi^s\| \|\mathbf{R}_n^{\phi,t}\| \|\mathbf{R}_n^{\phi,\phi}\| \|\mathbf{I}_n^\phi\|} \right) e^{-jkr}, \quad (28)$$

где:  $r$  – расстояние от точки наблюдения до объекта,  $r \gg R$ ;

$\mathbf{u}_\theta^s, \mathbf{u}_\phi^s$  – орты векторов поляризации рассеянного поля  $\mathbf{E}^s$ , перпендикулярные направлению распространения рассеянной электромагнитной волны;

$\|\mathbf{R}_n^{p,q}\|$  – матрица-строка коэффициентов излучения  $p$ -й поляризации электрического поля  $q$ -м компонентом  $n$ -й азимутальной гармоники, элементы матрицы определяются как:

$R_{n,j}^{p,q} = \langle \mathbf{u}_p^s, \mathbf{J}_{n,j}^q \rangle$  – коэффициент излучения  $p$ -й поляризации электрического поля  $q$ -м компонентом  $n$ -й азимутальной гармоники  $j$ -й базисной функции плотности тока.

Выражение для элементов  $n$ -й гармоники поляризационной матрицы рассеяния будет иметь вид:

$$S_n^{p,q} = \frac{-j\omega\mu}{4\pi} \|\mathbf{R}_n^{p,t}\| \|\mathbf{R}_n^{p,\phi}\| \left\| \frac{\|\mathbf{Y}_n^{t,t}\| \|\mathbf{Y}_n^{t,\phi}\|}{\|\mathbf{Y}_n^{\phi,t}\| \|\mathbf{Y}_n^{\phi,\phi}\|} \frac{\|\mathbf{V}_n^{t,q}\|}{\|\mathbf{V}_n^{\phi,q}\|} \right\|,$$

где:  $\|\mathbf{Y}_n^{t,t}\| \|\mathbf{Y}_n^{t,\phi}\| \|\mathbf{Y}_n^{\phi,t}\|$  и  $\|\mathbf{Y}_n^{\phi,\phi}\|$  – блоки матрицы  $\|\mathbf{Y}_n\|$ , обратной к матрице взаимных сопротивлений  $\|\mathbf{Z}_n\|$ . Вывод формул (15)–(18) и выражений для коэффициентов возбуждения и излучения  $V$  и  $R$  аналогичен приведенному в [8].

Приведенный набор формул и соотношений позволяет вычислять моностатические и бистатические ЭПР тел вращения в полном поляризационном базисе. В дополнение к вышеизложенному необходимо привести оценки сходимости вычисляемых по изложенной методике электродинамических характеристик тел вращения в зависимости от количества учитываемых азимутальных гармоник.

Анализируя формулы (24)–(27), можно сделать вывод, что на малых углах падения  $\theta$  электромагнитной волны к оси тела вращения основной вклад в возбуждение токов на его поверхности будут вносить только несколько первых азимутальных гармоник падающего поля. Данное обстоятельство хорошо

иллюстрируется свойствами функции Бесселя первого рода целого индекса действительного аргумента, которая входит в (24)–(27) (рис. 3). При увеличении  $\theta$  для корректного определения электродинамических характеристик тел вращения количество учитываемых азимутальных гармоник приходится увеличивать.

Аргументом функций Бесселя в (24)–(27) является  $k\rho \sin \theta$ , таким образом необходимое количество азимутальных гармоник определяется поперечными волновыми размерами тела  $\rho$  и сектором углов  $\theta$ , отсчитываемых от оси тела вращения, в котором необходимо вычислять ЭПР. В [1], стр. 169, предложена соответствующая формула, которую приведем в обозначениях, принятых в настоящей статье:

$$n = 2\rho_{max} \sin \theta, \quad (29)$$

где:  $n$  – требуемое число азимутальных гармоник;

$\rho_{max}$  – максимальный нормированный радиус тела вращения;

$\theta$  – угол падения электромагнитной волны к оси тела вращения.

Однако формула (29) не дает количественную оценку точности аппроксимации тока конечным рядом его азимутальных гармоник и, как следствие, не дает оценку точности расчета радиолокационных характеристик тел вращения.

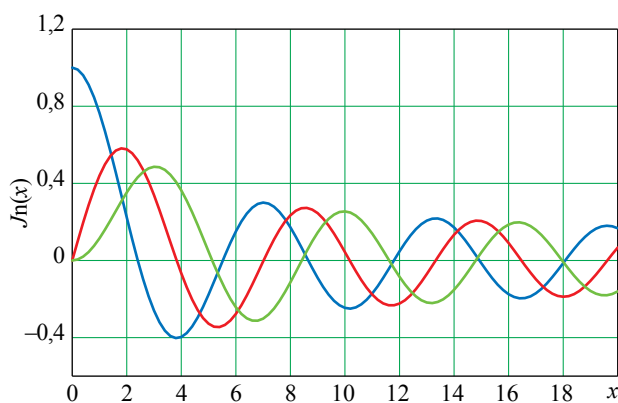


Рис. 3. Функции Бесселя первого рода целого индекса действительного аргумента  
—  $J_0(x)$ ; —  $J_1(x)$ ; —  $J_2(x)$



Для практической оценки точности аппроксимации (28) предлагается следующий способ.

ЭПР металлической сферы имеет одинаковое значение независимо от углов падения плоской волны. Однако если представить сферу как тело вращения, то в зависимости от угла прихода падающей волны  $\theta$  для определения рассеянного поля в соответствии с (29) потребуются учитывать разное количество азимутальных гармоник. Эталонным значением рассеянного поля можно считать случай, когда облучение происходит вдоль оси симметрии тела вращения, при этом коэффициенты возбуждения всех гармоник, за исключением  $n = 1, -1$  равны нулю (рис. 4). Предложенный способ также применим для оценки точности аппроксимации азимутальными гармониками решений на основе ИУ II рода.

Сравнивая результаты расчета ЭПР сферы при облучении с направления  $\theta = 0$  град. (учитываются гармоники с  $n = +1, -1$ ) и при облучении с направления  $\theta = 90$  град. (используется различное количество гармоник), можно определить их необходимое количество для фиксированных  $\lambda$  и  $R_{max}$ , обеспечивающее требуемую точность вычисления ЭПР во всем секторе углов облучения. Ниже,

на рисунках 5, 6, приведены результаты определения необходимого количества азимутальных гармоник для различных  $\theta, R_{max}$ , обеспечивающих точность определения ЭПР 5 и 10 %. В качестве показателя точности использовалось максимальное отклонение значения ЭПР от эталонного (при  $\theta = 90$  град.). Также из рисунков 5, 6 можно определить размеры секторов по углам  $\theta$ , в которых обеспечивается гарантированная точность вычисления ЭПР 5 и 10 % при фиксированном  $n$ . На рисунке 7 приведены значения максимальных ошибок ЭПР при ее расчете вне секторов гарантированной точности.

Как видно из рисунков 5, 6, для тела вращения с максимальным радиусом, равным одной длине волны, точность расчета ЭПР во всем диапазоне углов  $\theta$  не хуже 5 % обеспечивается при использовании 8 азимутальных гармоник падающего поля. Для обеспечения такой же точности расчета ЭПР для тела с максимальным радиусом 2,5 длины волны требуется 17 гармоник. На рисунке 7 приведены зависимости максимальных ошибок определения ЭПР при фиксированном числе азимутальных гармоник. Данные ошибки определялись за границами гарантированных секторов расчета ЭПР, приведенных на рисунках 5 и 6,

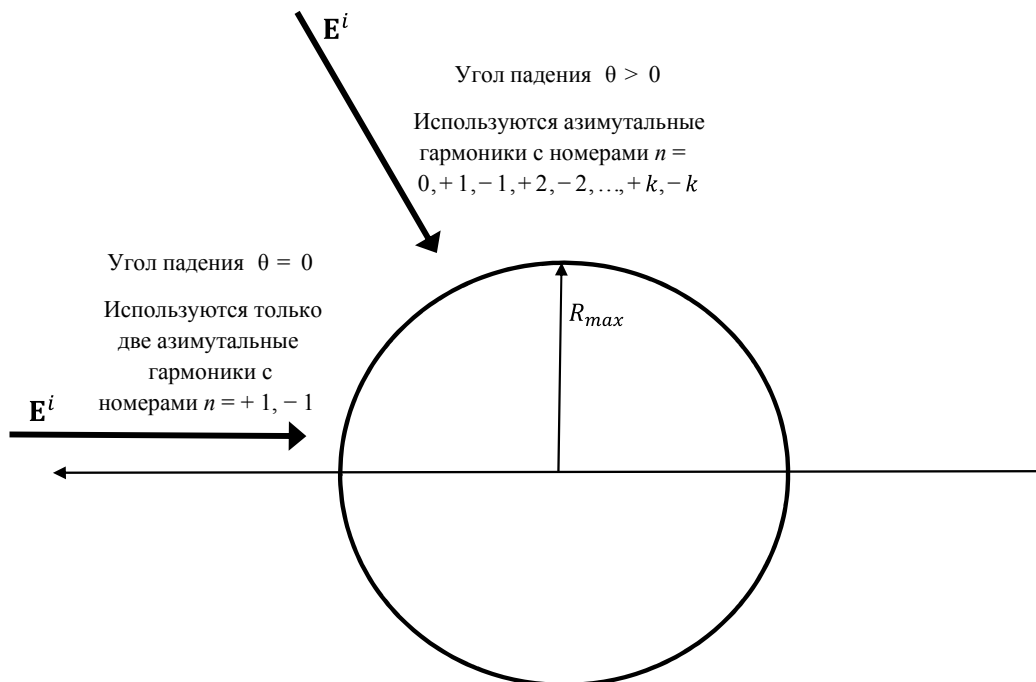
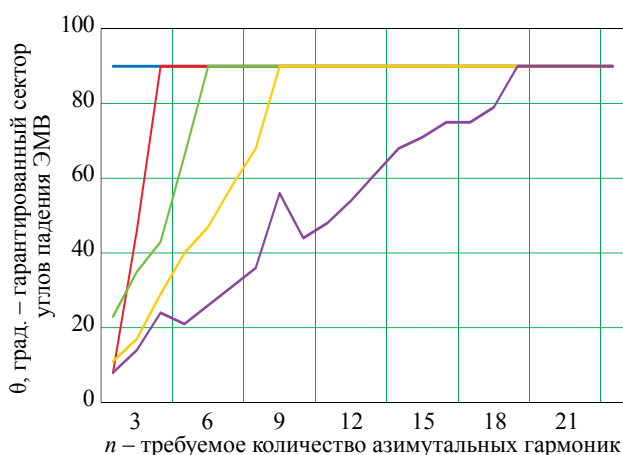
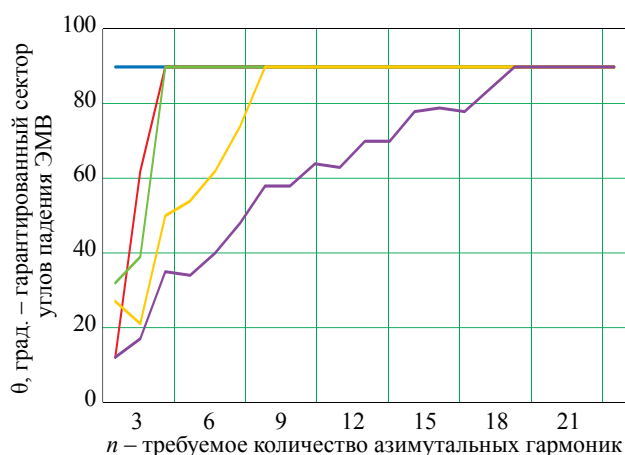


Рис. 4. Аппроксимация падающего поля азимутальными гармониками при различных углах падения первичной ЭМВ



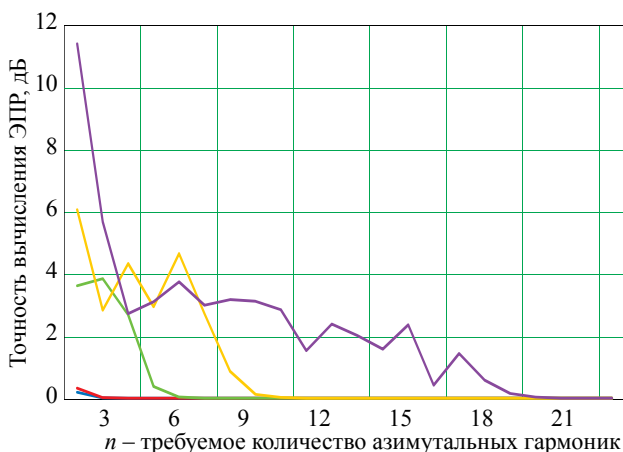
**Рис. 5.** Зависимость размера секторов гарантированной точности вычисления ЭПР 5% от количества азимутальных гармоник и радиуса тела вращения (сферы) для  $\lambda = 1$  м

Радиусы сферы, м: —  $R = 0,1$ ; —  $R = 0,25$ ;  
—  $R = 0,5$ ; —  $R = 1,0$ ; —  $R = 2,5$



**Рис. 6.** Зависимость размера секторов гарантированной точности вычисления ЭПР 10% от количества азимутальных гармоник и радиуса тела вращения (сферы) для  $\lambda = 1$  м

Радиусы сферы, м: —  $R = 0,1$ ; —  $R = 0,25$ ;  
—  $R = 0,5$ ; —  $R = 1,0$ ; —  $R = 2,5$



**Рис. 7.** Зависимость максимальной погрешности расчета ЭПР дБ/м<sup>2</sup> от количества учитываемых азимутальных гармоник и максимального радиуса тела вращения (сферы)

Радиусы сферы, м: —  $R = 0,1$ ; —  $R = 0,25$ ;  
—  $R = 0,5$ ; —  $R = 1,0$ ; —  $R = 2,5$

то есть для случаев, когда значения ошибок принимают максимальные значения.

Как следует из рисунка 7, для достижения погрешности расчета ЭПР не хуже 3 дБ для тела с максимальным радиусом 2,5 длины волны достаточно использование 6 азимутальных гармоник.

Вычисление элементов матрицы взаимных сопротивлений по формулам (15)–(18) имеет некоторые сложности. Поскольку поверхности интегрирования  $S$  и  $S'$  в уравнении

(7) совпадают, у ядра ИУ (7) имеется логарифмическая особенность вида  $1/R$ . Как следствие, при вычислении элементов главной диагонали матриц  $\|Z_n^{k,l'}\|$  (то есть  $(Z_n^{k,l'})_{i,j}$  для  $i = j$ ) при использовании одинаковых способов численного интегрирования по  $S$  и  $S'$  координаты узлов численных интегралов по  $t$  и  $t'$  в формулах (15)–(18) будут совпадать. В этих случаях  $R$  в формуле (19) равно нулю и возникает машинное переполнение.

На практике данную проблему решают использованием формул численного интегрирования с различным количеством узлов для  $t$  и  $t'$ . Иллюстрация данной проблемы и способа ее решения приведена на рисунке 2.

В разработанной программе для вычисления (15)–(18) использовалась формула численного интеграла Гаусса в вариантах с 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10 узлами.

Для вычисления (19) были опробованы варианты численного интегрирования по формулам прямоугольников, трапеций, парабол (Симпсона), Чебышева и Гаусса. Во всех случаях необходимая точность вычисления обеспечивается подбором необходимого количества сегментов численного интеграла. Наиболее быстрая сходимость интеграла обеспечивалась при использовании формулы Гаусса.

Следует отметить, что факт наилучшей (по скорости) сходимости при использовании



формулы Гаусса подтверждает то обстоятельство, что в разработанном алгоритме при вычислении подынтегральных выражений удалось минимизировать погрешности вычислений слагаемых, входящих в численные интегралы. Очевидно, что при большем уровне погрешностей наилучшую по скорости сходимость следовало бы ожидать при использовании формул Чебышева.

Рассмотрим источники и оценки погрешностей вычисления элементов матриц  $\|\mathbf{Z}\|$ ,  $\|\mathbf{V}\|$  и  $\|\mathbf{R}\|$ .

Расчет на ЭВМ коэффициентов возбуждения  $\|\mathbf{V}\|$  и рассеяния  $\|\mathbf{R}\|$  осуществляется по формулам, содержащим стабильно вычисляемые элементы с требуемой точностью. Точность обеспечивается размерностью разрядной сетки ЭВМ в среде программирования (7 или 14 значащих цифр при односторонней или двойной точности, например для FORTRAN), а также точностью выполнения арифметических операций и вычисления встроенных ( $\sin x$ ,  $\cos x$ ,  $e^{-i\omega t}$ ,  $x^2$ ) и внешних специальных функций (в рассматриваемом случае  $-J_n(x)$ ). При численном интегрировании вдоль образующей тела вращения при ее корректном разбиении на сегменты (по переменной  $t$ ) текущие значения  $\rho$ ,  $\sin \vartheta$ ,  $\cos \vartheta$  и  $z$ , входящие в выражения для  $\|\mathbf{R}\|$  и  $\|\mathbf{V}\|$ , в пределах координат одной весовой или базисной функции изменяются незначительно. По этой причине значения слагаемых, входящих в численные интегралы, имеют сходные порядки. Это обеспечивает устойчивость процесса численного интегрирования, так как при суммировании величин одного порядка не происходит потерь большого числа значащих цифр.

Аналогичный вывод можно сделать и в отношении расчета элементов матрицы взаимных сопротивлений  $\|\mathbf{Z}\|$ , за исключением одного отличия – в формулах ее элементов  $\|\mathbf{Z}\|$  используется функция Грина кольцевого источника  $g_n(\rho, \rho', z, k)$ , которая не вычисляется аналитически, не табулирована и не входит в перечень встроенных или внешних функций прикладных математических библиотек алгоритмических языков. Вычисление данной функции отдано на «откуп» пользователей,

при этом, как правило, используется численное интегрирование.

Численное интегрирование формулы (19) должно осуществляться по координате  $\phi$ , при этом сильно изменяющимися величинами в подынтегральном выражении (то есть величинами, определяющими проблемы численного интегрирования) могут быть  $R$  и фаза экспоненты, а также, для гармоник с большим  $n$ , – аргумент косинуса. Как правило, сходимость при численном интегрировании проверяется повторным вычислением интеграла при удвоении количества сегментов на интервале интегрирования и сравнением вновь полученного результата с исходным, при этом определяется относительная точность интеграла.

В случае если полученная точность оказывается хуже заданной, количество сегментов повторно удваивается. Для вычисления «гладких» на интервале функций такой алгоритм успешно используется, хотя его реализация требует больше времени, чем однократное интегрирование.

При вычислении функции  $g_n(\rho, \rho', z, k)$  (формула (19)) подобный алгоритм не всегда себя оправдывает. Так, не удастся обеспечить сходимость численного интеграла при малых  $\rho$  и  $\rho'$  и больших  $z$ . Также сходимость нарушается при вычислении  $g_n(\rho, \rho', z, k)$  для гармоник с большим  $n$ . Причиной оказывается явление, известное в вычислительной математике как «катастрофическая потеря верных знаков» [9]. Проблема проявляется для любых формул численного интегрирования, в том числе при использовании вычислений с двойной точностью (14 значащих цифр).

Решением данной проблемы является:

- использование асимптотических приближений  $g_n(\rho, \rho', z, k)$  для малых  $\rho$  и  $\rho'$  и больших  $z$ ;
- использование алгоритмов численного интегрирования, обеспечивающих необходимую чувствительность интегральной суммы к входящим в нее малым слагаемым.

В качестве асимптотического приближения функции  $g_n(\rho, \rho', z, k)$  для малых  $\rho$  и  $\rho'$  и больших  $z$  в разработанной модели использовалась функция Бесселя I рода целого индекса

действительного аргумента, в которую при данных условиях вырождается  $g_n(\rho, \rho', z, k)$ .

Для обеспечения необходимой чувствительности интегральной суммы при вычислении  $g_n(\rho, \rho', z, k)$  к входящим в нее малым слагаемым был использован следующий способ. Вычисляемый интеграл представлялся суммой отдельно вычисляемых интегралов (слагаемых) с интервалами интегрирования по  $\phi$ , кратными  $\pi/2n$ . В этих условиях значения  $\cos n\phi$  в пределах одного слагаемого содержит величины одного знака; как следствие, частные интегральные суммы и вычисляемое значение  $g_n(\rho, \rho', z, k)$  оказываются более устойчивыми к катастрофической потере верных знаков.

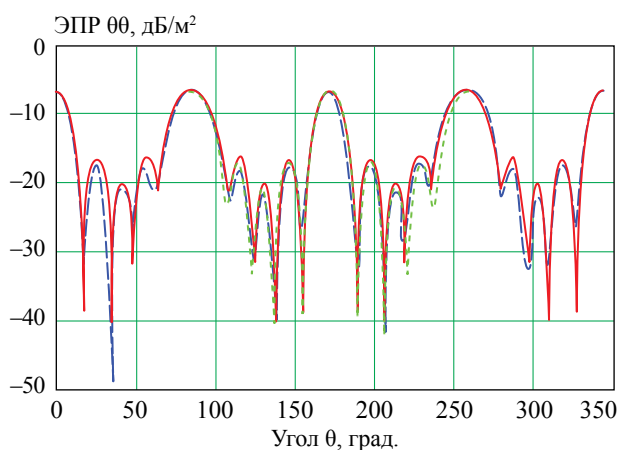
Использованные в разработанной модели вышеописанные способы улучшения сходимости вычислений  $g_n(\rho, \rho', z, k)$  обеспечили интегрирование с требуемой точностью при использовании не более 3-х итераций.

Ниже приводятся результаты расчетов тестовых задач с помощью разработанной модели. На рисунках 8 и 9 приведены графики моностатической ЭПР кругового цилиндра радиусом 7,5 см и длиной боковой поверхности 25 см на длине волны = 15 см. Рассматриваемый пример взят из [10]. Приведенное на этих же

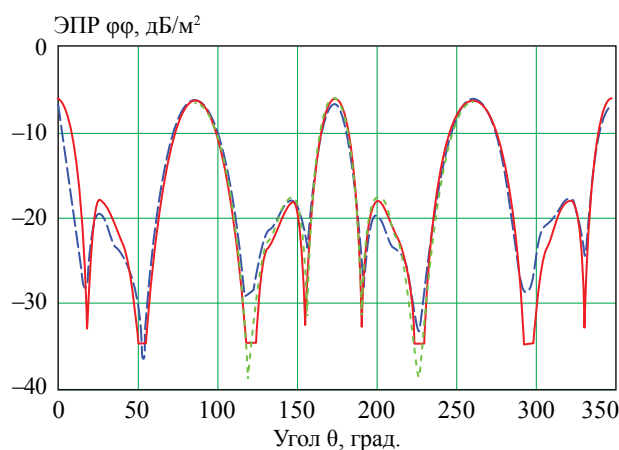
графиках сравнение с [10] показывает удовлетворительное совпадение по угловым направлениям максимумов и провалов индикатрис, а также приемлемое совпадение по их уровням. Предположительно, минимальные значения приведенных в [10] экспериментальных данных ограничены динамическим диапазоном или фоном измерительного оборудования на уровне -35 дБ.

На рисунке 10 приведены результаты расчета ЭПР методом ИУ модели кругового конуса радиусом  $\rho = 3,5$  и углом при вершине  $2\Theta = 23$  градуса. Края и носик конуса скруглены с  $r = 0,01$ , то есть  $0,00286\rho$ . Также приведен тестовый пример – расчет ЭПР данного конуса методом ИУ, взятый из [1], стр. 178, носик и края конуса скруглены радиусом  $r_{\text{края}} = r_{\text{нос}} = 0,0125\rho$ , при этом автор в [1] приводит данные, что дальнейшее уменьшение радиуса закругления носика и края не приводят к изменению рассеянного поля и, следовательно, к изменению ЭПР.

На рисунке 11 приведено сравнение результатов расчета ЭПР кругового конуса с углом при вершине 15 град. и  $ka = 3,08$  (левая половина графика) с результатами расчета и измерений ЭПР такого же конуса, опубликованных

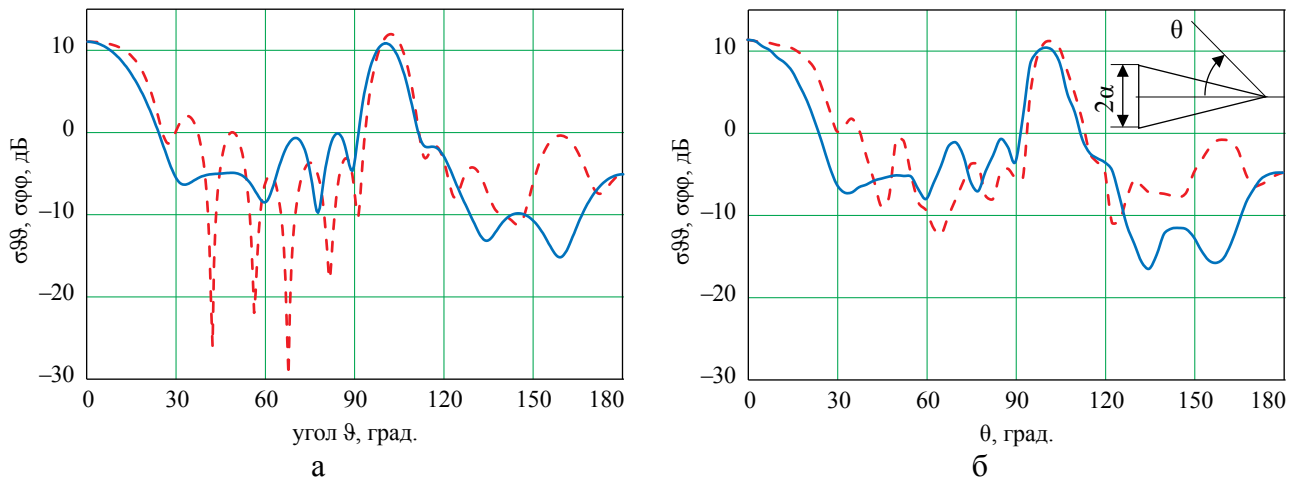


**Рис. 8.** Результаты расчета ЭПР кругового цилиндра, дБ/м<sup>2</sup>, радиусом 7,5 см и длиной боковой поверхности 25 см на длине волны 15 см, сравнение с данными из [10]. Наложение результатов расчета на оригинальный график из [10]. В расчетах использовалось 13 азимутальных гармоник,  $\theta\theta$  – поляризация  
— эксперимент [10]; — расчет методом ИУ [9]; — расчет методом ИУ по методике модели, приведенной в настоящей статье

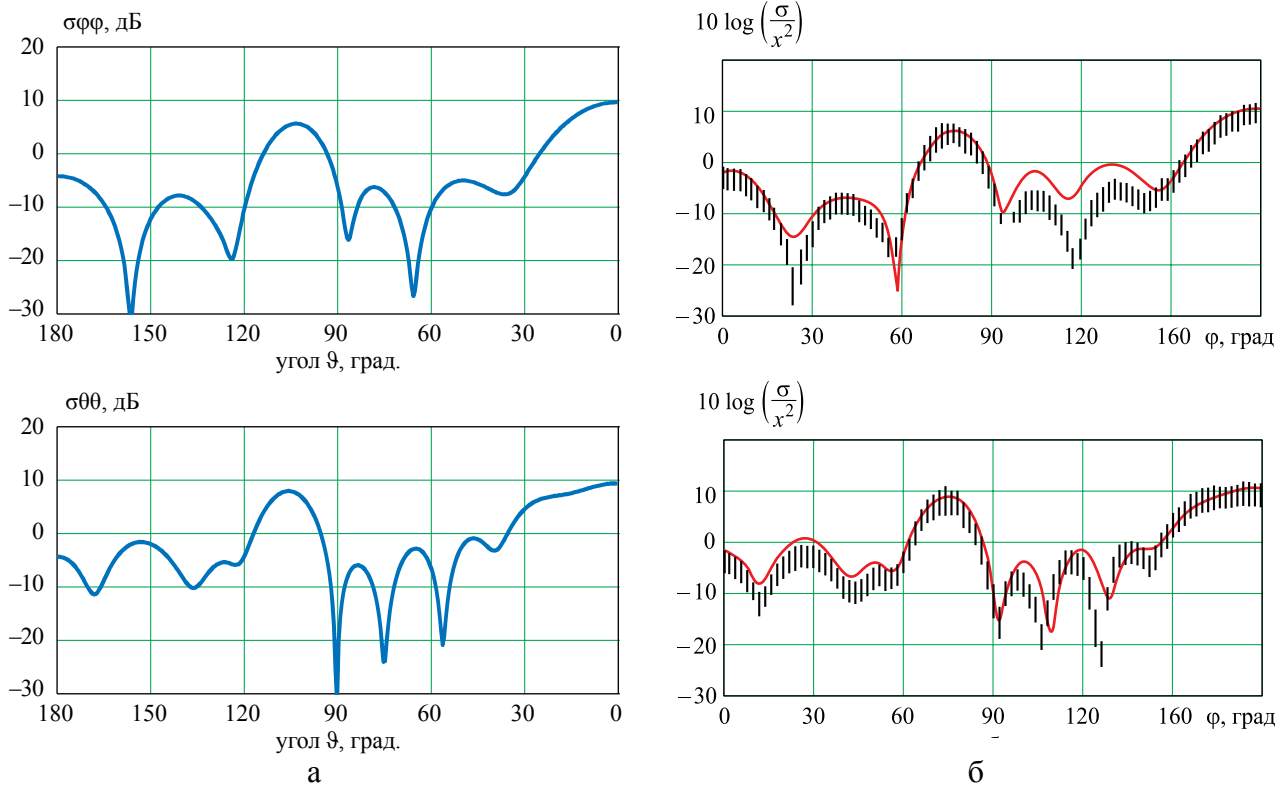


**Рис. 9.** Результаты расчета ЭПР кругового цилиндра, дБ/м<sup>2</sup>, радиусом 7,5 см и длиной боковой поверхности 25 см на длине волны 15 см, сравнение с данными из [10]. Наложение результатов расчета на оригинальный график из [10]. В расчетах использовалось 13 азимутальных гармоник,  $\phi\phi$  – поляризация.  
— эксперимент [10]; — расчет методом ИУ [9]; — расчет методом ИУ по методике модели, приведенной в настоящей статье





**Рис. 10.** Расчет ЭПР конуса: а – методом ИУ, дБ/м<sup>2</sup>, б – сравнение с результатом из [1]



**Рис. 11.** ЭПР конуса, дБ/м<sup>2</sup>, рассчитанная методом ИУ на разработанной модели (а) в сравнении с приведенной в [11] (б)

в [11] (правая половина графика). Результаты расчета лучше совпадают с экспериментальными данными из [11] по сравнению с расчетными данными из [11]. Основные отличия – в глубине «провалов» индикатрис рассеяния, что, по-видимому, объясняется большим шагом дискретизации расчетов, приведенных в [11] (из-за чего точки «провалов» могут быть пропущены), либо недостаточным количеством использованных азимутальных гармоник. Меньший по сравнению с рассчитанным

уровень «провалов» в экспериментальных данных [11], по-видимому, можно объяснить ограничением динамического диапазона использованной для измерений безэховой камеры на уровне –25–28 дБ либо наличием «фона» камеры на этом уровне.

Метод ИУ может успешно использоваться для решения электродинамических задач в случаях, когда применение МКВ и ГТД невозможно. В качестве примера ниже приводятся результаты расчета ЭПР конуса с различными

радиусами закругления ребра «боковая поверхность – дно» вплоть до геометрии – «капля». На рисунке 12 приведена геометрия конуса с углом при вершине  $2\theta$  носа = 15 град., радиус закругления носика конуса ( $r$  носа) постоянный и равен 3 мм, радиус закругления стыка дугового ребра «боковая поверхность – дно» ( $r$  дна) изменяется от 0,04 до 23 см (значение  $r$  дна = 23 см соответствует геометрии «капля»).

На рисунках 13.1–13.10 приведены моноэлектронные индикатрисы рассеяния (ЭПР) данного конуса для длины волны  $\lambda = 0,1$  м для различных радиусов закругления дна ( $r$  дна). На всех рисунках направление  $\theta = 180$  град. соответствует облучению конуса с «носика», направление  $\theta = 0$  град. соответствует облучению конуса со стороны «дна».

На рисунке 14 приведено полученное на основании данных рисунков 13.1–13.10 изменение моноэлектронной ЭПР рассматриваемого конуса от радиуса ребра «боковая

поверхность – дно» при осевом облучении – со стороны «носика» конуса и со стороны «дна».

Как видно из полученной зависимости, моноэлектронная ЭПР конуса при осевом облучении со стороны «носика» в существенной степени зависит от радиуса скругления («стыка») боковой поверхности и донной части. Это обстоятельство объясняется известным фактом – отраженная от конуса волна при его облучении со стороны носа в значительной степени формируется за счет интерференции волн, отраженных от «стыка», и волн, огибающих конус вдоль его образующей. Амплитуда данных волн может значительно превышать амплитуду прямых отражений от носовой части конуса. Амплитуды волн, отраженных от «стыка», уменьшаются при увеличении радиусов скругления.

Приведенные в данном разделе результаты расчетов и сделанные на их основании выводы не являются новыми, а иллюстрируют

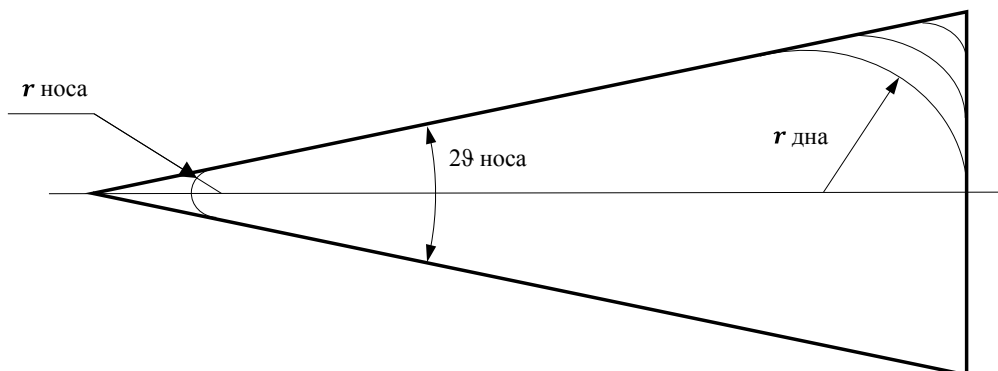


Рис. 12. Геометрия конуса,  $r$  носа = 0,003 м,  $2\theta$  носа = 15 град.

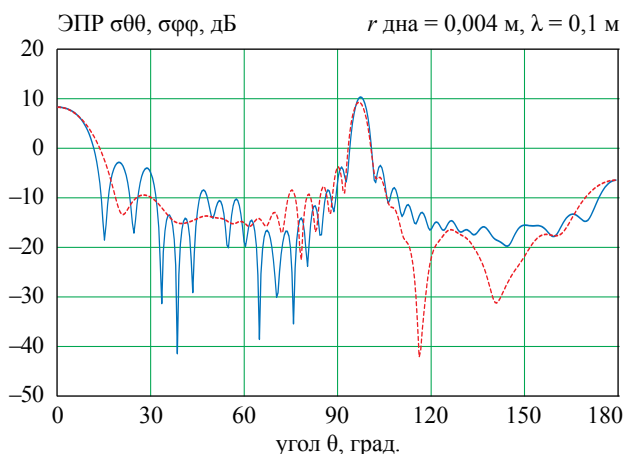


Рис. 13.1. ЭПР конуса, дБ/м<sup>2</sup>,  $r_{\text{носа}} = 0,003$  м,  $r_{\text{дна}} = 0,004$  м,  $\lambda = 0,1$  м  
— ЭПР  $\theta\theta$ ; — ЭПР  $\phi\phi$

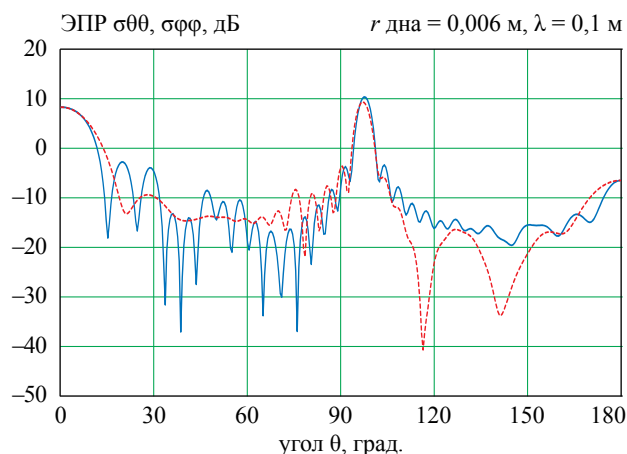
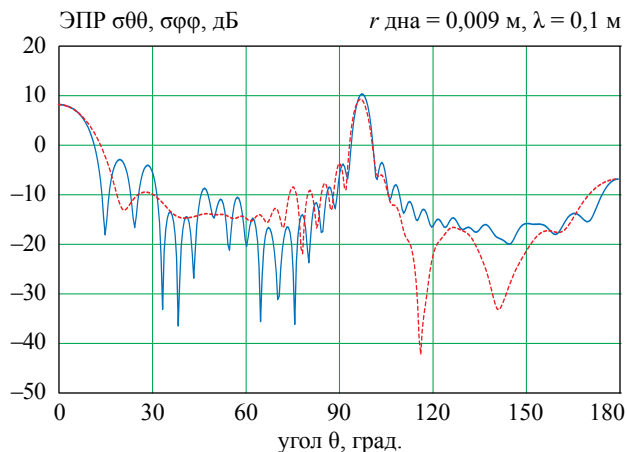
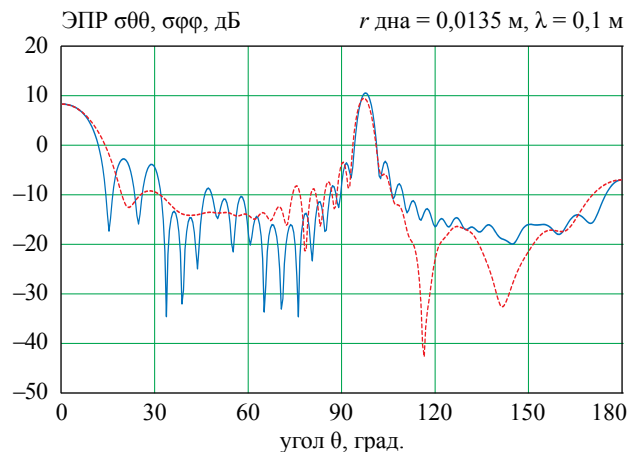


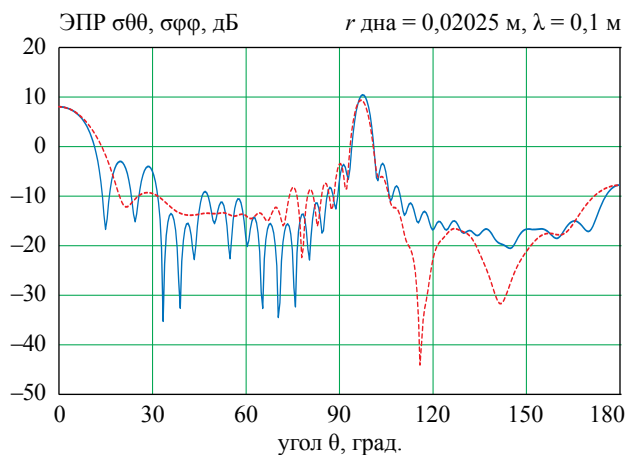
Рис. 13.2. ЭПР конуса, дБ/м<sup>2</sup>,  $r_{\text{носа}} = 0,003$  м,  $r_{\text{дна}} = 0,006$  м,  $\lambda = 0,1$  м  
— ЭПР  $\theta\theta$ ; — ЭПР  $\phi\phi$



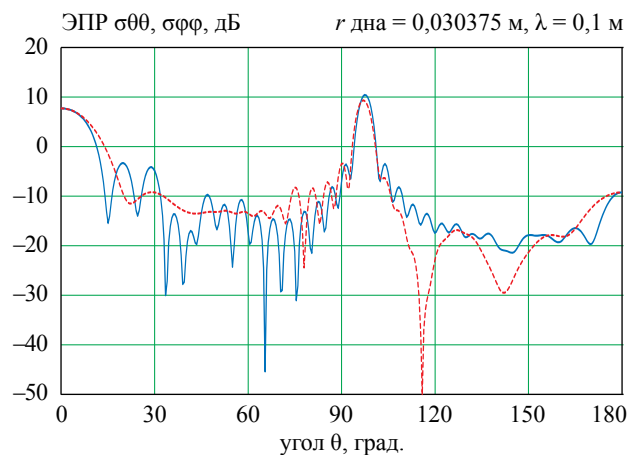
**Рис. 13.3.** ЭПР конуса, дБ/м<sup>2</sup>,  $r_{\text{носа}} = 0,003$  м,  
 $r_{\text{дна}} = 0,009$  м,  $\lambda = 0,1$  м  
— ЭПР  $\theta\theta$ ; — ЭПР  $\phi\phi$



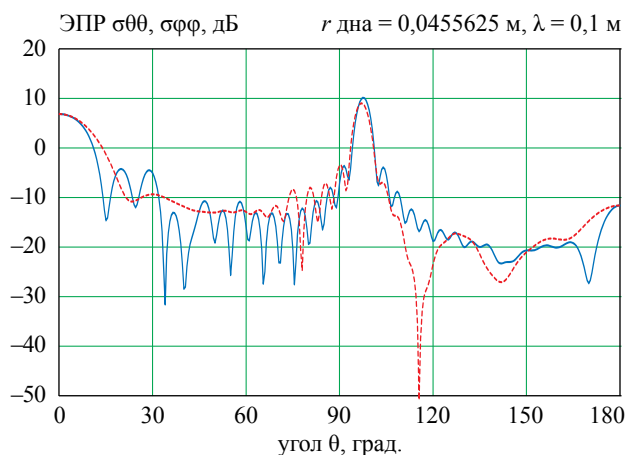
**Рис. 13.4.** ЭПР конуса, дБ/м<sup>2</sup>,  $r_{\text{носа}} = 0,003$  м,  
 $r_{\text{дна}} = 0,0135$  м,  $\lambda = 0,1$  м  
— ЭПР  $\theta\theta$ ; — ЭПР  $\phi\phi$



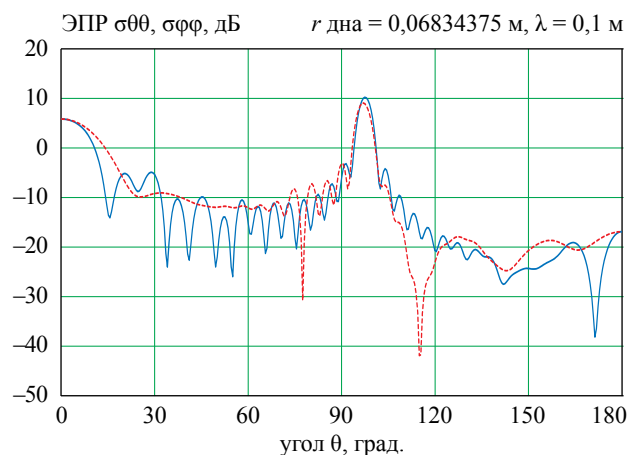
**Рис. 13.5.** ЭПР конуса, дБ/м<sup>2</sup>,  $r_{\text{носа}} = 0,003$  м,  
 $r_{\text{дна}} = 0,02025$  м,  $\lambda = 0,1$  м  
— ЭПР  $\theta\theta$ ; — ЭПР  $\phi\phi$



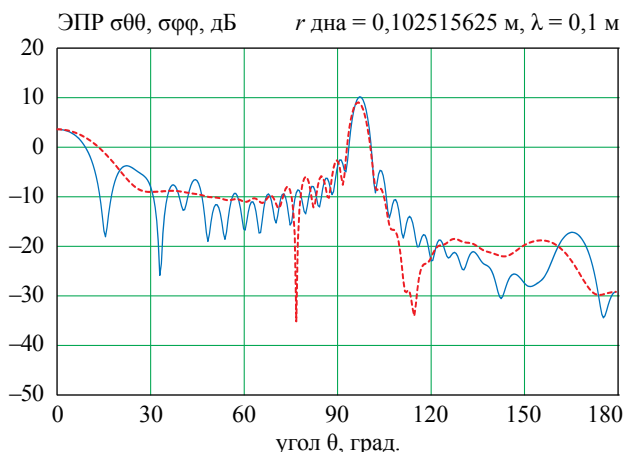
**Рис. 13.6.** ЭПР конуса, дБ/м<sup>2</sup>,  $r_{\text{носа}} = 0,003$  м,  
 $r_{\text{дна}} = 0,030375$  м,  $\lambda = 0,1$  м  
— ЭПР  $\theta\theta$ ; — ЭПР  $\phi\phi$



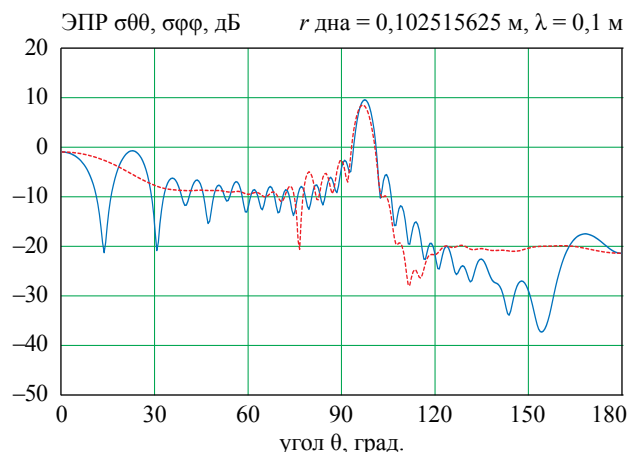
**Рис. 13.7.** ЭПР конуса, дБ/м<sup>2</sup>,  $r_{\text{носа}} = 0,003$  м,  
 $r_{\text{дна}} = 0,0455625$  м,  $\lambda = 0,1$  м  
— ЭПР  $\theta\theta$ ; — ЭПР  $\phi\phi$



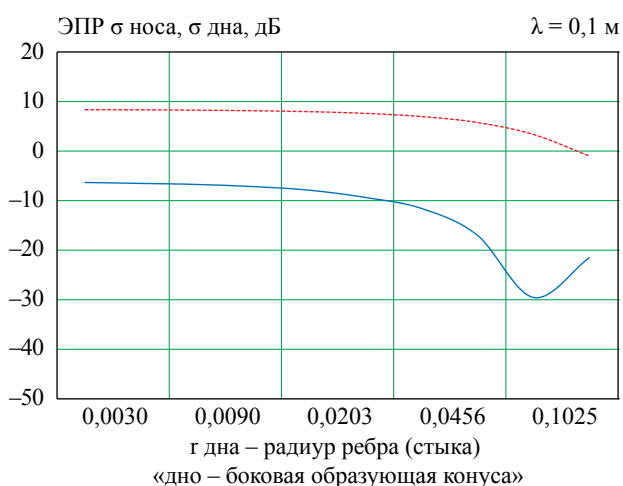
**Рис. 13.8.** ЭПР конуса, дБ/м<sup>2</sup>,  $r_{\text{носа}} = 0,003$  м,  
 $r_{\text{дна}} = 0,06834375$  м,  $\lambda = 0,1$  м  
— ЭПР  $\theta\theta$ ; — ЭПР  $\phi\phi$



**Рис. 13.9.** ЭПР конуса,  $\text{дБ/м}^2$ ,  $r_{\text{носа}} = 0,003 \text{ м}$ ,  
 $r_{\text{дна}} = 0,102515625 \text{ м}$ ,  $\lambda = 0,1 \text{ м}$   
— ЭПР  $\theta\theta$ ; — ЭПР  $\phi\phi$



**Рис. 13.10.** ЭПР конуса,  $\text{дБ/м}^2$ ,  $r_{\text{носа}} = 0,003 \text{ м}$ ,  
 $r_{\text{дна}} = 0,153773438 \text{ м}$ ,  $\lambda = 0,1 \text{ м}$   
— ЭПР  $\theta\theta$ ; — ЭПР  $\phi\phi$



**Рис. 14.** Зависимость моностатической ЭПР конуса при осевом облучении,  $\text{дБ/м}^2$ , геометрия рис. 12, от радиуса скругления стыка дна с боковой образующей,  $\lambda = 0,1 \text{ м}$   
— ЭПР, отражение со стороны носа;  
— ЭПР, отражение со стороны дна

возможности метода ИУ и возможности разработанной модели для решения прикладных задач электродинамики.

Таким образом, разработанные методика и модель обеспечивают расчет моностатической и бистатической ЭПР для широкого класса радиолокационных объектов – металлических тел вращения в полном поляризационном базисе в диапазонах рэлеевского, резонансного и в части примыкающего к нему оптического рассеяния. Предложенные в работе способы повышения точности вычисления матрицы взаимных сопротивлений

позволяют получать устойчивые в вычислительном отношении решения для широкого круга практических задач. Предложенный способ оценки точности аппроксимации решений конечным рядом азимутальных гармоник применим как к ИУ I, так и к ИУ II рода. Приведенные примеры решения тестовых задач и сравнение с известными результатами иллюстрируют их хорошее совпадение. Данные примеры рассчитывались на персональной ЭВМ общего пользования, не содержащей спецвычислителей, при этом время расчетов составило от единиц минут до нескольких десятков минут в зависимости от электрического размера объекта и сектора исследуемых углов, что определяется количеством используемых азимутальных гармоник. Модель обеспечивает построение геометрий широкого класса объектов – тел вращения, образующая которых аппроксимируется набором отрезков и дуг различных размеров и кривизны. Использование метода ИУ позволяет получить в резонансном диапазоне точность решения электродинамических задач, недостижимую для МКВ и ГТД.

### Список литературы

1. Vasilyev E. N. Vozbuzhdeniye tel vrashcheniya. M.: Radio i svyaz, 1987. 272 s. (Russian).
2. Borovikov E. A., Kinber V. E. Geometrical theory of diffraction. M.: Svyaz, 1978, 248 p. (Russian).



3. Ufimtsev P. Ya. Method of edge waves in the physical theory of diffraction. M.: Sovetskoe radio, 1962, 244 p. (Russian).
4. Markov G. T., Vasilyev E. N. Matematicheskiye metody prikladnoi elektrodinamiki. M. Sovetskoe radio, 1970, str. 11. (Russian).
5. Muath Gouda. The Method of Moment for the Electromagnetic Scattering from Bodies of Revolution Final Master's Degree Thesis Subject Category: Electrical Engineering Series Number: 4/ 2008., 74 p.
6. Ra'ed A. Malallah, Dr. Zaki A. Ahmed & Dr. Ahmed H. Abood. Studying the effect of conducting bodies of revolution (bor) shape on computing radar cross section (RCS). Journal of Missan Researchers, Vol (6), No (11), 2009, p. 45.
7. Sveshnikov A. G., Bogolyubov A. N., Kravtsov V. V. Lektsii po matematicheskoi fizike Uchebnoye posobiye. M.: Izdatelstvo MGU, 1993, str. 75. (Russian).
8. J. R. Mautz, R. F. Harrington. Radiation and scattering from bodies of revolution. Appl. Sci. Res. 20, June 1969, p. 405-435.
9. Forsythe G., Malcolm M., Moler C. Computer methods for mathematical computations. Transl. from Eng. by Kh. D. Ikramov. M.: Mir, 1980, 277 p., p. 28.
10. Setukha A. V., Aparinov A.A., Stavtsev S. L., Fetisov S. N. Superkompyuternye tekhnologii pri realizatsii metoda granichnykh integralnykh uravneniy v zadachakh elektromagnitnogo rasseyaniya. MGU im. M. V. Lomonosova, TsAGI im. N. E. Zhukovskogo, IVM RAN, OKB im. A. Lulki. Prezentatsiya seminarov 26 noyabrya 2019. [http://agora.guru.ru/sct/files/2019\\_10\\_01\\_Setuha\\_p1.pdf](http://agora.guru.ru/sct/files/2019_10_01_Setuha_p1.pdf), 51 s. (Russian).
11. Shustikov V. Yu. Software package for calculating the reflectance profile of axisymmetrically-shaped targets in resonant and high frequency wavelength ranges. Journal of "Almaz – Antey" Air and Space Defence Corporation, 2018, No. 2, p. 75–81.

### Об авторе

**Рунов Александр Адольфович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник публичного акционерного общества «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел», Москва, Российская Федерация. Область научных интересов: электродинамика, радиолокация.

## Modelling of the reflectance profile of axisymmetrical radiolocation objects using the integral equation method

Runov A. A.

*Public Joint Stock Company Vimpel Interstate Corporation, Moscow, Russian Federation*

Based on the first-kind integral equation method for the electric field, the procedure and software for calculating the radar cross-section of axisymmetrical objects, bodies of revolution, are developed. Algorithms are proposed for computation of the matrix of mutual impedances and Green's function of a ring source providing the computation accuracy required for obtaining a stable solution. The method of solution approximation accuracy evaluation by azimuthal harmonics is proposed. Comparison with test examples is carried out and the applicability for solving real-world problems is shown.

**Keywords:** electromagnetic wave diffraction, radar cross-section, integral equation method

### Information about the author

**Runov Aleksandr Adolfovich** – Candidate of Engineering Sciences, Leading Researcher, Public Joint Stock Company Vimpel Interstate Corporation, Moscow, Russian Federation. Science research interests: electrodynamics, radiolocation.





## 120 лет ПАО «НПП «Импульс»



А. И. Мальцев

15 декабря 2021 г. исполняется 120 лет одному из старейших предприятий Концерна ВКО «Алмаз-Антей» – Публичному Акционерному Обществу «Научно-производственное предприятие «Импульс».

Основанное в 1901 году у Крестовской заставы как «Товарищество дроболитейного и патронного завода» и получившее позднее имя «Феттер и Гинкель», предприятие в Первую мировую войну участвовало в выпуске артиллерийских гранат французского образца, в Гражданскую войну выпускало винтовочные патроны, а в период между войнами производило дробь, охотничьи патроны и бумажные конденсаторы.

С 1937 года под именем «Завод № 58 имени Ворошилова» предприятие специализируется на ручных и винтовочных гранатах и взрывателях для гранат и мин, пиропатронах и бумажных гильзах для основных метательных зарядов 50-, 82- и 120-мм мин и сигнальных патронов. В 1938 году на предприятии создается КБ-30, конструкторы которого внесли значительный вклад в развитие ручных гранат, гранатометов и взрывателей. В 1940 г. на вооружение принята разработанная КБ-30 знаменитая противотанковая граната

РПГ-40 (конструктор М.И. Пузырёв), состоявшая на вооружении до 1950-х годов. К началу Великой Отечественной войны на заводе трудились почти 3 тысячи человек.

Великая Отечественная война стала важной главой в истории предприятия. Несмотря на эвакуацию в Киров и в Свердловскую область почти половины станочного парка и значительной части рабочих и инженеров, завод и КБ у Крестовской заставы продолжают производить и разрабатывать боеприпасы и взрыватели. В 1941 году приняты на вооружение новая ручная граната РГ-41 (конструктор Н.П. Беляков) и запал УЗРГ для гранат Ф-1 и РГ-41 (конструкторы А.А. Бедняков и Е.М. Вицени), с небольшими изменениями этот запал широко применяется и в настоящее время. В 1942 году конструкторы А.А. Бедняков, Е.М. Вицени, Н.П. Беляков и М.И. Пузырёв стали лауреатами Сталинской премии в одном ряду с такими конструкторами, как Ильюшин, Кошкин, Симонов, Шавырин, Шпитальный, Яковлев, Дегтярёв. В 1942 году сдана на вооружение новая ручная граната РГ-42, а в 1943 году – противотанковая кумулятивная граната РПГ-43. КБ-30 модернизировало противотанковые ящичные мины ЯМ-5, разработало винтовочную противотанковую кумулятивную гранату ВКГ-40, пистолетную

© Мальцев А. И., 2021



гранату, динамо-реактивное устройство метания и кумулятивную мину для него, гранатомет на основе противотанкового ружья.

Завод № 58 за годы войны произвел более 62 миллионов рукояток и корпусов для ручных и винтовочных гранат, более 62 миллионов взрывателей для гранат и инженерных мин, почти 190 миллионов минометных и сигнальных гильз и 140 миллионов пиропатронов и детонаторов, миллион комплектов артиллерийской

картечи. На заводе в войну трудились от 3,5 до 4 тысяч человек. Директорами завода в этот период были И. Нарикашвили (1941–1944) и К. Михайлов (1944–1946). К окончанию войны на заводе № 58 начало динамично развиваться гражданское производство, были разработаны и освоены индукционные высокочастотные закалочные и сушильные агрегаты, очень востребованные в промышленности, расширено до 16,5 миллиона штук



Изделия разработки и изготовления завода № 58 в Великую Отечественную войну





производство гильз для охотничьих патронов, налажено производство запчастей для тракторов, осваивалось производство бытовых холодильников и газовых водонагревателей, игрушек. Однако в 1946 году предприятие ожидал новый резкий поворот в судьбе, связанный с развитием в стране радиолокационной тематики.

В годы войны на заводе № 521 во Владимире (АО «Владимирточмаш»), куда был эвакуирован из Ленинграда Государственный союзный институт № 44 (ГСИ-44), занимавшийся разработками взрывателей на электрическом принципе действия, на базе лабораторий института № 6 (Бориса Васильевича Карпова) и № 8 (Александра Аркадьевича Рассушина) возник коллектив, создавший в 1944–1945 годах прототип радиолокационного взрывателя для авиабомб на лампах собственной разработки.

В 1945 году советская разведка получает образец и документацию американского неконтактного радиолокационного зенитного артиллерийского взрывателя Mark 32 VT proximity fuse, который являлся одним из самых больших технических достижений и секретов западных союзников в годы войны. В ноябре 1945 года в составе Наркомата боеприпасов Постановлением СНК СССР № 2893-848 «Об организации научно-исследовательской работы

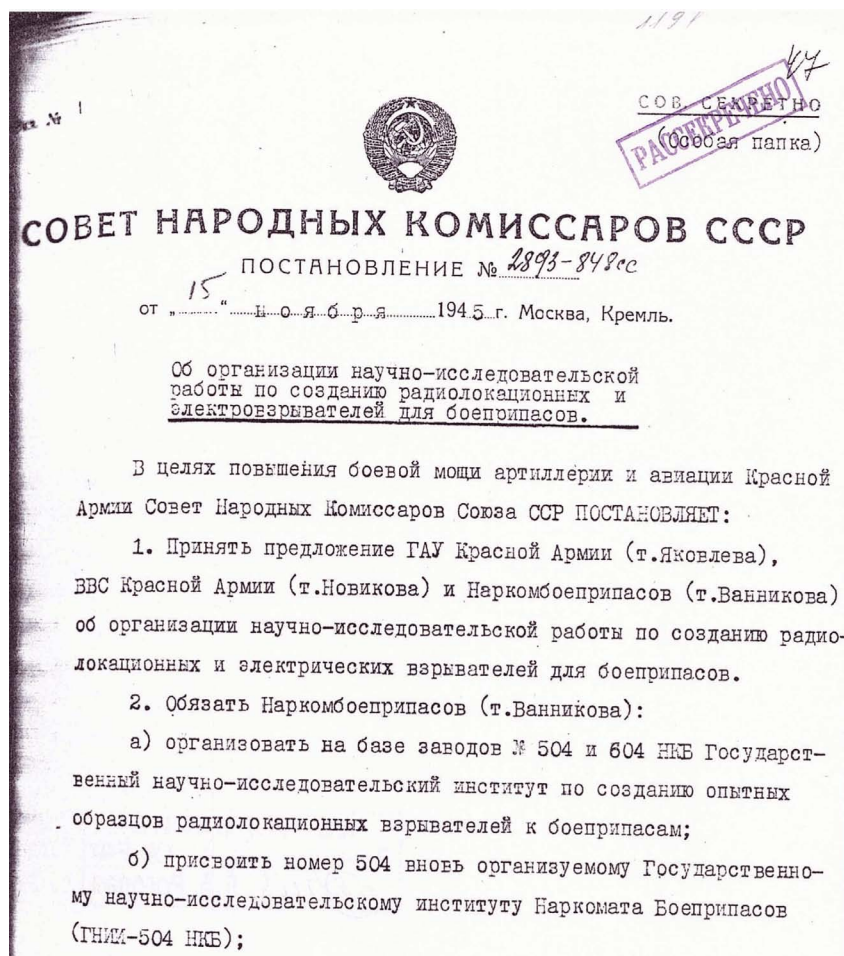
по созданию радиолокационных и электро-взрывателей для боеприпасов» организован Государственный научно-исследовательский институт по созданию опытных образцов радиолокационных взрывателей (ГНИИ-504 или НИИ-504), получивший задание «разработать по имеющемуся американскому образцу радиолокационный взрыватель к реактивным снарядам, предназначенным для стрельбы с самолета по самолету, ...закончить разработку радиолокационного взрывателя для авиабомб, вызывающего взрыв авиабомб над целью, организовать научно-исследовательскую работу по разработке радиолокационных взрывателей для: снарядов зенитной артиллерии; снарядов наземной артиллерии; мин гладкоствольной артиллерии; реактивных снарядов для стрельбы по наземным целям». Основой института стали две лаборатории Государственного союзного института № 44, перебазированные из Владимира в Москву на небольшой завод № 504, производивший детали капсюльных втулок для артиллерийских выстрелов.

Для развернутых широким фронтом работ в НИИ-504 не хватало сотрудников, площадей, производственных мощностей. В августе 1946 года Постановлением Правительства НИИ-504 перебазировался на площадку завода № 58, который передается институту как опытный завод, и далее судьба предприятия, существовавшего с 1901 года, неразрывно связана с НИИ-504. С 1947 года опытный завод № 58 начинает освобождаться от гражданской тематики и осваивает производство радиолокационной техники, разрабатываемой НИИ-504. В качестве серийного завода институту был придан завод № 571 (ныне АО «НПП «Дельта»).

Институт активно формируется и пополняется инженерными и техническими кадрами. Приходят специалисты, демобилизованные из армии (например, М.М. Кушнир, в скором времени один из главных конструкторов). Переводятся сотрудники других предприятий и организаций: из завода № 564 (Новосибирск, АО «Точмаш»), КБ-398 (Москва, АО «НПО «Прибор»), НИИ-17 (Москва, Московский НИИ приборостроения – АО «Концерн



Александр Аркадьевич Рассушин – создатель первых отечественных радиовзрывателей



Постановление СНК об организации НИИ-504

«Вега»), Академии связи Красной Армии, Главного артиллерийского управления. По путевкам Министерства направляются десятки выпускников вузов и техникумов из МГУ, МАИ, МВТУ, МИИС, Московского авиационно-приборостроительного техникума, Московского механического техникума.

В структуре института образованы цеха № 1 и 2 (наряду с существованием опытного завода), КБ-1 (начальник – Халилеев), КБ-3 (Шварцман), КБ-4 (Лилье), КБ-5 (Медведев), КБ-6 (Каган), КБ-7 (Павлов), лаборатории № 5, 6 (Карпов), 8 (Альтман), 9 (Кушнир), 10 (Соголов), 13 (Потиевский), 14 (Берензон), 15 (Волкогон), бюро теоретических исследований и расчетов, лаборатория изоляционных материалов, отдел методики, правил и норм испытаний, лаборатория общих испытаний, испытательная станция, центральная лаборатория.

Привлекаются в штат института по совместительству в качестве консультантов и руководителей ведущие ученые: старший научный

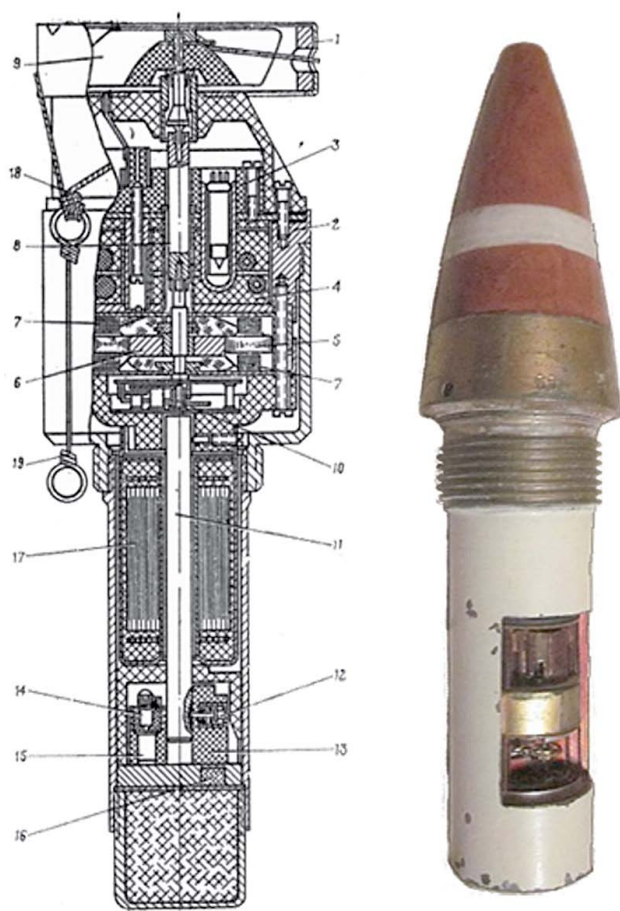
сотрудник ФИАН Академии наук СССР профессор А.И. Шальников в лабораторию № 8; начальник кафедры электрорадиотехники Артиллерийской Академии Красной Армии им. Дзержинского профессор Н.Н. Миролубов; один из ведущих ученых в области теории автодинов – начальником бюро теоретических исследований и расчетов; в лабораторию № 5 – профессор К.С. Займовский, доктор технических наук из электротехнического НИИ-627 (АО Корпорация «ВНИИЭМ»).

Начинаются разработки взрывателей АР-01 (для авиабомб), АР-11 (скорее всего, для реактивных авиационных снарядов), АР-21 (для зенитной артиллерии) и АР-31 (вероятно, для полевой артиллерии), разработки специальных тиратронов и стабилизаторов. Одновременно создавалось оборудование, контрольная измерительная аппаратура. В круг работ были включены НИИ и заводы электронной промышленности Москвы, Ленинграда, Новосибирска, Томска и других



городов, разработавшие по техническим требованиям НИИ-504 миниатюрные ударопрочные электронные лампы, конденсаторы, сопротивления и специальные источники питания.

Директором института в 1945–1947 годах был инженер-полковник М.М. Гейман, в 1947–1949 годах – инженер-полковник К.В. Безбородов, в 1949–1953 – Н.И. Овсянников (пришел с поста главного инженера завода № 10 – скорее всего, это пермское ФГУП «Машзавод им. Ф.Э. Дзержинского»).



Первые образцы отечественных радиовзрывателей для авиабомб (АР-01 или БРВ-1) и зенитных снарядов (АР-21)

Важная страница в истории предприятия – участие в советском Атомном проекте и разработках радиовзрывателей для ядерных боеприпасов артиллерии и тактических ракет.

Весной 1946 года А.А. Рассушин получает от начальника Первого главного управления при Совмине СССР Б.Л. Ванникова, руководившего организациями, вовлеченными в Атомный проект, поручение разработать

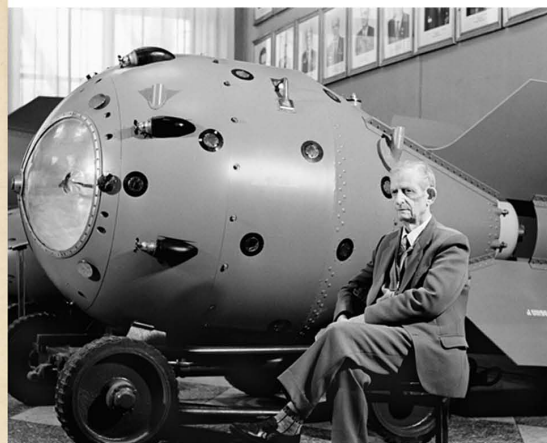
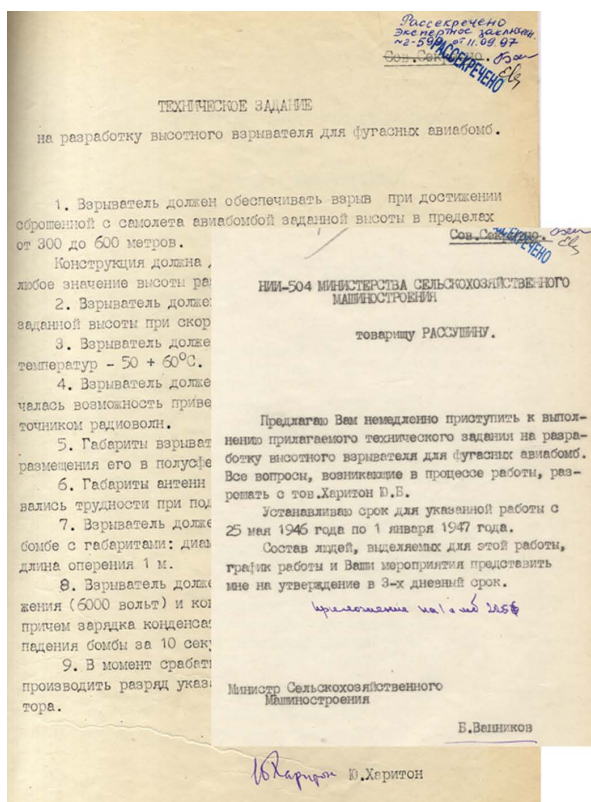
«высотный взрыватель для фугасной бомбы» по техническому заданию, подписанному Ю.Б. Харитоном – главным конструктором РДС, как тогда обозначались первые советские атомные бомбы. С 1946 по 1951 год институт разрабатывает высоковольтную иницирующую систему для синхронного подрыва детонаторов атомной бомбы РДС-1 и электронные блоки бомбы, участвует в разработках высотного взрывателя. Образцы испытанных в 1949–1951 годах первых советских ядерных зарядов и бомб комплектовались высоковольтной системой разработки и производства НИИ-504.

Впоследствии НИИ-504 поручались разработки радиовзрывателей также для ядерной артиллерии и тактических ракет. В 1954–1956 годах был разработан радиовзрыватель «Квадрат» для снаряда 406-мм артиллерийского орудия 2А3 «Конденсатор». В 1970–1980-х годах институтом были разработаны радиовзрыватели для ядерных снарядов артиллерийских систем калибров 203 мм (самоходная пушка «Пион») и 152 мм (самоходная пушка «Гиацинт» и буксируемая 2А36 «Гиацинт-Б».

В 1954 году СССР начал разработки тактических ракет «Марс», «Филин». Ракеты разрабатывал НИИ-1 (ныне АО «Корпорация «МИТ»)), а датчик воздушного подрыва для боевых частей – НИИ-504, главный конструктор М.М. Кушнир. Ракетные комплексы 2К1 «Марс» и 2К4 «Филин» были приняты на вооружение в 1958 г. и эксплуатировались до 1960–1962 гг., когда на смену им пришел более совершенный комплекс 2К6 «Луна», для которого НИИ-504 разработал радиовзрыватель «Треугольник-2».

9 августа 1950 г. Совмин СССР принимает эпохальное Постановление № 3389-1426 «О разработке управляемых снарядов-ракет и новейших радиолокационных средств управления ими с целью создания современной наиболее эффективной ПВО городов и стратегических объектов», с которого начинается современная отечественная противовоздушная оборона. Создаваемая система получила шифр «Беркут». В составе «противосамолетного снаряда-ракеты» должен был быть





Документы о привлечении НИИ-504 к участию в Атомном проекте СССР, первая атомная бомба РДС-1 и академик Ю.Б. Харитон



Первые отечественные артиллерийские и ракетные комплексы с ядерными боеприпасами, оснащенными радиовзрывателями разработки НИИ-504

«взрыватель – радиодистанционный, обеспечивающий взрыв снаряда в случае пролета вблизи цели на расстоянии 50–75 метров». Опытные образцы ракет должны были быть изготовлены к февралю 1952 г. Руководство всеми работами по созданию системы «Беркут» было

возложено на Специальный комитет, который руководил Атомным проектом. Разработку радиодистанционного взрывателя поручили НИИ-504, что на многие годы вперед определило основную тематику института и опытного завода.



В то время в стране в области ближней радиолокации отсутствовал научный и экспериментальный задел. Для создания такого задела в НИИ-504 постановлением Правительства была поставлена фундаментальная НИР «Форт», руководство которой было поручено профессору Н.Н. Миролубову. Его заместителями были Б.В. Карпов, впоследствии генеральный директор предприятия, Н.С. Расторгуев – выпускник МГУ 1946 года, позже главный конструктор, и Я.А. Бурштейн. Отделы, участвовавшие в НИР «Форт», комплектовались выпускниками институтов. Многие из тех, кто пришел на завод прямо со студенческой скамьи, – В.И. Кабановский, Г.И. Котов, Л.М. Кривенцова, Н.А. Мартынов, В.П. Рюмин, Л.С. Субботин и другие – стали главными конструкторами, начальниками основных подразделений. Результаты НИР «Форт» стали основой построения радиовзрывателей для ЗУР с использованием сантиметрового диапазона волн. Отделом под руководством Б.В. Карпова впервые в стране были созданы маломощные ударостойкие низковольтные магнетроны, впоследствии использовавшиеся много лет в различных изделиях. Лабораторией Н.С. Расторгуева были разработаны антенны и другие СВЧ-узлы. Лабораторией Я.А. Бурштейна были разработаны основы помехозащищенности радиовзрывательных устройств.

Начинается интенсивная разработка «изделия 54», как назван был радиолокационный взрыватель для первой ракеты В-300 системы «Беркут» (системы С-25). Главным конструктором разработки был назначен Н.С. Расторгуев. В институте развивается отдел испытаний, создается подразделение внешних испытаний, на Софринском научно-исследовательском полигоне (г. Красноармейск) проводятся облеты самолетами расположенных на вышке радиовзрывателей, там же организуется площадка для снятия диаграмм направленности антенн. Уже в июле 1951 года опытный завод начинает подготовку производства изделия 54, параллельно производство организуется на заводе № 564 (новосибирский «Точмаш»), куда НИИ-504 поставляет приборы для проверки и регулировки. К концу

года опытный завод полностью становится предприятием по выпуску радиолокационных изделий. В июле–августе 1951 года НИИ-504 успешно выполняет госзадание по выпуску «изделия 54». Сотрудники института участвуют в испытаниях в в/ч 29139, г. Знаменск-5, на основном полигоне ПВО.

В конце 1952 года на базе завода № 571 создается филиал НИИ-504, куда вместе с частью коллектива института (около двухсот разработчиков и конструкторов в составе трех отделов полностью и двух отделов частично) передается вся тематика радиолокационных и оптических взрывателей для артиллерии и реактивных снарядов. Позднее филиал становится отдельным НИИ-571 (ныне АО «НПП «Дельта»). НИИ-504 полностью сосредотачивается на тематике ракетной ПВО.

В 1953 году происходит смена руководства НИИ-504. Директором назначается Е.М. Дубровский, заместителем директора по научной работе – И.И. Бакулов.

Первая в стране ЗУР с радиовзрывателем «изделие 54» была принята на вооружение в 1955 году в составе системы ПВО Москвы С-25. Ею были оснащены 56 входящих в систему полков зенитно-ракетных войск. За вклад в эту разработку 28 работников института были награждены государственными наградами, в том числе И.И. Бакулов, А.Н. Исаева, Б.В. Карпов, Н.А. Мартынов, В.А. Печорин, Н.Д. Пославский, Н.С. Расторгуев, Л.С. Субботин и другие.

Следует отметить, что для системы С-25 в 1955–1957 годах была разработана ракета со специальной боевой частью, к радиовзрывателю которой были предъявлены повышенные требования по дальности действия и надежности. Разработку такого радиовзрывателя успешно выполнил НИИ-504 (главный конструктор разработки – Н.А. Мартынов).

С ноября 1953 года по Постановлению Совмина СССР № 2838-1201 начинается разработка перевозимого комплекса ПВО С-75 «Двина», для которого НИИ-504 разрабатывает доплеровский радиовзрыватель «Шмель» (главный конструктор разработки Б.Ф. Челышев). Для модернизированных ракет комплекса С-75 был разработан один



Основной типаж комплексов ПВО с ракетами, оснащенными взрывателями НИИ-504 – НИИРТА – «Импурса»

из первых радиовзрывателей, использовавших импульсный принцип действия. Этот комплекс, принятый на вооружение в 1957 году, модифицировался до 2000 года и являлся самым распространенным в мире. Самый известный случай боевого применения С-75 – поражение 1 мая 1960 года над Свердловском американского самолета-шпиона U-2 с пилотом-разведчиком Пауэрсом. Наиболее массированно комплекс применялся во время войны во Вьетнаме, где американцы и их союзники потеряли более 3,5 тысячи самолетов. По разным данным, до двух третей из них были сбиты ракетами комплекса С-75.

На основе опыта разработок активных доплеровских радиовзрывателей в 1955–1957 годах был создан радиовзрыватель «Снегирь» (главный конструктор В.П. Рюмин) для ракеты Р-8 (К-8) «воздух-воздух». На вооружение «Снегирь» был принят в составе ракеты Р-8М (К-8М) для перехватчика Су-11 в 1962 году. К тому моменту тематика радиовзрывателей для ракет «воздух-воздух» по решению Министерства машиностроения была передана в НИИ-571 (АО НПП «Дельта»).

В середине 1950-х годов перед промышленностью была поставлена задача борьбы со средствами воздушного нападения, действующими на низких высотах. Для разрабатывавшейся КБ-1 системы С-125 (АО «НПО «Алмаз»,

главный конструктор Ю.Н. Фигуровский) ракету разрабатывало ОКБ-2 (ныне – АО «Машиностроительное КБ «Факел» им. академика П.Д. Грушина), а радиовзрыватель для ракеты – НИИ-504 (главный конструктор А.Д. Парфёнов, а затем В.Е. Дубровин). Комплекс С-125 «Нева» был принят на вооружение в 1961 году. На экспорт в 40 стран было продано более 400 комплексов. По состоянию на 2016 год около 30 стран продолжают эксплуатировать комплекс С-125, ведется его модернизация.

В 1962 году на вооружение был принят вариант системы С-125 «Волна» для Военно-морского флота. Для него уже в 1980-е годы был разработан новый доплеровский взрыватель с узкополосной селекцией и фазовой пеленгацией, обеспечивший поражение комплексом противокорабельных ракет, летящих на низкой высоте.

В конце 1950-х годов по решению Правительства СССР была начата разработка перевозимой системы ПВО большой дальности С-200 для защиты территории страны. Головным предприятием по комплексу являлось ЦКБ «Алмаз», генеральный конструктор – А.А. Расплетин. Ракету разрабатывало ОКБ-2 под руководством главного конструктора П.Д. Грушина, а радиовзрыватель – НИИ-504 (главный конструктор





разработки – Н.С. Расторгуев). Перед разработчиками радиовзрывателя встала задача поиска новых технических решений, которые позволили бы совместно с боевой частью создать боевое снаряжение ракеты, способное поражать цели в широком диапазоне относительных скоростей и при разнообразных условиях встречи. Традиционное построение радиовзрывателя (РВ) с бортовыми узкоугольными антеннами оказалось неприемлемым. Совместно со специалистами ЦКБ «Алмаз» было предложено разрабатывать РВ, комплексированный с полуактивной головкой самонаведения ракеты. При непосредственной поддержке А.А. Расплетина совместными усилиями специалистов двух организаций были найдены оптимальные пути построения такого радиовзрывателя. Для решения задачи пришлось разместить антенну радиовзрывателя на гиросtabilизированной антенне ГСН. За счет использования гетеродинных сигналов ГСН и применения узкополосной доплеровской фильтрации удалось решить задачи согласования области срабатывания РВ с полем разлета осколков, устойчивой работы в пассивных помехах и работы на сверхмалых высотах. Введение фазовой обработки решило задачи борьбы с активными помехами.



Главный конструктор НИИ-504 – НИИРТА  
в 1953–1989 годах  
Герой Социалистического Труда  
Николай Сергеевич Расторгуев

Комплекс С-200 «Ангара» был принят на вооружение в 1967 году. К этому моменту НИИ-504 был переименован в НИИ радиотехнической аппаратуры (НИИРТА) с заводом радиотехнической аппаратуры (ЗРТА). Комплекс С-200 «Ангара» поставлялся на экспорт и по состоянию на 2016 год состоял на вооружении ПВО более чем 10 стран. За вклад в создание комплекса С-200 Н.С. Расторгуев был удостоен звания Героя Социалистического Труда.

В семидесятые годы был создан ряд радиовзрывателей для постоянно модернизируемых ракет системы ПВО С-200, в том числе особо надежный взрыватель для ракеты со специальной боевой частью. Работы проводились под руководством главного конструктора Н.С. Расторгуева и его заместителей В.И. Кабановского и Н.Д. Пославского.

В 1977 году на базе НИИРТА и ЗРТА было образовано научно-производственное объединение «Импульс».

В конце шестидесятых годов прошлого века правительство принимает решение о создании мобильной системы ПВО С-300, способной поражать самые разнообразные средства воздушного нападения на всех высотах, включая предельно малые. Разработку поручили ЦКБ «Алмаз», главным конструктором стал Б.В. Бункин.

Разработка радиовзрывателя велась под руководством Н.С. Расторгуева и позднее Г.Л. Тарачкова для двух типов ракет: с командным наведением и полуактивным самонаведением. С целью экономии времени и средств в НПО «Импульс» разрабатывался унифицированный радиовзрыватель для двух типов ракет. Было найдено оптимальное с технической точки зрения решение, когда радиовзрыватель для ракеты с самонаведением дополнялся блоком с управляемой в одной плоскости приемной антенной в ракете с командным наведением. В разработке получили дальнейшее развитие идеи, заложенные в радиовзрывателе системы С-200. При разработке широко применялись цифровые интегральные микросхемы. Использование во взрывателе информации об условиях встречи ракеты с целью позволило создать эффективное боевое снаряжение ракеты.



Система С-300 одновременно разрабатывалась для войск ПВО страны (С-300ПТ «Фаворит», принята на вооружение в 1978 году) и Военно-морского флота (С-300Ф «Форт», принята на вооружение в 1984 году).

По совокупности заслуг за участие в разработках комплексов ПВО в 1981 году звание Героя Социалистического Труда было присвоено генеральному директору НПО «Импульс» Б.В. Карпову. Тогда же за высокие трудовые достижения предприятие было награждено орденом Трудового Красного Знамени.

Во второй половине 1980-х годов началась модернизация системы С-300 под названием С-300ПМУ с ракетой, использующей принцип самонаведения, которая и стала основой для последующего развития и совершенствования комплекса. Заложенные в радиовзрыватель для этой системы принципиальные технические решения должны были компенсировать новые угрозы со стороны средств воздушного нападения: появились оперативно-тактические и крылатые ракеты, резко увеличились скорости целей и уменьшилась их отражающая поверхность. Работы проводились под руководством Н.С. Расторгуева практически тем же коллективом, который занимался разработкой радиовзрывателя для ракет системы С-200. Комплекс С-300ПМУ1 был принят на вооружение в 1992 году, причем обеспечена возможность применения его ракеты в более ранних модификациях комплексов С-300П и С-300Ф.

В восьмидесятые годы в НПО «Импульс» началась разработка радиовзрывателей для ракет системы С-400 «Триумфатор» (головное по комплексу – ЦКБ «Алмаз»). Система С-400 разрабатывалась как противосамолетная большой дальности и нестратегическая противоракетная, способная поражать баллистические цели. Разработки начались под руководством Г.Л. Тарачкова. Позднее работы возглавил Г.И. Котов, а потом А.Е. Ластовецкий.

В начале 1972 года Правительством СССР было принято постановление о разработке нового зенитного ракетного комплекса «Бук» на замену комплекса 2К12 «Куб» для ПВО Сухопутных войск. Комплекс 9К37



Директор НИИРТА – НПО «Импульс»  
в 1961–1988 годах

Герой Социалистического Труда  
Борис Васильевич Карпов

с ракетой 9М38 был принят на вооружение в 1979 году. Для этой ракеты НИИРТА (главный конструктор разработки Г.И. Котов) был создан взрыватель с приемником прямого усиления по высокой частоте.

Комплексы «Бук» активно модернизировались с целью обеспечения поражения новых классов воздушных целей. В рамках модернизаций комплексов модернизировались и радиовзрыватели. Так, для ракеты 9М38М1 комплекса 9К37М1 «Бук-М1» (принят на вооружение в 1983 году) был разработан модернизированный импульсный радиовзрыватель (главный конструктор разработки Г.И. Котов). Параллельно «Морской НИИ радиоэлектроники «Альтаир» разрабатывал корабельный ЗРК «Штиль», в состав которого входила унифицированная ракета. Для новой ракеты 9М317 (разработчик Долгопрудненский машиностроительный завод, ныне – ПАО «Долгопрудненское научно-производственное предприятие») комплекса 9К37М2 «Бук-М2», принятого на вооружение в 1988 году, был разработан новый взрыватель, обеспечивший высокую вероятность поражения низколетящих целей.

В 2000-е годы под руководством начальника отделения А.Е. Ластовецкого было создано новое поколение радиолокационных неконтактных датчиков с цифровой обработкой сигналов. Они вошли в состав ракет комплексов ПВО наземного и морского базирования





«Бук-МЗ», «Штиль-2», «Викинг», «Полимент-Редут», «Витязь».

Наряду с разработками радиовзрывателей, используя накопленный опыт, НИИРТА в 1966–1969 годах вело ряд ОКР по тематике ОКБ Завода имени С. А. Лавочкина, где под руководством главного конструктора Г.Н. Бабакина создавались автоматические космические аппараты для посадки на поверхность Венеры. Были разработаны малогабаритный радиовысотомер «Высота» для спускаемого аппарата «Венера-4» и «Высота-2» – для спускаемых аппаратов «Венера-5» и «Венера-6», отличавшиеся диапазоном фиксируемых высот.

Особенность создания высотомеров заключалась в том, что их разработка проводилась в сжатые сроки при одновременном освоении отечественными предприятиями мощных высокочастотных транзисторов для генератора передатчика и маломощных транзисторов для приемных устройств, малых интегральных схем, магнитострикционных фильтров, новой технологии печатных плат и элементов в микропленочном исполнении. Осложняло разработку отсутствие достоверных данных о характеристиках отражения радиосигналов от поверхности Венеры, плотности верхних слоев ее атмосферы и температуры. Были проведены обширные и жесткие испытания

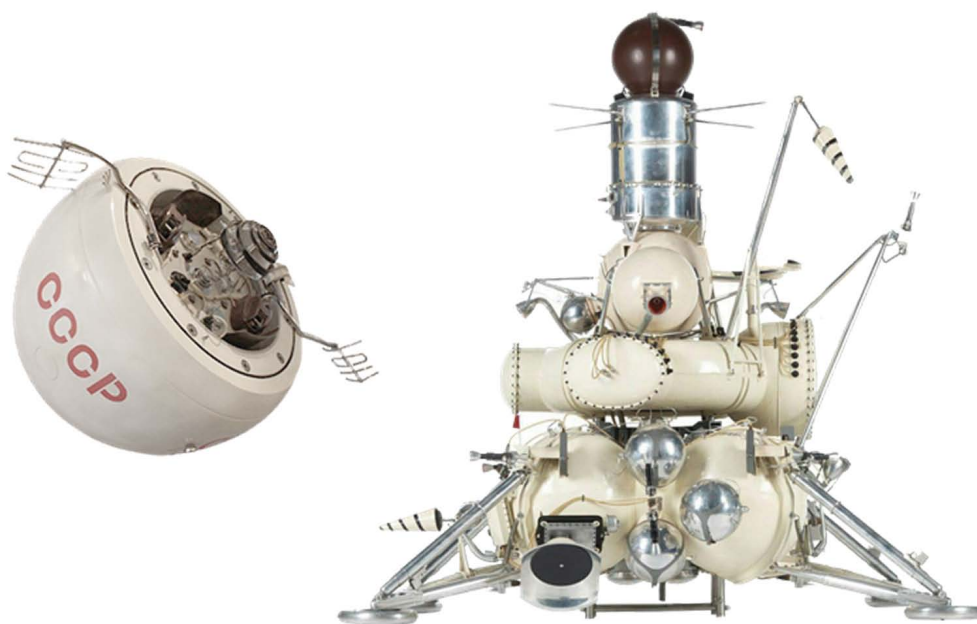
на стабильность параметров в прогнозируемых условиях спуска.

Снижение спускаемого аппарата «Венера-4» с радиовысотомером «Высота» в атмосфере планеты произошло 18 октября 1967 г., а спускаемых аппаратов «Венера-5» и «Венера-6» с радиовысотомером «Высота-2», соответственно, 16 и 17 мая 1969 года.

Эти спускаемые аппараты не достигли поверхности планеты: оболочки корпусов были разрушены высоким давлением в атмосфере планеты. Однако результаты измерений высот «Венерой-5» и «Венерой-6» оказались сенсационными и свидетельствовали о наличии на Венере выраженного рельефа с перепадами высот до 4–5 километров. Это противоречило существовавшему представлению о достаточно плоской поверхности планеты. Позже данные о горах на Венере были подтверждены американскими исследователями.

Также разработанный НИИРТА высотомер был использован в системе мягкой посадки станции «Луна-16».

В начале 60-х годов прошлого века в Советском Союзе начал создаваться новый вид противолодочного оружия – сверхскоростные кавитирующие ракето-торпеды. В 1969 году это направление выделяется в отдельное



Спускаемый аппарат межпланетной станции типа «Венера» и станция «Луна-16» с высотомерами разработки НИИРТА



предприятие – НИИ прикладной гидромеханики (ныне АО «ГНПП «Регион»). В 1972 году к разработкам системы самонаведения противолодочной авиационной ракеты АПР-2 был подключен «Импульс». На предприятии был образован отдел ультразвуковых активных систем наведения, для руководства которым директор НИИРТА Б.В. Карпов пригласил Ю.С. Важнова, одного из ведущих сотрудников ЦНИИ автоматики и гидравлики, ставшего главным конструктором разработок. Разработка первого для предприятия корреляционного автомата наведения КАН для авиационной противолодочной ракеты АПР-2 была выполнена в исключительно сжатые сроки, и через год после образования отдела был собран первый образец сложнейшей аппаратуры. КАН в составе ракеты АПР-2 был успешно принят на вооружение в 1976 году и отмечен Государственной премией (лауреатом стал Ю.С. Важнов).

В 1979 году предприятию была поручена разработка аппаратуры самонаведения (АСН) для следующей авиационной противолодочной ракеты АПР-3. В АСН требовалось реализовать новый, более эффективный и сложный пространственно-временной корреляционный принцип обработки гидроакустической информации с применением многоканальной фазированной антенной решетки. Схемотехнические и конструктивные сложности реализации новых повышенных тактико-технических требований удалось преодолеть, разработав в 1982 году цифровой вариант построения изделия. Впервые в гидроакустических системах самонаведения была внедрена микроЭВМ, разработанная на основе первого отечественного микропроцессора, допущенного к применению

в образцах военной техники. Авиационная противолодочная ракета АПР-3 была принята на вооружение в 1991 году.

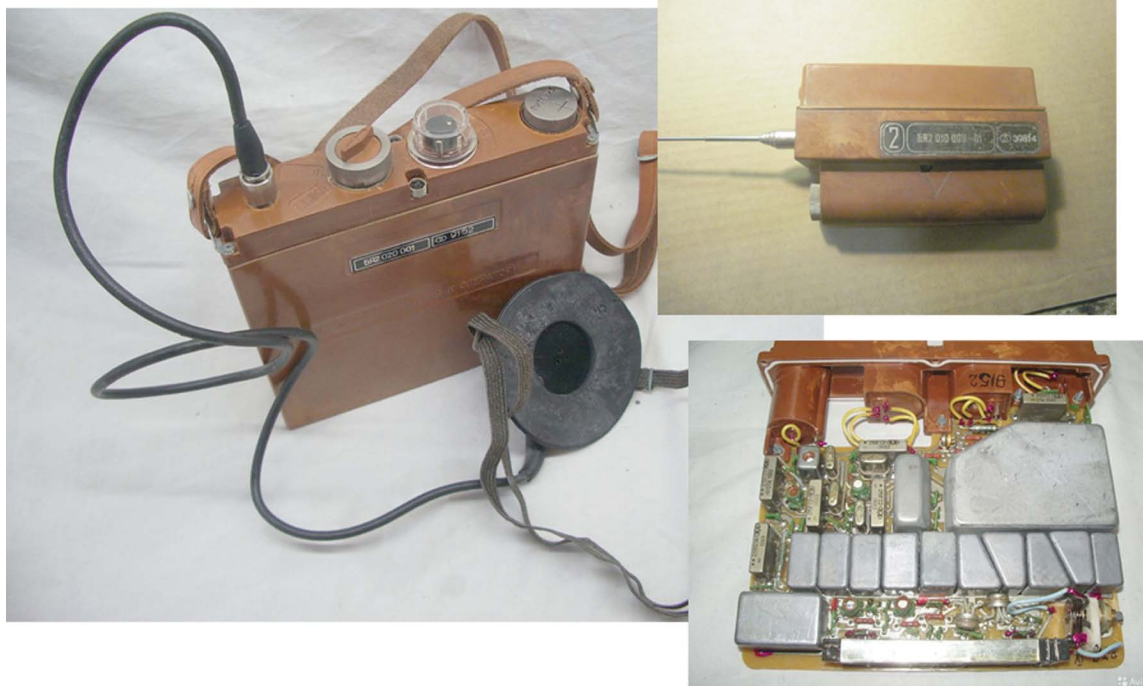
В 1970-е годы НИИРТА совместно с ЦКБ «Геофизика» разработало аппаратуру самонаведения для корректируемой авиабомбы КАБ-500Л с лазерным наведением. За эту разработку главный конструктор аппаратуры Г.И. Котов был отмечен Государственной премией. Этот боеприпас до настоящего времени состоит на вооружении в России и ряде зарубежных стран.

В 1973–1975 гг. НИИРТА разрабатывал по медико-техническим требованиям ЦВМУ СА СССР комплекс радиотехнической аппаратуры «Роза» для обозначения и поиска раненых на поле боя. Разработка, начатая как НИР, завершилась в 1975 году рекомендацией о принятии на вооружение и передаче комплекса в серийное производство. В состав одного комплекса входили 5 литерных передатчиков-маяков диапазона 63 МГц и один пеленгатор. Особенностью конструкции пеленгатора была чрезвычайно высокая плотность монтажа, потребовавшая серьезных технологических усилий при освоении изделия на заводском производстве. Главный конструктор разработки – Б.Ф. Челышев.

В НИИРТА разрабатывалась и медицинская аппаратура. В 1970–1980-х годах под руководством главного конструктора Г.И. Котова было разработано несколько модификаций физиотерапевтического аппарата дециметрового диапазона противовоспалительного действия «Ранет», «Ранет ДМВ-20», «Ранет – ДМ-7», которые широко внедрены в медицинскую практику и выпускаются до настоящего времени.



Авиационная противолодочная ракета АПР-3 с аппаратурой акустического самонаведения разработки НИИРТА



Комплект аппаратуры «Роза» для обозначения и поиска раненых разработки НИИРТА

В начале 1970-х годов НИИ прикладной гидромеханики (АО «ГНПП «Регион») начал разработку корректируемой авиабомбы КАБ-500Кр с телевизионной головкой самонаведения. НИИРТА – «Импульс» предложил для КАБ-500Кр принципиально новый тип ГСН с корреляционным алгоритмом обработки двумерных телевизионных изображений. Фундаментом разработки стала прикладная НИР, проводившаяся под руководством главного конструктора разработки Н.С. Расторгуева при научном руководстве доктора технических наук Д.В. Васильева. Разработка сопровождалась активным освоением цифровых методов и созданием

соответствующей отечественной элементной базы. С 1976 года начался ответственный и трудоемкий этап – ОКР «Крым» по созданию корреляционной ТГСН. В 1982 году ТГСН «Крым» в составе КАБ-500КР успешно выдержала государственные испытания, принята на вооружение и в 1983 г. запущена в серийное производство. В ноябре 1985 года за вклад в создание ТГСН «Крым» Правительством СССР была награждена большая группа сотрудников предприятия, а заместитель главного конструктора Д.В. Васильев, В.И. Кадель, Н.Д. Пославский и И.М. Чихачев стали лауреатами Государственной премии.

В 1990-е годы коллектив, занимавшийся корреляционными ГСН, создал систему автоматического управления точным висением вертолета МИ-26 с грузом на тросе над точкой местности при погрузочно-разгрузочных работах. ТВ-комплекс в составе пилотажной аппаратуры вертолета МИ-26 использовался при сложных монтажных работах. Так, известен факт его использования при монтаже опор линий электропередач в горах Швеции.

В 2005–2006 гг. была выполнена разработка алгоритмов сближения и посадки космического аппарата на спутник Марса Фобос



Корректируемая авиабомба КАБ-500КР с телевизионной ГСН «Крым» разработки «Импульс»





(проект «Фобос-Грунт») с использованием телевизионной системы корреляционного слежения за участком поверхности.

Во второй половине 1960-х годов в составе НИИРТА возник новый творческий коллектив, специализировавшийся на использовании лазеров. В его составе был Р.А. Ванециан, талантливый ученый, работавший ранее в Институте атомной энергии под руководством академика И.В. Курчатова и ставший начальником лаборатории НИИРТА. В этот период была поставлена задача создания бортового лазерного взрывателя для ракеты тактического ракетного комплекса «Точка», разрабатывавшегося Конструкторским бюро машиностроения, г. Коломна, под руководством С.П. Непобедимого. Руководил разработкой главный конструктор В.Е. Дубровин, его заместителями были Р.А. Ванециан, В.В. Фишер и В.И. Тищенко. В 1975 году комплекс 9К79 «Точка», в состав ракеты которого входил лазерный взрыватель 9Э118, был принят на вооружение. Этот взрыватель входил также в состав ракеты модернизированного ракетного комплекса увеличенной дальности 9К79-1 «Точка-У», принятого на вооружение в 1989 г. Для ракеты «Точка-Р» с противорадиолокационной головкой самонаведения был разработан аналогичный лазерный взрыватель.

В начале 70-х годов прошлого века руководством Главного ракетно-артиллерийского управления (начальник ГРАУ – маршал артиллерии П.Н. Кулешов)

и тульского Конструкторского бюро приборостроения (генеральный конструктор и начальник А.Г. Шипунов) была инициирована разработка нового комплекса ПВО ближнего радиуса действия. Ракетно-пушечный комплекс 2К22 «Тунгуска» был завершён в разработке в начале 80-х годов и в 1982 году принят на вооружение. Для ракеты комплекса 2К22 под руководством Г.И. Котова был впервые разработан многоканальный лазерный взрыватель.

Опыт разработок НИИРТА лазерных взрывателей для тактических ракет был востребован, когда в Российской Федерации была начата разработка ракетного комплекса «Искандер-М». В ПАО «НПП «Импульс» разработку датчика высоты подрыва возглавил М.В. Шахматов. Значительные наработки предприятия в данном направлении позволяют говорить о создании ряда лазерных взрывателей (датчиков высоты подрыва) на основе единых принципов и унифицированных технических решений.

В 1970-е года НИИРТА стал активным участником разработок корректируемых снарядов с системой импульсной коррекции под руководством В.С. Вишневого, проводившихся Научно-исследовательским машиностроительным институтом (ныне АО «НИМИ им. В.В. Бахирева»). Первой стала разработка корректируемой 240-мм мины «Смельчак» к миномету «Тюльпан». Для мины НИИРТА разработал флюгерную полуактивную лазерную головку коррекции (главный конструктор



Комплексы сухопутных войск, ракеты которых оснащены лазерными взрывателями разработки «Импульс»



Образцы лазерных ГСН, разработанных НИИРТА – «Импульсом», слева – ГСН 152-мм КАС «Сантиметр», справа – ЛИК

В.Е. Дубровин). Первый в мире комплекс корректируемого артиллерийского вооружения 1К113 «Смелчок» был принят на вооружение в 1980-м году.

В 1986 году лазерная головка коррекции разработки НПО «Импульс» (главный конструктор Р.А. Ванециан) была принята на вооружение в составе 152-миллиметрового корректируемого снаряда 3ОФ38 «Сантиметр».

В 2000-е годы в рамках разработок В.С. Вишневого «Импульс» создал миниатюрную жесткосвязанную головку самонаведения ЛИК (лазерный индикатор-координатор, главный конструктор Р.А. Ванециан), которая стала основой для разработок малогабаритных полуактивных лазерных ГСН, применяемых в ряде образцов ракетного и бомбового вооружения.

В 1970-е годы в нашей стране начались исследования в области систем самоприцеливания для боевых элементов со снарядоформирующими боевыми частями. Основным разработчиком в области датчиков самоприцеливания был определен «Импульс». Исследования проводились в широком спектре электромагнитных излучений. Был выполнен целый ряд глубоких научно-исследовательских работ. В рамках ряда тем по исследованию контрастов бронеобъектов в качестве датчика рассматривался радиометр миллиметрового диапазона. С начала 1980-х годов

основное внимание в исследованиях и разработках было переключено на датчики инфракрасного диапазона. В середине 1980-х годов началась разработка самоприцеливающегося боевого элемента «Мотив-3» с однодиапазонным ИК координатором для разовой бомбовой кассеты РБК-500 СПБЭ. Работы по РБК возглавило ГНПП «Базальт», главный конструктор Р.Ш. Рахматуллин, в «Импульсе» работы возглавил главный конструктор Г.И. Котов. В начале 1990-х РБК-500 СПБЭ была принята на вооружение. За эту разработку главный конструктор аппаратуры Г.И. Котов был во второй раз отмечен Государственной премией. «Мотив-3» – первый в мире принятый на вооружение и серийно производившийся СПБЭ.

В конце 1980-х годов ГНПП «Базальт» начал разработку модернизированного варианта РБК-500 СПБЭ-Д с усовершенствованным СПБЭ «Мотив-3М», оснащенным двухспектральным ИК координатором. Параллельно НПО «Сплав» под руководством главного конструктора Г.А. Денежкина начало разработку кассетного снаряда 9М55К1 с СПБЭ «Мотив-3М» для 300-мм РСЗО «Смерч».



Старейший сотрудник предприятия, советник генерального директора, дважды лауреат Государственной премии Г.И. Котов





Разработка РС 9М55К1 успешно завершилась в 1994 году.

В 1990-е годы «Импульс» продолжил развитие координаторов СПБЭ типа «Мотив-3М» в направлении повышения обнаружительных характеристик и помехозащищенности за счет увеличения числа каналов. СПБЭ с новым комбинированным координатором цели входит в снаряжение РБК-500 СПБЭ-К и планирующей бомбовой кассеты ПБК-500 СПБЭ-К разработки АО «НПО «Базальт». Тогда же началась разработка комбинированного радиолокационно-оптического координатора самоприцеливающегося боевого элемента для артиллерийского снаряда, которую возглавил В.В. Фишер. Недавно аналогичный координатор, разработанный под руководством М.В. Шахматова, был принят на вооружение в составе интеллектуальной инженерной противотанковой мины ПТКМ 1Р.

В сложные для всей промышленности 1990-е годы коллектив предприятия активно осваивал новые области техники. М.В. Шахматов предложил проект семейства промышленных электронных газовых счетчиков «Приз», производство и техническая поддержка которых помогли выжить коллективу. Была разработана телевизионная система «Зенит» для учета и анализа технических действий хоккеистов во время матча, опробованная на базе ХК «Динамо». Новым направлением,

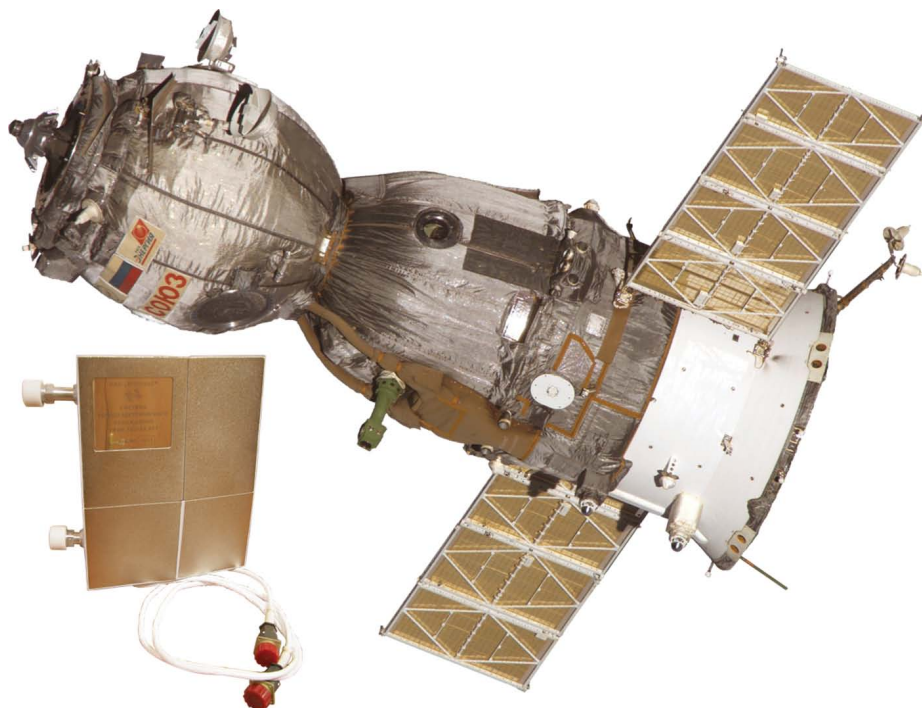
предложенным М.В. Шахматовым, стали разработки электронных неуправляемых при эксплуатации баровысотомеров для систем управления ракет. Первый такой прибор вошел в состав успешно принятой на вооружение авиационной ракеты типа Х-31ПД.

В 1990-е годы отделом под руководством Т.Л. Лушкиной, специализировавшимся на микросборочных разработках, были впервые в мире созданы термоэлектрические модули Пельтье на металлическом основании. Такие модули обладают повышенной прочностью по сравнению с традиционными конструкциями на керамической основе. Это позволяет применять их там, где требуется стойкость к значительным вибрационным перегрузкам и высокая надежность. Обладая технологией производства таких термоэлектрических модулей, «Импульс» разработал систему термоэлектрического охлаждения (СТЭО) баков двигательной установки спускаемого аппарата космического корабля «Союз-ТМА» для РКК «Энергия» им. С.П. Королева, эта система сейчас применяется на всех кораблях типа «Союз-ТМА».

При переходе экономики страны к рыночным отношениям предприятие одним из первых в оборонно-промышленном комплексе акционировалось и наработало большой опыт существования в рыночных условиях, сумев сохранить кадровый костяк



Координаторы СПБЭ разработки «Импульса» и мина ПТКМ-1Р



Космический корабль «Союз-ТМА», на спускаемом аппарате которого применяется система термоэлектрического охлаждения разработки «Импульса»

и научно-технические заделы. Большой вклад в сохранение коллектива и тематики в этот период внесли первый заместитель генерального директора В.Н. Зенкевич, заместитель генерального директора по экономике и финансам Г.Н. Борисова.

С 2010 г. главным акционером предприятия является Концерн ВКО «Алмаз – Антей». За период существования в составе Концерна, под руководством генерального директора предприятия Е.М. Черняховского, предприятие многократно увеличило выручку, производительность труда, вышло на высокий уровень рентабельности, избавилось от текучести кадров, более чем удвоило долю молодых специалистов. В настоящее время ПАО «НПП «Импульс» – эффективное научно-производственное предприятие, компактно объединяющее специальное конструкторское бюро, руководимое главным конструктором предприятия М.В. Шахматовым, и заводское производство под началом заместителя генерального директора – директора по производству А.Н. Федосеева, ориентированное на выпуск разработанной СКБ продукции. Фирменным стилем работы СКБ стали рекордные сроки разработок – от полугода с момента первых

обсуждений с заказчиком до завершения этапа разработки рабочей конструкторской документации.

Нацеленность на динамичное и качественное решение задач разработки и гибкого серийного производства разнообразных радиоэлектронных устройств и систем обеспечивает высокую репутацию предприятия у значительного круга головных предприятий – создателей наукоемкой техники военного, двойного и гражданского назначения. Это позволило широко диверсифицировать линейку разрабатываемой и выпускаемой продукции, применяя датчики и исполнительные элементы различной физической природы. В настоящее время предприятие способно разрабатывать и серийно выпускать:

- радиовзрыватели для зенитных управляемых ракет комплексов ПВО средней и большой дальности наземного и морского базирования («Бук-М2», «Бук-М3», «Штиль», «Штиль-2», «Викинг», С-300 ПМУ, С-400, «Полимент-Редут», «Витязь»);
- координаторы цели самоприцеливающихся боевых элементов для кассетных боеприпасов наземных ракетно-артиллерийских и авиационных комплексов (бомбовые



Руководители ПАО «НПП «Импульс»:

Е.М. Черняховский, В.Н. Зенкевич, Г.Н. Борисова, А.Н. Федосеев, М.В. Шахматов, А.Е. Ластовецкий

контейнеры РБК-500 СПБЭ-Д, РБК-500 СПБЭ-К, ПБК-СПБЭ-К, кассетные головные части реактивных снарядов РСЗО «Смерч»);

- корреляционные телевизионные и тепловизионные головки самонаведения для корректируемых авиабомб (изделия КАБ-500Кр, КАБ-1500Кр);

- лазерные взрыватели для тактических ракет и авиабомб («Точка», «Точка-Р», «Точка-У», «Искандер-МЭ», «Гром-Э» и другие образцы);

- полуактивные лазерные головки самонаведения для боеприпасов различных классов («Смельчак», «Сантиметр», ЛИК и ряд других разработок);

- высокоточные электронные баровысомеры (применены в изделии Х-31ПД и ряде других образцов);

- системы терморегулирования и термоэлектрического охлаждения узлов космических аппаратов и аппаратуры ракет (применены в космических кораблях типа «Союз-ТМА», наземных ракетных комплексах).

Также предприятие освоило сервисное обслуживание систем своей разработки, находящихся на боевом дежурстве.

ПАО «НПП «Импульс» сохраняет высокий уровень разработок оборонного и двойного назначения и встречает 120-летие с ясным видением перспектив развития.

---

**Мальцев Андрей Иванович** – главный научный сотрудник, заместитель главного конструктора публичного акционерного общества «Научно-производственное предприятие «ИМПУЛЬС», кандидат технических наук, советник РАН.



## 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 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\xi$ ,  $\Xi$ ,  $\Sigma$ ,  $\epsilon\rho\eta\kappa\iota$ ) набираются прямо, а латинские ( $a$ ,  $w$ ,  $j$ ,  $W$ ,  $Q$ ,  $left$ ,  $interrupt$ ) – курсивом (кроме химических формул  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Ra}(\text{OH})_2$  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 ( $\Omega$ ,  $\mathfrak{Z}$ ,  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{q}$ ). 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  $j$ ,  $\pi$ ). 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. Подрисовочные 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 подрисовочной подписи ставится двоеточие и с новой строки приводится их расшифровка. Подрисовочную 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