

Уважаемые читатели!

Интерес к научно-техническому журналу «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»» и тематика публикуемых статей увеличиваются с каждым годом. Для качественного рецензирования присылаемых рукописей с текущего номера журнала увеличен состав редакционной коллегии до 107 ученых. Большинство из них являются молодыми кандидатами наук предприятий Концерна и активно рецензируют поступающие рукописи.

Напоминаю, что на сайте Концерна **www.almaz-antey.ru/about/618** предоставлена возможность до выхода бумажной версии оформить бесплатную подписку на e-mail-рассылку электронной версии номеров журнала.

Жду от вас новых интересных научных статей, а также отзывов, предложений и вопросов по поводу публикации на мой личный электронный адрес **antey@inbox.ru** или по телефону +7 (495) 276-26-13. Напоминаю, что статьи принимаются от организаций России и зарубежья, публикация бесплатная.

Заместитель главного редактора

Денис Большаков

Д. Ю. Большаков

Еще раз о рецензировании

Рецензирование – обязательный этап издательского процесса научного журнала, целью которого является обеспечение научного уровня публикуемых статей и журнала в целом. Рецензент – специалист, имеющий ученую степень, который:

• обратит внимание автора на неточности, а подчас и ошибки;

• подскажет с помощью замечаний и предложений неизвестных автору литературных источников направление дальнейших исследований.

В 2019 г. мы продолжили успешный тренд и призвали в ряды редакционной коллегии еще больше ученых предприятий Концерна.

Редакционная коллегия текущего номера научно-технического журнала «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» включает 107 ученых, и на это есть причины. Потребность в создании столь большой редакционной коллегии появилась еще в 2017 г., когда значительно расширилась тематика журнала. Этот процесс продолжается: в 2019 г. и в ряды редакционной коллегии были включены рецензенты для анализа материалов по новым направлениям: газо- и гидродинамика; теплофизика; механика сплошных сред; управление производством и др.

Распределение кандидатов текущей редакционной коллегии по возрасту и ученой степени приведены на рис. 1, 2.

Бóльшую часть редакционной коллегии составляют молодые ученые до 40 лет (см. рис. 1, 2), и данный показатель продолжает расти. Так, в 2018 г. в редакционную коллегию было включено 39 молодых ученых, в конце 2019 г. – уже 68. Применение данного подхода способствует:

• сокращению времени рассмотрения статей за счет бóльшего количества привлекаемых рецензентов;

• привлечению молодых ученых Концерна к рецензированию статей.

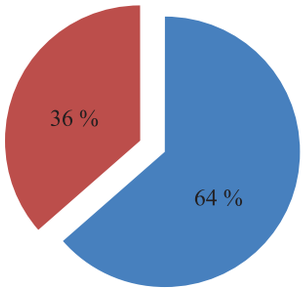


Рис. 1. Возрастной состав редакционной коллегии:
■ – до 40 лет; ■ – после 40 лет

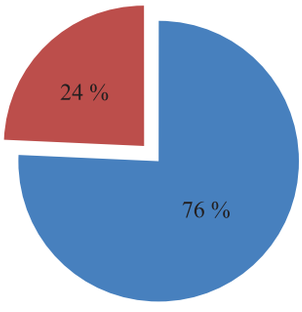


Рис. 2. Распределение редакционной коллегии по ученым степеням:
■ – кандидаты наук; ■ – доктора наук

Стоит отметить, что некоторые из молодых рецензентов весьма амбициозны в научной работе и не так загружены. Однако стоит отметить и особенно активных опытных ученых:

Акопян Иосиф Григорьевич, доктор технических наук, профессор;

Балов Анатолий Васильевич, доктор технических наук, профессор;

Белякова Елена Германовна, доктор технических наук;

Пономарев Олег Павлович, доктор технических наук, доцент;

Ратынский Михаил Владимирович, доктор технических наук;

Синани Анатолий Исакович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

Страхов Алексей Федорович, доктор технических наук, профессор;

Филимонов Вячеслав Иванович, доктор технических наук, профессор;

Шентябин Александр Николаевич, кандидат военных наук.

© Большаков Д. Ю., 2019

Широкопрофильный состав редакционной коллегии позволяет выполнять качественное рецензирование. Увеличение количества членов редакционной коллегии позволило уже в 2019 г. сократить более чем в три раза срок рассмотрения статей рецензентами в течение трех месяцев (рис. 3).

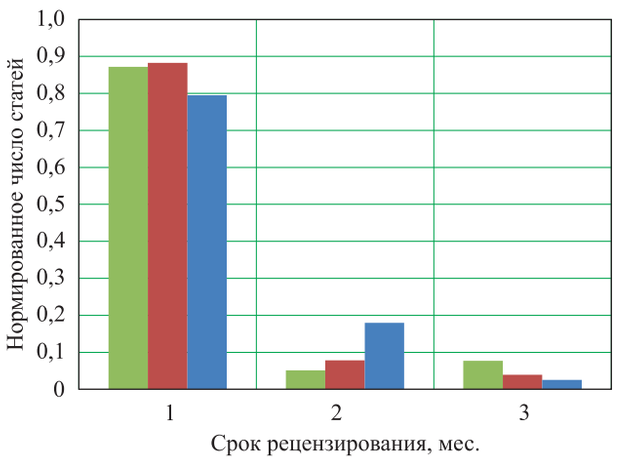


Рис. 3. Сроки рассмотрения редакционной коллегией опубликованных статей:
■ – в 2017 г.; ■ – в 2018 г.; ■ – в 2019 г.

На рис. 3 видно, что бóльшая часть (79 %) опубликованных в 2019 г. статей были рассмотрены менее чем за месяц.

Сроки рассмотрения статьи связаны в том числе и с тем, что с 2015 г. каждая статья направляется на «двойное слепое рецензирование» нескольким рецензентам, при этом автор и рецензент не знают друг друга. Продолжительность рецензирования определяется временем рассмотрения работы всеми специалистами. Кроме того, если у рецензентов сложились противоположные мнения о статье или они принимают ее без замечаний, статья направляется на дополнительное рецензирование, что увеличивает сроки рассмотрения работы. Информация о количестве рецензентов на одну статью в 2019 г. приведена на рис. 4.

Как видно из рис. 4, бóльшая часть статей рассматривается более чем одним рецензентом. Один рецензент назначается на статью узкой тематики.

С 2017 г. редакция практикует экстерриториальное рецензирование. Например, статья, поступившая из Брянска, отдается на рецензирование в Москву, Ульяновск и Екатеринбург,

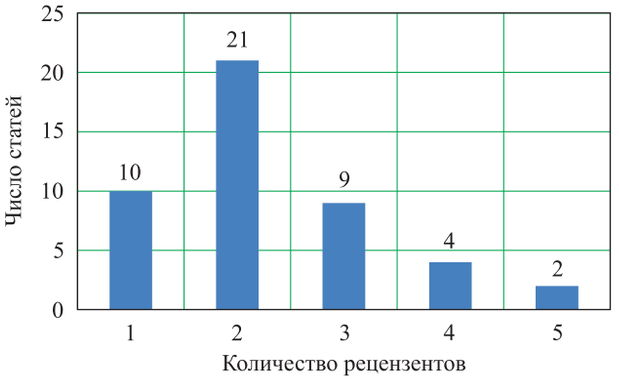


Рис. 4. Зависимость количества рецензентов на одну статью от числа статей, опубликованных в 2019 г.

чтобы по возможности на рецензента не оказывалось влияние существующей в регионе научной школы, к которой он может принадлежать. На рис. 5 отображены данные экстерриториальности по статьям, опубликованным в 2019 г.

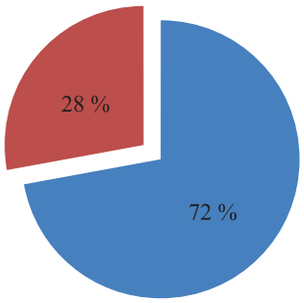


Рис. 5. Распределение рецензий по статьям, рассмотренным в 2019 г. по экстерриториальному (■) и по неэкстерриториальному (■) принципам

Экстерриториальность достигается в 72 % случаев рассмотренных статей, в результате это влияние региональных научных школ на рецензента удается снизить.

По данным Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), в среднем в журнале публикуется 43 статьи в год. Следовательно, в номере в среднем публикуется 11 статей. По результатам анализа данных РИНЦ следует, что на каждую статью назначается в среднем 2,3 рецензента. Данные о числе подготовленных рецензентами за 2017–2019 гг. заключений приведены на рис. 6.

В целом можно уверенно заявить, что журнал находится в тренде современных тенденций по рецензированию научных статей и редакция постоянно совершенствует методы экспертной оценки публикуемых рукописей.

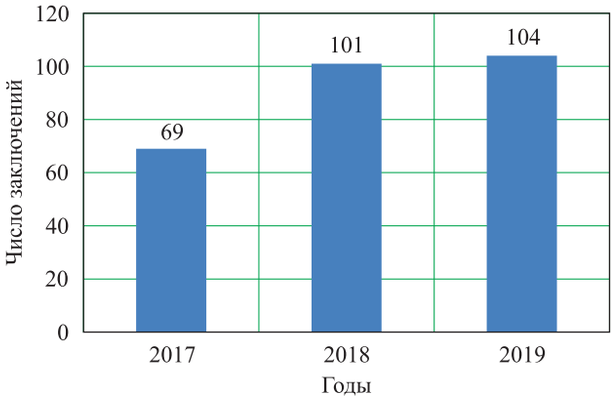


Рис. 6. Количество подготовленных заключений

Редакция журнала открыта к диалогу с читателями. Ваши предложения по расширению рассылки журнала, его продвижению в сети Интернет, социальных сетях и международных реферативных базах, улучшению его качества и наполнения направляйте на электронный адрес редакции press@almaz-antey.ru

Большаков Денис Юрьевич – кандидат технических наук, начальник отдела АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», г. Москва.

УДК 338.36:005:658.51

И. А. Андреев

Сокращение издержек предприятия оборонно-промышленного комплекса при вовлечении персонала в концепцию бережливого производства

Рассмотрен процесс участия производственного, обслуживающего и вспомогательного персонала во внедрении методов и инструментов бережливого производства на предприятии Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – АО «ГОЗ Обуховский завод». Приведены результаты такого внедрения, оценен экономический эффект в масштабах предприятия.

Ключевые слова: бережливое производство, предложения по улучшениям, кайдзен, непрерывные улучшения, промышленная среда, промышленное предприятие, оборонно-промышленный комплекс.

Введение

Постоянные изменения внешней и внутренней среды промышленного предприятия оборонно-промышленного комплекса (ОПК) требуют гибкого подхода к управлению для поддержания эффективности производства и сокращения издержек выпускаемой продукции. Некоторые предприятия ОПК не могут применять принципы поточного производства, поскольку выпускают разнородную продукцию небольшими партиями, а чаще всего даже единично.

В условиях необходимой переналадки производства предприятий ОПК вопрос сокращения сопровождающих этот процесс издержек имеет первостепенное значение. Чем быстрее осуществится переналадка производственных площадей, оборудования, перераспределение рабочего персонала, создать оснастку и закупить инструмент для выполнения разнородных производственных операций, тем быстрее удастся выполнить государственный оборонный заказ.

Все изделия, выпускаемые на АО «ГОЗ Обуховский завод», можно подразделить на две большие группы: серийные и единичные. Технологии бережливого производства были применены к каждой из них, но с некоторыми особенностями. К серийным изделиям был применен поточный метод организации производства, в рамках которого проведены следующие процессы:

• настройка работы склада с синхронизацией потоков создания изделий;

• реализация оптимальной логистики подвоза комплектующих;

• оптимальная последовательная расстановка рабочих зон;

• бригадный метод работы;

• реализация работы по времени такта с четким распределением заданий.

В результате организации поточного метода удалось сократить временны́е издержки для выпускаемых изделий от 50 % до 250 % [1].

Производство единичных изделий организовано следующим образом. Рабочие сформированы в отдельную зону, являющуюся универсальной. План варьируется ежемесячно, и рабочие не имеют постоянной рабочей зоны, но у них есть большие участки. Эффект в этом секторе был достигнут за счет производственного планирования, в результате которого удалось сократить потери от ожидания рабочих и перепроизводства более чем на 50 % [2].

Достижение приведенных выше показателей по серийному и единичному производству произошло с помощью применения технологий бережливого производства, которое чаще всего ассоциируют с компаниями, выпускающими изделия крупными сериями и массово. Данный стереотип был неоднократно опровергнут полученным результатом от внедрения проектов в организациях с единичной и мелкосерийной загрузкой выпускаемых изделий [1]. В их числе и опыт АО «ГОЗ Обуховский завод», сотрудники которого нашли свой подход к реализации проектов по улучшениям [1].

Эффект от внедрения проектов бережливого производства – заслуга всех, кто принимает участие в данных мероприятиях, от высшего руководства до рабочих. Одним из главных элементов системы бережливого производства АО «ГОЗ Обуховский завод» является работа с улучшениями, в которую вовлечены все со-

© Андреев И. А., 2019

трудники завода. Для поддержания творческой инициативы сотрудников завода приказом генерального директора № 412 от 10 апреля 2018 г. было введено «Положение об организации деятельности по улучшениям» [2]. В данной статье рассмотрены результаты, достигнутые за год работы по анализу предложений и оценке их экономического эффекта.

Введение в процесс постоянных улучшений

Сформировавшаяся система взглядов на организацию бережливого производства в целом включает четыре основных положения [2]:

1) мгновенная реакция на изменения в производственной цепочке изготавливаемых изделий;

2) постоянное вложение ресурсов в обучение и работу с персоналом для увеличения качества продукции и производительности труда;

3) самостоятельное совершенствование деятельности работников на производственной площадке;

4) непрерывное совершенствование производственных процессов за счет небольших изменений.

Если организация следует всем этим положениям, то теоретически потерям разного рода на практике не будет места ни в одном процессе и операции. Реальные процессы содержат в себе массу потерь (не менее 50 % от общего времени создания ценности, по данным работы [1]), которые можно устранить.

Для соблюдения всех положений бережливого производства и создания эффективной организации необходимо использовать скрытый творческий потенциал работников посредством реализации системы подачи, сбора и реализации предложений по улучшениям от сотрудников.

Отдел внедрения технологий бережливого производства (ВТБП) АО «ГОЗ Обуховский завод» рассматривает предложения от всех сотрудников, поэтому каждый может принять участие в разработке улучшений рабочего места, бюро, отдела, подразделения, направления и предприятия в целом. Каждый поток, процесс и операция содержит в себе массу возможностей для улучшений.

Предложение по улучшениям (ППУ) – предложение от одного или нескольких сотрудников, направленное на улучшение отдельных технических, организационных, управленческих и производственных процессов, оснащения рабочего места, логистики, офисных и других процессов, целью которого являются сокращение издержек, повышение эффективности, обеспечение качества и получение экономической выгоды, а также улучшение условий труда и повышение безопасности.

В построении системы от подачи до реализации ППУ сотрудников АО «ГОЗ Обуховский завод» важна каждая деталь, поэтому при создании положения ППУ был разработан и опробован самый простой механизм работы с ним, который включает:

- материальное и нематериальное поощрение авторов;
- вовлеченность руководителей;
- простоту организации процесса;
- дополнительные коммуникационные аспекты (работа в проекте, конкурсы, награждение лучших и др.).

На сегодняшний день в каждом крупном подразделении (общая численность – более 20 сотрудников) завода находится информационный стенд ППУ, который содержит всю необходимую информацию о системе ППУ.

С помощью стенда обеспечивается связь автора с исполнителями и экспертами по поданному ППУ, что исключает преграды в виде линейного руководителя и минимизирует угасание творческой инициативы сотрудника. Благодаря визуализации на стенде работа системы ППУ становится наглядной и прозрачной для всех сотрудников предприятия.

Данный стенд содержит полную информацию о работе с ППУ, особое внимание занимает схема прохождения ППУ от подачи до реализации, показанная на рис. 1.

Начало – подача ППУ. Рядом со стендом, содержащем информацию о подаче ППУ, находится контейнер с чистыми бланками. Именно с бланка заявки начинается формирование и описание ППУ. Если автор самостоятельно не может оформить свою идею, то ему необходимо обратиться к ответственному за ППУ в своем подразделении, информация о котором содержится на стенде ППУ с фотографией и контактным номером телефона. После оформления

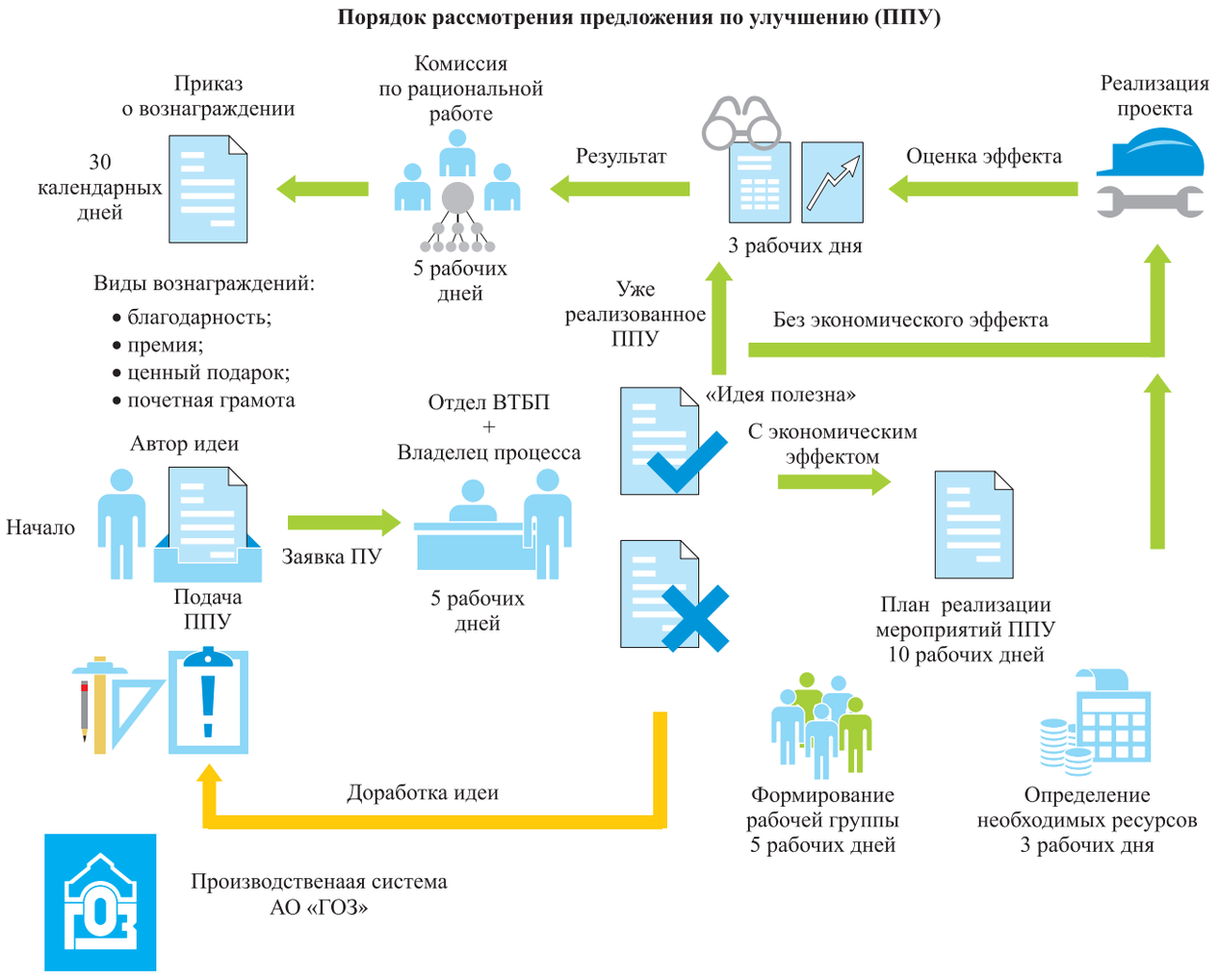


Рис. 1. Схема прохождения ППУ от подачи до получения вознаграждения

ППУ сотрудник должен опустить заявку в ящик, расположенный на информационном стенде.

Первый этап – определение полезности. Из ящика заявки с ППУ попадает к ответственному отдела ВТБП, который регистрирует каждую заявку. В течение двух рабочих дней после регистрации он проверяет правильность оформления заявки и актуальность ППУ.

Если ППУ удовлетворяет критериям, то оно согласовывается с руководителем подразделения, из которого подано ППУ. Далее заявка направляется эксперту – руководителю подразделения по своей компетенции или владельцу улучшаемого потока, процесса или операции. После получения заявки ППУ эксперт в течение трех рабочих дней проверяет ППУ по критериям, подробно описанным в Положении ППУ, и выносит решение. Если ППУ признается полезным, заявка передается на следующий этап, автору выплачивается первое материальное вознаграждение размере 300 руб. Если ППУ не удовлетворяет условиям из Положения ППУ, то его отправляют автору на доработку с объяснением причин. Стоит отметить, что ППУ считается полезным и принятым к внедрению, если его реализация дает экономический или иной положительный эффект.

Второй этап – выбор категории, реализация, получение вознаграждения. Далее принятые заявки передаются на второй этап для определения категории (см. рис. 1) – возможен ли измеримый экономический эффект от внедрения ППУ. Критерии распределения следующие.

1. Если принятое ППУ не имеет явно выраженного экономического эффекта и при этом не внедрено и не предполагается (автором) к самостоятельному внедрению, то ответственный от отдела ВТБП после заключений эксперта готовит план мероприятий по реализации улуч-

шения. После внедрения ППУ все необходимые данные, в том числе итоговый эффект, направляются заместителю генерального директора по направлению, который в течение трех рабочих дней подтверждает эффект от ППУ.

2. Если принятое ППУ не имеет явно выраженного экономического эффекта и при этом оно реализовывается автором самостоятельно без составления и утверждения плана мероприятий по его реализации или уже внедрено, то после внедрения ППУ автор получает дополнительное вознаграждение в размере 1000 руб. В течение пяти рабочих дней после принятия ППУ и определения его категории готовится приказ и в течение 30 календарных дней автору выплачивается вознаграждение.

3. Если принятое ППУ имеет экономический эффект, то ответственный от отдела ВТБП в течение пяти рабочих дней формирует рабочую группу по подготовке плана мероприятий и необходимых ресурсов. Реализация проходит в рамках сроков, заложенных в план мероприятий по внедрению ППУ. По итогам реализации ППУ данные передаются в финансово-экономический департамент, где в течение трех рабочих дней проводится расчет экономического эффекта. Ответственный отдела ВТБП в течение пяти рабочих дней после получения данных от финансово-экономического департамента предоставляет полученный результат по проекту и рассчитанный экономический эффект председателю Комиссии, который утверждает размер вознаграждения для автора ППУ (табл. 1). Сумма вознаграждения делится на всех авторов в зависимости от распределения вознаграждения, которое они определили при подаче ППУ.

Таблица 1

ППУ с экономическим эффектом

Результат	Сумма выплат
10–50 тыс. руб.	10 %
50–200 тыс. руб.	6 % + 2 тыс. руб.
200–700 тыс. руб.	4 % + 6 тыс. руб.
700–1 млн 500 тыс. руб.	3 % + 15 тыс. руб.
от 1 млн 500 тыс. руб.	2 % + 30 тыс. руб.
от 5 млн руб.	1,5 % + 55 тыс. руб.
от 10 млн руб.	1 % + 110 тыс. руб.

С момента подписания «Положения об организации деятельности по улучшениям» в отдел ВТБП поступило 125 заявок с ППУ, полезными из которых признаны 91. Экономический эффект получен в результате внедрения 14 ППУ, а по одной из них экономический эффект достигает более 20 млн руб. в год. Их распределение по поступлению и прогноз по линейной тенденции на 2019 г. приведен в табл. 2.

Таблица 2

Поступление заявок с ППУ в отдел ВТБП по кварталам

Количество заявок	2018 г.			2019 г.	
	II	III	IV	I	II
Всего поступило, из которых:	3	38	50	34	30
признаны полезными	2	29	41	19	20
с экономическим эффектом	–	4	6	4	5
без экономического эффекта	2	15	20	10	10
без экономического эффекта, не реализованы самостоятельно	–	10	15	5	5

Данные, полученные за год работы, позволяют спрогнозировать общий годовой экономический эффект от внедрения технологий в инициативном порядке «снизу вверх» и сравнить его эффективность с реализацией подхода в директивном порядке «сверху вниз» рассмотренном в работе [1].

Стоит отметить одно из наиболее эффективных ППУ, поданных сотрудниками одного из подразделений. В рамках данного предложения открыт проект по улучшениям «Термообработка нержавеющей стали марок 03Х11Н8М2Ф и 08/12Х18Н10Т в составе поставки» и получен реальный значительный экономический эффект. Этот факт подтверждает эффективность применения системы ППУ, а также раскрытие творческого потенциала у сотрудников и развитие инициативной системы «снизу вверх». Системы «сверху вниз» и «снизу вверх» работают одновременно, так как улучшения инициируются и сотрудниками, и руководством. Владельцами процессов, в которых внедряются улучшения, обычно являются руководители подразделений. На каждый проект назначается куратор из числа руководителей, который обеспечивает

Таблица 3

Общий экономический эффект от внедрения проектов бережливого производства

Результаты	Проект			
	Организация потока изготовления изделия «Качающаяся часть. Металлоконструкция»	Организация потока изготовления изделия «Платформа. Металлоконструкция»	Организация потока изготовления изделия «Крышка»	Термообработка нерж. стали марок 03Х11Н-8М2Ф и 08/12Х18Н10Т в составе поставки
Реальный экономический эффект – сокращение потерь, млн руб. в год	22,24	25,3	10,75	20,2
Потенциальный экономический эффект, млн руб. в год	2,140	2,43	1,040	1,45

проект ресурсами и осуществляет контроль на реперных точках. С момента открытия и до завершения проекта владелец процесса является ответственным за него, а также за достижение установленных целей и показателей.

Сокращение издержек по проектам, организованным по ППУ

Общий экономический эффект от внедрения проектов бережливого производства приведен в табл. 3.

Общий экономический эффект от внедрения технологий бережливого производства при реализации подхода «снизу вверх» составляет 20,2 млн рублей, а при реализации директивного подхода «сверху вниз» на АО «ГОЗ Обуховский завод» – 58,29 млн руб. [3, 4]. Следовательно, подход «снизу вверх» составляет треть экономического эффекта от реализации подхода «сверху вниз».

Таким образом, тенденции меняются, расширяется и раскрывается потенциал рабочих в части модерирования улучшений. По прогнозу на 2019–2020 гг. экономический эффект от внедрения технологий бережливого производства «снизу вверх» будет близким к результату внедрения с использованием технологии «сверху вниз», а по прогнозируемым объемам поступления заявок от производственного персонала в перспективе превысит его.

Спрогнозируем эффект от внедрения технологий бережливого производства в перспективе, в том числе и за счет подачи ППУ. На рис. 2 представлен график динамики процентного соотношения эффекта от внедрения технологий бережливого производства к выручке.

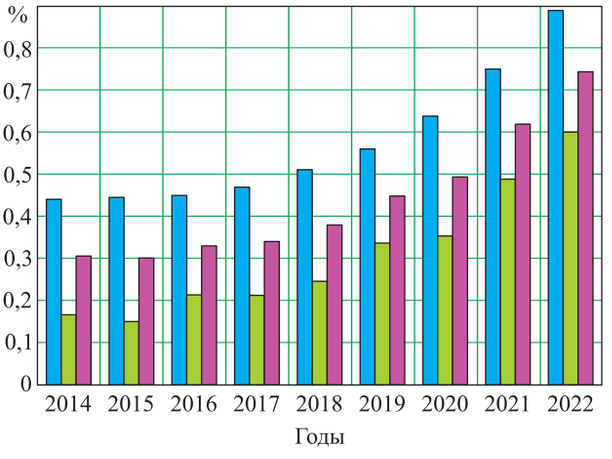


Рис. 2. Процент от прогнозируемой по линейной тенденции выручки за счет внедрения технологий бережливого производства:
– согласно оптимистическому сценарию; – пессимистическому сценарию; – среднему сценарию

Экономический эффект от внедрения технологий бережливого производства в масштабе предприятия на 2018 г. составляет около 0,5 % и при действующей системе принятия заявок и увеличении выручки будет непрерывно увеличиваться (см. рис. 2).

Выводы

1. Система внедрения технологий бережливого производства имеет конечной целью сокращение издержек на производстве и, как показывает практика, эффект соизмерим с технологией внедрения «снизу вверх», а в перспективе может превосходить его.

2. Общий объем сокращения издержек при внедрении технологий бережливого производства как «сверху вниз», так и «снизу вверх» в выручке предприятия в перспективе может достигать нескольких процентов.

Список литературы

1. *Андреев И. А.* Опыт внедрения бережливого производства в оборонной промышленности // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2017. № 3. С. 27–36.

2. *Андреев И. А.* НЕ ЖДИ – ДЕЙСТВУЙ! Предлагай и реализовывай свои идеи! Вовлекайся в процесс постоянных улучшений с помощью подачи предложений по улучшениям! // Обуховский вестник. 31 июля 2018. № 7. С. 1–2.

3. СМК. Оценка финансово-экономических эффектов от реализации мероприятий в области бережливого производства ИС АО Концерна «ВКО «Алмаз – Антей» / АО Концерн «ВКО «Алмаз – Антей». С. 58–69.

4. *Андреев И. А.* Цех термообработки идет по пути постоянных улучшений // Обуховский вестник. 30 сент. 2018. № 7. С. 5.

Поступила 08.07.19

Андреев Илья Андреевич – начальник отдела технологий внедрения бережливого производства АО «ГОЗ Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

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

Reducing the costs of the military-industrial complex enterprise with the involvement of personnel in the concept of lean manufacturing

The paper deals with the process of participation of production, service and support personnel in the implementation of lean manufacturing methods and tools at the enterprise of the “Almaz – Antey” Air and Space Defense Corporation, Joint stock company “SOP Obukhovsky plant” . The results of this implementation are presented, the economic effect on the scale of the enterprise is estimated.

Keywords: lean manufacturing, improving proposals, kaizen, continuous improvements, industrial environment, industrial enterprise, military-industrial complex.

Andreev Ilya Andreevich – Head of Lean Manufacturing Implementation Technology, Joint stock company “SOP Obukhovsky plant”, Saint Petersburg.

Science research interests: organization of production, lean manufacturing, technological and design preparation of production.

УДК 621.396.6

И. А. Кузнецов, А. Н. Грибанов, А. А. Курушин,
Г. Ф. Мосейчук, А. И. Синани

Электродинамические расчеты в *ANSYS Electronics Desktop* под управлением программы, разработанной в *MATLAB*

Рассмотрены методы управления процессом моделирования электродинамических структур в программе *ANSYS Electronics Desktop* (прежнее название *ANSYS HFSS*). Головной являлась программа *MATLAB.* Передача данных в программу *ANSYS Electronics Desktop* выполнена с помощью технологии *Microsoft Component Object Model*, которая позволяет объединять компоненты программного обеспечения в приложения. На примере моделирования фазированной антенной решетки с плоским раскрывом показаны возможности и ограничения в управлении программой *ANSYS HFSS* с последующим сохранением информации в текстовый файл и его импорта в *MATLAB* для дальнейших расчетов. Представлены результаты моделирования фазированной антенной решетки в программе *ANSYS Electronics Desktop* по модели решетки, составленной в *MATLAB*.

Ключевые слова: электродинамическое моделирование, управление программой, фазированная антенная решетка, диаграмма направленности, *MATLAB*.

Математическое моделирование является неотъемлемой частью проектирования сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств любой сложности, поскольку позволяет без натурных испытаний определить характеристики разрабатываемого устройства.

Разработка фазированной антенной решетки (ФАР) и активной фазированной антенной решетки (АФАР), работающих в СВЧ-диапазоне частот, нуждается в моделировании функционирования отдельных устройств и систем на электродинамическом уровне. Для этого часто используют специализированные программы, например *ANSYS HFSS* [1, 2], *CST Studio Suite*, *Altair FEKO*. Эти программы при умелом применении довольно точно рассчитывают СВЧ характеристики, однако требуют большого времени счета и персонального компьютера (ПК) высокой производительности. Поэтому их целесообразно использовать при решении задач, для которых необходимо точное электродинамическое моделирование, например:

• выбор конструкции излучателя с учетом требований на диаграмму направленности (ДН) одного излучателя в составе многоэлементной ФАР;

• расчет амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик распределительной системы;

• учет влияния краевых эффектов на характеристики направленности;

• учет влияния окружающих объектов и т. д.

В то же время большинство характеристик направленности многоэлементных ФАР может с достаточной для практики точностью рассчитываться с помощью алгоритмов, не предъявляющих особых требований к вычислительным средствам и средам программирования, и подобные задачи чаще всего невозможно решить с помощью программ СВЧ-моделирования. К таким задачам относятся:

• выбор базовых геометрических параметров раскрыва плоской ФАР: размеров апертуры, расчет границ однолучевой зоны и т. д.;

• выбор амплитудного распределения для обеспечения заданных характеристик излучения по суммарному и разностным каналам, включая пеленгационные характеристики;

• расчет ДН при сканировании с учетом ошибок реализации амплитудно-фазового распределения (АФР);

• формирование лучей специальной формы (одномерно и двумерно расширенных, косекансных);

• расчет точности установки луча в заданное направление;

• работа с динамическими диаграммами;

• поддержка операций настройки ФАР/АФАР;

• учет особенностей цифрового диаграммообразования и т. д.

© Кузнецов И. А., Грибанов А. Н., Курушин А. А., Мосейчук Г. Ф., Синани А. И., 2019

Поэтому необходимо так построить программы поддержки разработок ФАР, чтобы в рамках одного пакета программ гибко совмещать средства точного и быстрого моделирования. Одной из самых быстро развивающихся и перспективных сред математического и инженерного моделирования в настоящее время является *MATLAB* [3, 4]. Покажем на примере моделирования ФАР с плоским раскрывом основные правила организации такого взаимодействия между программами *ANSYS HFSS* и *MATLAB*.

Управление с помощью *MATLAB* процессами, протекающими в *HFSS*, заключается во взаимодействии компонент программного обеспечения в операционных системах *Windows*. Каждая программа делится на различные компоненты, например, навигации, вставки и др.

Основой для объединения компонент программного обеспечения в приложение служит *Microsoft Component Object Model* (*COM*). Это средство, использующее объектно-ориентированные языки программирования последней модификации. Здесь компоненты запускаются компиляцией кода, и исходный код можно написать в любой из доступных программ программирования, поддерживающей *COM*. Для данного случая *COM*-клиентом будет программа, которая контролирует, т. е. *MATLAB*. А в качестве *COM*-объекта выступит программа, которую нужно контролировать, т. е. *HFSS*.

В *MATLAB* для создания *COM*-сервера используется команда *actxserver('progid')*, где *progid* – это идентификатор программы, по которому ее можно вызвать. Обычно эта запись появляется в реестре с установкой новой программы: *HKEY_CLASSES_ROOT/progid*.

Программу *HFSS* (*AEDT*) можно представить в виде блоков (рис. 1), которые отражают последовательность обработки потока данных.

Функции блоков, представленных на рис. 1, следующие:

• *oDesktop* является объектом рабочего пространства (открывает доступ к функции обновления рабочего окна программы);

• *oProject* открывает доступ к функциям управления проекта;

• *oDesign* открывает доступ к функциям управления конкретного дизайна;

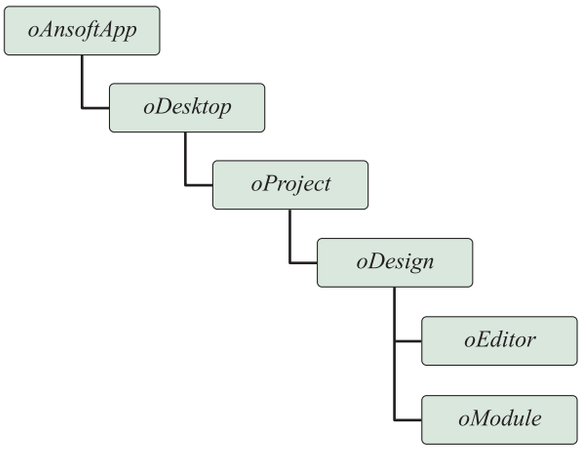


Рис. 1. Структура связи в *HFSS*

• *oEditor* позволяет пользоваться функциями копировать, вырезать, вставить, функциями объединения геометрии (*Unite*) и др.;

• *oModule* позволяет управлять папками *Boundaries* или *Excitations* и др.

Например, в последовательности может быть несколько блоков *oProject*, которые активируются командой *oProject = oDesktop. SetActiveProject(hfss_proj_name)*.

Эта команда выполняется в результате выбора проекта *HFSS*. В данном случае команда *oDesktop* выступает в роли функции, а *SetActiveProject(value)* – аргумента.

Через *MATLAB* можно создавать макросы для каждой из программ, которые от кода в *MATLAB* отличаются лишь языком описания. Так как для *HFSS* используют *VBScript* (*Visual Basic Script*), то макросы используют тот же код. Макросы дают возможность использовать данные моделирования внутри программы и тем самым применять собственные алгоритмы постобработки данных. В некоторых случаях уместно создавать макросы вместо построчного выполнения кода в *MATLAB*.

В качестве излучателя в «бесконечной» ФАР, работающей на частоте 10 ГГц, используем рупор (рис. 2), его модель заранее выполнена в программе *HFSS Antenna Design Kit*. Создадим в *MATLAB* модель плоской антенной решетки и загрузим данные в программу *HFSS* для расчета электродинамическими методами.

Можно выделить два разных способа построения антенной решетки в *HFSS*, которые доступны в меню *Antenna Array Setup*…: *Regular Array Setup и Custom Array Setup*. Со-

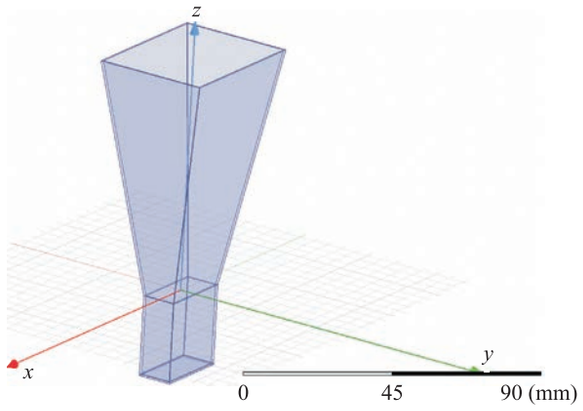


Рис. 2. Модель излучателя ФАР в *HFSS*

здание моделей антенных решеток, имеющих структуру, отличную от прямоугольной, с постоянным АФР, возможно лишь посредством второго варианта. При этом требуется сформировать текстовый файл, описывающий каждый элемент в целом (рис. 3).

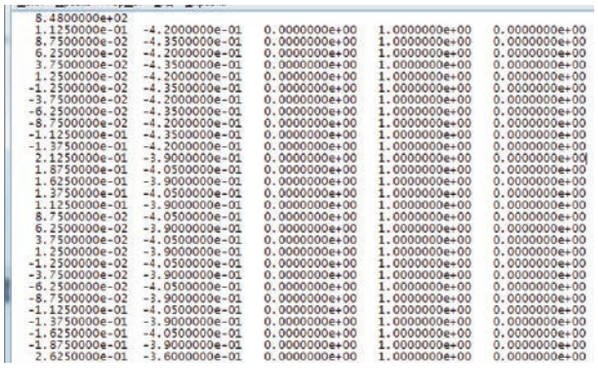


Рис. 3. Текстовый файл конфигурации антенной решетки

Для управления программой посредством кода возможны оба эти варианта. Однако во втором случае не удалось в автоматическом режиме загрузить файл конфигурации, поэтому был написан макрос, содержащий в себе те же данные.

Для запуска программы *HFSS* из *MATLAB* используется код *oAnsoftApp= actxserver('Ansoft.ElectronicsDesktop')*. Далее нужно активировать рабочее пространство программы командой *oDesktop=oAnsoftApp. GetAppDesktop()*. Когда рабочий стол активирован, можем открыть проект: *oDesktop. OpenProject(file_hfss)*. Так как открытых в программе проектов может быть несколько, то необходимо выбрать нужный, даже если проект один: *oProject=oDesktop.SetActiveProject(hfss_ proj_name)*. В проекте может быть несколько дизайнов, следует сделать активным только один. Можно записать имя непосредственно в код, а можно получить имена дизайнов, содержащихся в проекте, и выбрать один из них: *oDesign=oProject.SetActiveDesign(active_ design_name)*.

Необходимо задействовать каждый из модулей, используемых в работе, чтобы можно было пользоваться их функциями. Например, модуль *RadField* позволяет управлять параметрами антенных решеток, областью расчета и т. д., *oDesign.Solve(setup_name)* запускает расчет проекта.

После проведения расчетов результат можно сохранить в текстовый файл и загрузить их в *MATLAB* в качестве данных о параметрах излучателя. Формируем в *MATLAB* модель антенной решетки:

```
sAnt = phased.CustomAntennaElement('FrequencyVector',freqVector,...
    'AzimuthAngles',Az, 'ElevationAngles',El,...
    'MagnitudePattern',Pat_AzEl_Izl,
'PhasePattern',phasepattern);
```

Модель антенной решетки создается средствами *Phased Array System Toolbox: MATLABArray=phased.URA('Element', sAnt, 'Size', [N M], 'ElementSpacing', [dy dx], 'Lattice', 'Rectangular')*. На рис. 4 представлено расположение элементов решетки, созданной средствами *MATLAB*.



Рис. 4. Расположение излучателей модели ФАР в *MATLAB*

Используя управление программой *HFSS* через *MATLAB*, создаем антенную решетку с постоянными шагами решетки (рис. 5), а затем – скрипт-файл, с теми же данными, которые содержатся в *Custom Array Definition* (рис. 6):

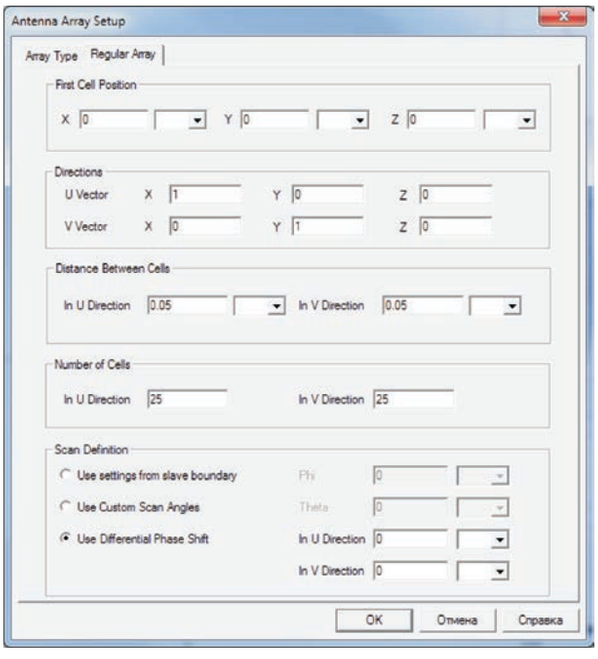


Рис. 5. Задание ФАР в *HFSS* с регулярными шагами излучателей

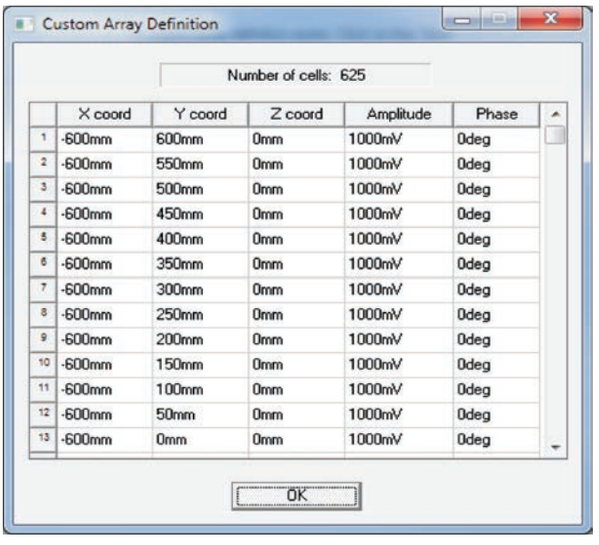


Рис. 6. ФАР, разработанная в *MATLAB* и представленная в *HFSS*

```
oModuleRad.EditAntennaArraySetup({'NAME:ArraySetupInfo', 'UseOption:=', 'RegularArray',...
  {'NAME:RegularArray', 'NumUCells:=', N, 'NumVCells:=', M,...
  'CellUDist:=', dx, 'CellVDist:=', dy,...
  'UDirnX:=', 1, 'UDirnY:=', 0, 'UDirnZ:=', 0,...
  'VDirnX:=', 0, 'VDirnY:=', 1, 'VDirnZ:=', 0,...
  'FirstCellPosX:=', 0, 'FirstCellPosY:=', 0, 'FirstCellPosZ:=',0,...
  'UseScanAngle:=', 'false', 'ScanAnglePhi:=',0, 'ScanAngleTheta:=',0,...
  'UDirnPhaseShift:=', 0, 'VDirnPhaseShift:=', 0}});
```

Выполнение данного кода совпадает с заданием ФАР на рис. 5. Второй метод – создание специального файл-скрипта (рис. 7), в котором прописаны координаты, амплитуда и фаза каждого излучателя в одну строку, что сильно усложняет код-программу из-за громоздкости записи данных в файл скрипта.

Итогом вышеперечисленных операций является расчет одной и той же ФАР, но разными методами. Второй метод позволяет загружать в *HFSS* данные антенной решетки любой структуры с любым заданным АФР.

ДН, полученные в результате расчетов, показаны на рис. 8. Сплошной линией изображена диаграмма излучателя в составе ФАР, рассчитанная в *HFSS* с учетом геометрических параметров излучателя. Два других совпадающих графика представляют ДН ФАР с регулярными шагами излучателей, созданную и рассчитанную в *HFSS* под управлением *MATLAB*, и ФАР, созданную в *MATLAB* и переданную посредством скрипт-файла для расчетов в *HFSS*.

Таким образом, на примере моделирования ФАР с плоским раскрывом показаны основные правила организации взаимодействия между программами *ANSYS HFSS* и *MATLAB*. Программа, написанная в *MATLAB*, являясь главной, запускает *HFSS*, открывает заранее разработанный файл проекта излучателя, управляет параметрами расчета в *HFSS* диаграммы одного излучателя в составе бесконечной решетки, принимает рассчитанные данные и проводит их дальнейшую обработку по своим алгоритмам.

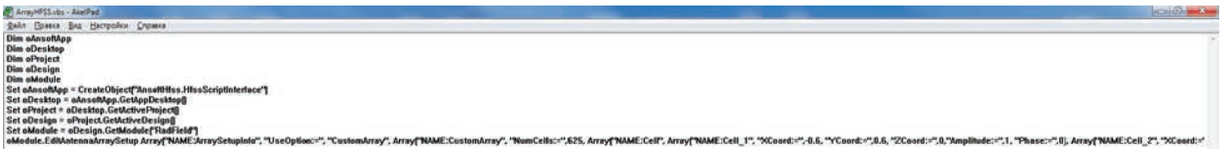


Рис. 7. Структура скрипт-файла с данными ФАР

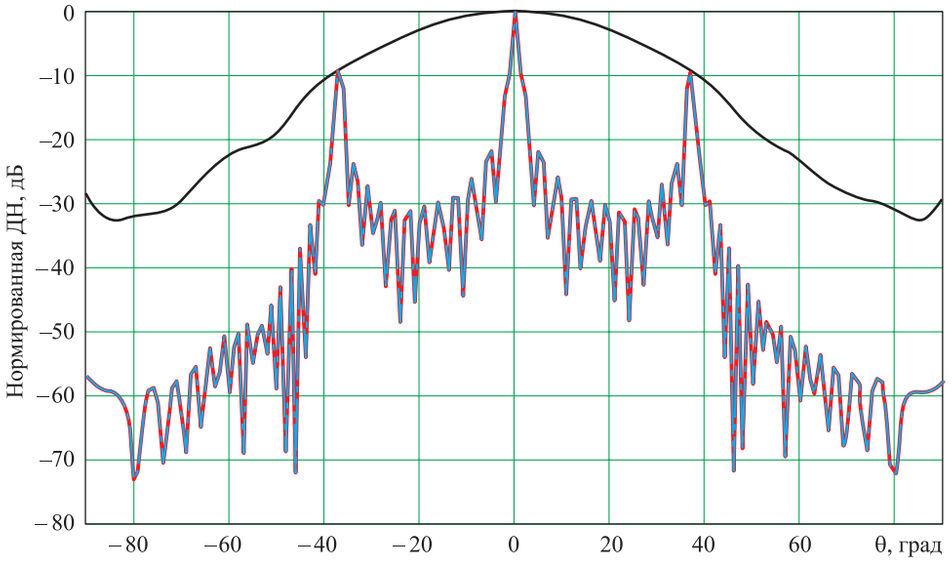


Рис. 8. ДН излучателя и ФАР, рассчитанные разными способами

Отметим, что расчет характеристик ФАР с использованием *MATLAB* и *HFSS* позволяет получить следующие преимущества:

• проведение сквозной автоматизации расчетов;

• сокращение времени расчета (примерно на треть) без потери точности полученных результатов;

• проведение под управлением *MATLAB* параметрической оптимизации на заданные характеристики излучения ФАР с подбором параметров излучающей системы, включая конструкцию излучателя.

Таким образом, рассмотренный подход позволяет совмещать преимущества точного моделирования отдельных СВЧ-систем ФАР в специализированных программах с программами, использующими собственные алгоритмы расчета характеристик ФАР.

Список литературы

1. ANSYS. URL: http://www.ansys.com (дата обращения 10.10.2018).

2. *Банков С. Е., Гутцайт Э. М., Курушин А. А.* Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS. М.: Оркада, 2012. 250 с.

3. Mathworks. URL: http://www.mathworks.com (дата обращения 10.10.2018).

4. *Ануфриев И. Е.* Самоучитель *MATLAB* 5.3/6.х. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 736 с.

Поступила 29.11.18

Кузнецов Иван Алексеевич – инженер Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: электродинамическое моделирование антенных устройств, радиотехнические системы специального и гражданского назначения.

Грибанов Александр Николаевич – кандидат технических наук, начальник сектора Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: математическое моделирование характеристик излучения ФАР и АФАР, фазовый синтез лучей специальной формы, измерение и обработка динамических диаграмм направленности.

Курушин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.
Область научных интересов: программы электродинамического моделирования, радиотехнические системы специального и гражданского назначения.

Мосейчук Георгий Феодосьевич – начальник лаборатории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: активные и пассивные антенные решетки, СВЧ-техника, управление формой диаграмм направленности и режимами излучения, методы антенных измерений, в том числе динамические диаграммы направленности, настройка ФАР и АФАР.

Синани Анатолий Исакович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: радиотехнические системы специального и гражданского назначения и др.

Electrodynamic computations using *ANSYS Electronics Desktop* software controlled by a program developed in the *MATLAB* environment

The paper considers methods of controlling the process of electrodynamic structure simulation in the *ANSYS Electronics Desktop* software (previously known as *ANSYS HFSS*). The *MATLAB* software was leading the computation. In order to transmit data to the *ANSYS Electronics Desktop* software we employed the *Microsoft Component Object Model* technology, which makes it possible to combine software components into executables. We used simulation of a planar aperture phased antenna array to show the possibilities and limitations in controlling the *ANSYS HFSS* software subsequently outputting data to a text file and importing the latter into *MATLAB* for further computation. We present simulation results for a phased antenna array generated by the *ANSYS Electronics Desktop* software according to the array model compiled in *MATLAB*.

Keywords: electrodynamic simulation, software control, phased antenna array, radiation pattern, *MATLAB*.

Kuznetsov Ivan Alekseevich – Engineer, Joint Stock Company “V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Zhukovskiy.
Science research interests: electrodynamic simulation of antenna devices, radioengineering systems for military and civilian use.

Gribanov Aleksandr Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, Head of Sector, Joint Stock Company “V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Zhukovskiy.
Science research interests: mathematical modelling of phased array and active electronically scanned array radiation characteristics, phase synthesis of special beam shapes, dynamic radiation pattern measurement and processing.

Kurushin Aleksandr Aleksandrovich – Candidate of Engineering Sciences, Department of Radio Devices and Antenna Systems, National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow.
Science research interests: electrodynamic simulation software, radioengineering systems for military and civilian use.

Moseychuk Georgiy Feodosevich – Head of Laboratory, Joint Stock Company “V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Zhukovskiy.
Science research interests: active and passive antenna arrays, microwave technology, radiation mode and pattern shaping, antenna measurement methods, including dynamic radiation patterns, phased array and active electronically scanned array setup.

Sinani Anatoliy Isakovich – Candidate of Engineering Sciences, Deputy General Director in Research Work, Joint Stock Company “V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Zhukovskiy.
Science research interests: radioengineering systems for military, civilian and other uses.

УДК 621.396.677.3

А. Н. Грибанов, С. Е. Гаврилова, О. В. Павлович,
Г. Ф. Мосейчук, А. Н. Титов

Метод формирования и масштабирования расширенных лучей фазированной антенной решетки

Рассматривается фазовый синтез одномерно расширенных лучей фазированной антенной решетки с использованием метода веерных парциальных диаграмм, с помощью которого на основании известного амплитудного распределения в раскрыве и требуемой формы луча посредством простых вычислений можно однозначно определить искомое фазовое распределение. Метод применим для фазированной антенной решетки и активной фазированной антенной решетки с линейными и плоскими раскрывами. Впервые широко обсуждаются свойства масштабирования расширенных лучей, позволяющие на основании одного варианта синтеза получать множество других вариантов умножением фазового распределения на коэффициент масштабирования. Сформулированы и доказаны четыре важных свойства масштабирования, которые необходимо учитывать при его проведении. Представлены результаты математического моделирования и экспериментальных измерений, доказывающие работоспособность метода.

Ключевые слова: фазовый синтез, фазированная антенная решетка, диаграмма направленности, расширение луча, масштабирование.

Введение

В современных бортовых многофункциональных радиолокационных станциях (РЛС) в качестве антенн часто используются пассивные фазированные антенные решетки (ФАР), от которых требуется оперативно изменять форму и параметры луча. Амплитудное распределение ФАР определяется параметрами распределительной системы и в условиях эксплуатации, как правило, не изменяется. Все преобразования формы луча могут проводиться только посредством управления фазовым распределением (ФР). Поэтому для оперативного формирования луча с заданными параметрами необходимо применять такие методы фазового синтеза, которые позволяют находить решения за малый промежуток времени, т. е. в используемом алгоритме синтеза должно быть минимальное число простых математических операций.

Рассмотренные в данной работе алгоритмы быстрого нахождения ФР во многом позволяют решать поставленные задачи. Они основаны на методе фазового синтеза веерных парциальных диаграмм направленности (ВПДН) [1–3]. В основу метода ВПДН положено простое соотношение для двухэлементной антенной решетки между направлением максимума диаграммы направленности (ДН) и разностью фаз на излучателях [4]. Также используются условия суперпозиции парциальных ДН и равенства излучаемой энергии, рассчитанной по раскрыву и в угловом пространстве формируемого луча. Благодаря наглядности и простоте используемых подходов и полученных алгоритмов операция фазового синтеза сводится к элементарным алгебраическим операциям, которые могут быть выполнены непосредственно в процессе работы РЛС. Модифицированные варианты метода позволяют также проводить фазовый синтез объемных ДН плоских ФАР с произвольной формой раскрыва [5] и служить основой для получения оптимальных решений фазового синтеза ДН в соответствии с заданным критерием оптимизации [6].

Следует отметить, что метод ВПДН имеет общие черты с методом геометрической оптики (ГО). Математический аппарат метода ГО основан на асимптотической оценке интеграла Фурье с быстро осциллирующей фазовой функцией, который в математике называется методом стационарной фазы [7]. Общий математический аппарат метода ГО [8–10] довольно сложен, он использует условие равенства энергий возбуждения и излучения, широко применяет понятие стационарной точки и по-

© Грибанов А. Н., Гаврилова С. Е., Павлович О. В., Мосейчук Г. Ф., Титов А. Н., 2019

зволяет учитывать поля, излучаемые краями антенны. Метод ГО является универсальным инструментом синтеза и в некоторых частных случаях линейных ФАР позволяет получить сравнительно простые фазовые решения.

Метод ВПДН, в отличие от метода ГО, базируется на очень простых положениях. Его можно рассматривать как инженерный метод фазового синтеза, решения которого для дискретных раскрывов аналогичны результатам, полученным по методу ГО. Вместе с тем именно простота и наглядность метода ВПДН позволили обнаружить свойство масштабирования решений синтеза, с помощью которого из одного варианта синтеза можно получать множество других вариантов посредством умножения фазового распределения на коэффициент масштабирования [11]. Это свойство позволяет дополнительно сократить время оперативного изменения расширенных лучей ФАР.

В данной работе обсуждаются возможности фазового метода ВПДН, применяемого для одномерного расширения луча плоской ФАР, а также особенности использования масштабирования решений фазового синтеза. Базовые положения и математические выражения, используемые в методе ВПДН, рассмотрены подробно, поскольку основные свойства операций масштабирования вытекают непосредственно из них.

Базовые положения и математические соотношения метода ВПДН

Концепция метода веерных парциальных диаграмм направленности основывается на представлении раскрыва ФАР из M излучателей в виде совокупности $(M-1)$ подрешетки [1–3]. Каждая из вновь сформированных подрешеток состоит из двух излучателей. Любой внутренний излучатель раскрыва условно расщепляется на два с теми же координатами и половинными значениями амплитуд относительно первоначального уровня. Из таких виртуальных половинок излучателей, разнесенных друг от друга на расстояние шага решетки, формируются парные подрешетки из двух элементов. На рис. 1 показано образование парных подрешеток для линейки излучателей.

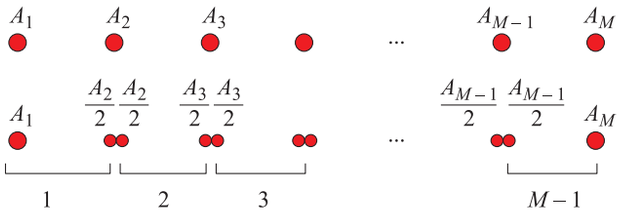


Рис. 1. Разбиение линейной ФАР на парные подрешетки

Каждая такая подрешетка формирует парциальную ДН, угловым положением луча которой можно управлять посредством наложения фазового сдвига на ее излучатели. Для получения расширенного луча всей ФАР максимумы этих лучей необходимо расположить на определенном угловом расстоянии друг от друга (рис. 2).

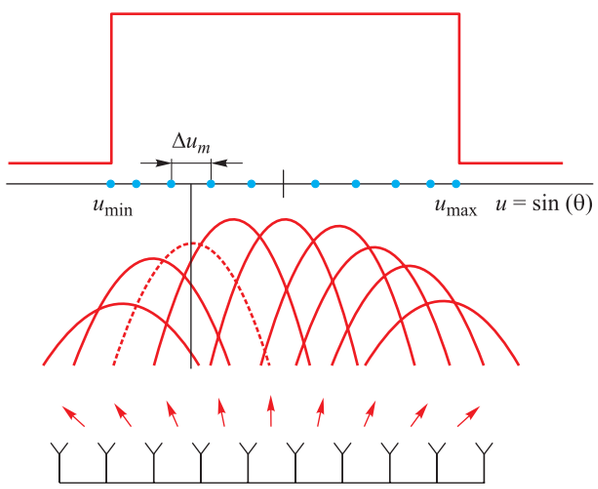


Рис. 2. Формирование расширенного луча

В основе метода лежат простые энергетические соотношения. При формировании расширенных лучей вся энергия, излучаемая раскрывом антенны, должна быть распределена в угловом пространстве от $u_{\min} = \sin(\theta_{\min})$ до $u_{\max} = \sin(\theta_{\max})$, и уравнение баланса энергии для ФАР с линейным дискретным раскрывом может быть приведено к виду

$$b\sum_{m=1}^{M-1} A^2_{m_\text{ср}}\Delta x_m = \sum_{m=1}^{M-1} F^2_{m_\text{ср}}\Delta u_m, \qquad (1)$$

где b – нормировочный коэффициент;

M – число излучателей в раскрыве;

$(M-1)$ – число парных подрешеток, таково же число угловых интервалов разбиения луча;

$A^2_{m_\text{ср}}$ – средняя величина излучаемой мощности на участке раскрыва Δx_m;

Δx_m – длина m-го участка раскрыва антенны;

$F^2_{m_\text{ср}}$ – средняя величина плотности излучаемой мощности в угловом интервале Δu_m;

Δu_m – m-й угловой интервал разбиения луча, выраженный в переменных $u = \sin(\theta)$.

Если уровни амплитудного распределения и формируемого луча увязаны друг с другом энергетически, то $b = 1$. В противном случае значение b легко определяется по результатам нормировки интегральных энергий.

Из заданной геометрии раскрыва и заданного возбуждения токов на элементах известными становятся все члены левой суммы. Требуемый вид луча $F(u)$ считается заданным, неустановленными остаются угловые интервалы $\{\Delta u_m\}$ и соответствующие им средние значения $\{F^2_{m_\text{ср}}\}$.

Уравнение (1) имеет множество решений. Самое простое можно получить при почленном равенстве слагаемых, т. е. при выполнении для всех значений m соотношения

$$bA^2_{m_\text{ср}}\Delta x_m = F^2_{m_\text{ср}}\Delta u_m. \qquad (2)$$

Физически выражение (2) означает, что энергия, излучаемая каждым m-м участком раскрыва, расположенным на интервале Δx_m, должна быть направлена в соответствующий m-й угловой интервал, и именно она определяет плотность энергии в интервале Δu_m. На рис. 3 наглядно продемонстрировано определение расположения m-й угловой зоны и ее размеров при использовании соответствующих интегральных функций $P(x)$ и $P(u)$, выражающих энергетический баланс распределения энергии в раскрыве ФАР с одной стороны и угловом пространстве с другой. Требуемая форма луча обеспечивается за счет правильного расположения парциальных лучей с учетом их уровня.

Как было показано выше, в ФАР удобно в качестве подрешеток использовать два соседних излучателя. Уровень максимумов парциальных ДН $\{F_m(0)\}$ определяется видом амплитудного распределения в раскрыве и местоположением пары соответствующих излучателей:

$$A_{m_\text{ср}} = F_m(0) = \begin{cases} A_1 + \dfrac{1}{2}A_2, & m = 1 \\ \dfrac{1}{2}A_m + \dfrac{1}{2}A_{m+1}, & m \in [2,\ M-2] \\ \dfrac{1}{2}A_{M-1} + A_M, & m = M-1 \end{cases}. \qquad (3)$$

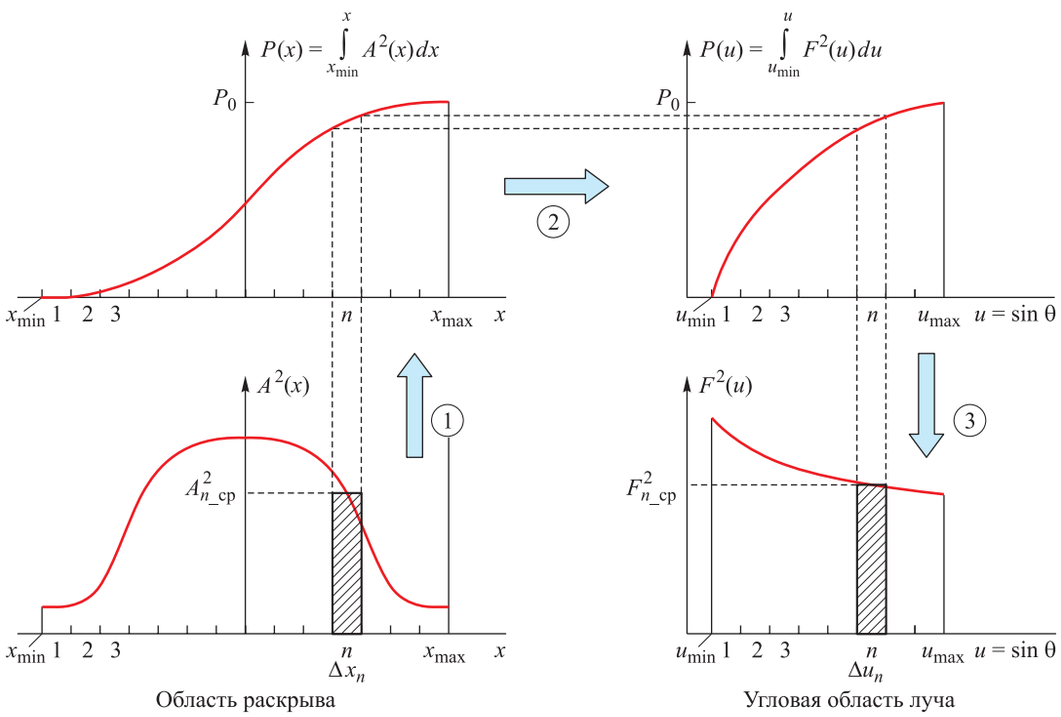


Рис. 3. Формирование расширенного луча

Ширина углового интервала, выделяемого каждому парциальному лучу (рис. 2, 3), пропорциональна уровню парциального луча и определяется в наиболее простом случае секторного расширения исходного луча эквидистантной ФАР выражением

$$\Delta u_m = \left(\frac{u_{\max} - u_{\min}}{\sum_{i=1}^{M-1} F_i^2(0)} \right) F_m^2(0). \qquad (4)$$

Максимумы парциальных лучей должны быть направлены в центры соответствующих угловых интервалов, поэтому направления максимумов вычисляются по формуле

$$u_m = u_{\min} + \sum_{n=1}^{m-1} \Delta u_n \ + 0{,}5\Delta u_m. \qquad (5)$$

Для расположения парциальных лучей в направления $\{u_m\}$ необходимо определить фазовый сдвиг на излучателях парных подрешеток на величину

$$\Delta\varphi_{m+1} = -kdu_m. \qquad (6)$$

Очевидно, что фазы расщепленных излучателей (общих излучателей соседних подрешеток) должны быть одинаковы (см. рис. 1). Учитывая, что фазу первого излучателя ($m = 1$) можно не изменять (или принять равной нулю), искомая фаза других излучателей с номерами $m > 1$ будет определяться формулой

$$\varphi_m = \sum_{i=1}^{m-1} \Delta\varphi_i = -kd \sum_{i=2}^{m} u_{i-1}. \qquad (7)$$

Полученное фазовое распределение $\{\varphi_m\}$ и будет формировать луч требуемой формы $F(u)$. Применяя рассмотренный метод, можно формировать как простые одномерно расширенные секторные лучи, так и более сложные, например вида $\mathrm{cosec}^2(\theta)$.

Примечательно, что при изменении направлений всех парциальных лучей $\{u_m\}$ на одну величину Δu_0 формируемый луч сдвигается на эту угловую величину, что соответствует добавлению линейного фазового распределения вдоль раскрыва

$$\varphi_m = \sum_{i=1}^{m-1} \Delta\varphi_i = -kd \sum_{i=2}^{m} u_{i-1} = -kd \sum_{i=2}^{m} (u_{i-1} + \Delta u_0) = \\ = -kd \sum_{i=2}^{m} u_{i-1} - kx_m \Delta u_0. \qquad (8)$$

Показатели качества расширенных лучей (амплитуда осцилляций в области луча, ширина скатов луча, уровень боковых лепестков и т. д.) зависят от параметров амплитудного распределения (главным образом от уровня поля на краю), формы раскрыва, числа излучателей, значений шагов между ними, требуемой формы и параметров луча и т. д. Эти зависимости имеют сложный характер, и их выявление, даже для ФАР с заданной геометрией и возбуждением, требует довольно обширных исследований.

Главное преимущество метода заключается в использовании простых алгебраических выражений для расчета фазового распределения, дающих однозначное решение.

Масштабирование расширенных лучей

Свойство масштабирования заключается в наличии определенных соотношений между фазовым распределением и шириной луча. Под свойством масштабирования будем понимать следующее: если первичное ФР $\varphi(x)$ в раскрыве линейной ФАР формирует луч, расширенный в α раз, и если пропорциональное ему вторичное ФР $\beta\varphi(x)$ формирует луч, расширенный в $\alpha\beta$ раз, то ФР и ширина луча обладают свойством масштабирования по переменной $u = \sin(\theta)$ с коэффициентом β.

Ниже приведены формулировки и доказательства нескольких важных свойств метода ВПДН, которые очень полезны при синтезе расширенных лучей и проведении масштабирования.

Лемма 1. Если ФР, формирующее расширенный луч, сформировано по методу ВПДН, то ФР и ширина луча связаны свойством масштабирования.

Если на раскрыве ФАР уже сформировано первичное ФР, расширяющее луч по методу ВПДН в α раз, то уже определены направления $\{u_{\alpha m}\}$ парциальных лучей и сдвиги фаз на каждой бинарной подрешетке $\{\Delta\varphi_{\alpha m}\}$. Дополнительное изменение ширины луча в β раз означает, что парциальные лучи необходимо расположить в направлениях $\{\beta u_{\alpha m}\}$ (веер лучей (рис. 2) сжимается или расширяется в зависимости от значения β). Следовательно, в соответствии с (7), новое ФР на m-м излучателе составляет

$$\varphi_{\beta m} = \sum_{i=1}^{m-1} \Delta\varphi_{\beta i} = -kd \sum_{i=2}^{m} u_{\beta(i-1)} = -kd \sum_{i=2}^{m} \beta u_{\alpha(i-1)} = \\ = -kd\beta \sum_{i=2}^{m} u_{\alpha(i-1)} = \beta\varphi_{\alpha m}. \quad (9)$$

Это означает, что для дополнительного изменения ширины луча в β раз ФР необходимо дополнительно изменить в β раз. Таким образом доказано, что ФР и ширина луча, сформированные по методу ВПДН, обладают свойством масштабирования.

Лемма 2. Если ФР и ширина луча связаны свойством масштабирования, то для операции масштабирования в общем случае необходимо использовать первичное ФР, не приведенное к интервалу 2π.

Для доказательства выберем произвольный излучатель в раскрыве с номером m. В соответствии с методом ВПДН излучатель имеет фазу, которую можно представить в виде двух слагаемых, одно из которых есть целое число 2π, а другое – остаток, меньший 2π:

$$\psi_m = 2\pi n + \varphi_m. \quad (10)$$

При проведении операции масштабирования, т. е. дополнительного расширения луча в произвольное число β, ФР необходимо изменить в β раз:

$$\beta\psi_m = \beta 2\pi n + \beta\varphi_m. \quad (11)$$

Следовательно, при масштабировании приведенного ФР, т. е. при отбрасывании слагаемого с целым числом 2π, получаем в общем случае неверное ФР, и масштабирование будет неэффективно. Примечательно, что в частном случае масштабирования в целое число раз (β = 2, 3, 4 и т. д.) луч будет дополнительно расширен в заданное число раз, даже при использовании приведенного ФР. Также очевидно, что луч будет дополнительно расширен правильно, если диапазон изменения ФР, полученного при первоначальном расширении, не превышает 2π (вариант $n = 0$).

Лемма 3. Если ФР и ширина луча связаны свойством масштабирования, то при операции масштабирования в β раз границы начала и конца луча изменяются в β раз по переменной $u = \sin(\theta)$.

Из выражений (9) следует, что при операции масштабирования в β раз направления u всех парциальных лучей (в том числе начального и конечного) изменяются в β раз. В соответствии с теорией формирования расширенных лучей по методу ВПДН границы начального и конечного парциальных лучей определяют границы начала и конца формируемого луча. Это свойство носит общий характер и не зависит от формы расширенного луча.

Лемма 4. Если ФР и ширина луча связаны свойством масштабирования, то при масштабировании в β раз луча, первоначально расширенного в α раз, формируются те же ФР и форма луча, которые были бы получены при первоначальном расширении луча в $\alpha\beta$ раз.

Данное свойство следует непосредственно из выражений (9), которые также используются и при первоначальном формировании луча по методу ВПДН (7).

При использовании метода ВПДН и свойства масштабирования необходимо также принимать во внимание следующие обстоятельства:

• коэффициент расширения луча означает изменение ширины луча по переменной $u = \sin(\theta)$;

• в качестве коэффициента расширения луча можно использовать параметры расширения по разным уровням (–3 дБ, –6 дБ и т. д.). Необходимо учитывать, что на вершине расширенного луча присутствуют осцилляции, а на низких уровнях – «прилипшие» к лучу боковые лепестки;

• метод ВПДН и свойство масштабирования позволяют обеспечить требуемую форму амплитудной ДН в области расширения луча, но не определяют фазовую ДН;

• форма расширенного луча не изменится, если у синтезированного или отмасштабированного ФР инвертировать знак или к нему добавить постоянную составляющую;

• при добавлении линейно изменяющегося вдоль раскрыва ФР синтезированный луч сдвигается в угловой области без изменения формы. Если отклоненный луч подвергнуть масштабированию, то его границы изменятся в соответствии с леммой 3;

• в данной работе метод ВПДН и свойство масштабирования описаны в применении к множителю направленности (МН) ФАР, т. е.

для случая использования всенаправленных независимых излучателей. Для реальных ФАР изложенная теория справедлива при синтезе и масштабировании лучей в угловой области, где ДН одного излучателя (диаграмма сканирования) близка к единице. При синтезе более широких лучей необходимо требуемую форму луча скорректировать с учетом диаграммы сканирования, соответствующим образом завысив уровни синтезируемого луча в удаленных угловых областях.

Необходимо отметить, что, по-видимому, свойством масштабирования обладают также решения, полученные по методу ГО. Однако это предположение и степень общности его возможного использования нуждаются в доказательствах. По крайней мере решения, полученные для линейных ФАР в [9], таким свойством обладают.

Результаты математического моделирования секторных лучей

Свойства масштабирования легко проверяются средствами математического моделирования. На рис. 4 представлены 5 вариантов фазового расширения луча. Результаты моделирования получены для линейной ФАР, состоящей из 40 излучателей, расположенных с шагом $0{,}5\lambda$, и амплитудным распределением вида косинус на пьедестале с уровнем поля на краю, равным 0,25.

На рис. 4 красным цветом показано фазовое распределение, применяемое для первичного расширения луча, и соответствующий расширенный луч. Используя коэффициенты масштабирования $\beta = \{1{,}7,\ 1{,}7^2 \approx 2{,}9,\ 1{,}7^3 \approx 4{,}9,\ 1{,}7^4 \approx 8{,}4\}$, получаем соответствующие варианты расширения первичного секторного луча. Формируемый луч тем шире, чем больше диапазон изменения ФР в раскрыве.

Доказанные свойства масштабирования легко распространяются на ФАР с плоскими раскрывами. В этом случае в качестве линейной ФАР необходимо использовать эквивалентный линейный раскрыв [4].

На рис. 5 приведены примеры формирования в плоской ФАР секторных лучей в угломестной плоскости с использованием разрабатываемых методов. Зеленым цветом показаны решения (ФР и ДН) первичного расширения луча в 8 раз. Последующие 2 вторичных решения получены масштабированием в 1,5 и $1{,}5^2$ раза. Для сравнения на рис. 5, г приведена также исходная ДН, а на рис. 5, в в качестве примера – трехмерная ДН с секторным лучом.

Наличие свойства масштабирования позволяет в плоских ФАР существенно упростить процесс формирования семейства расширенных лучей и в наклонных плоскостях. Эта возможность может быть реализована путем изменения в раскрыве плоскости формирования фазового распределения. Последнее особенно актуально, например, для бортовых ФАР, размещенных на летательных аппаратах,

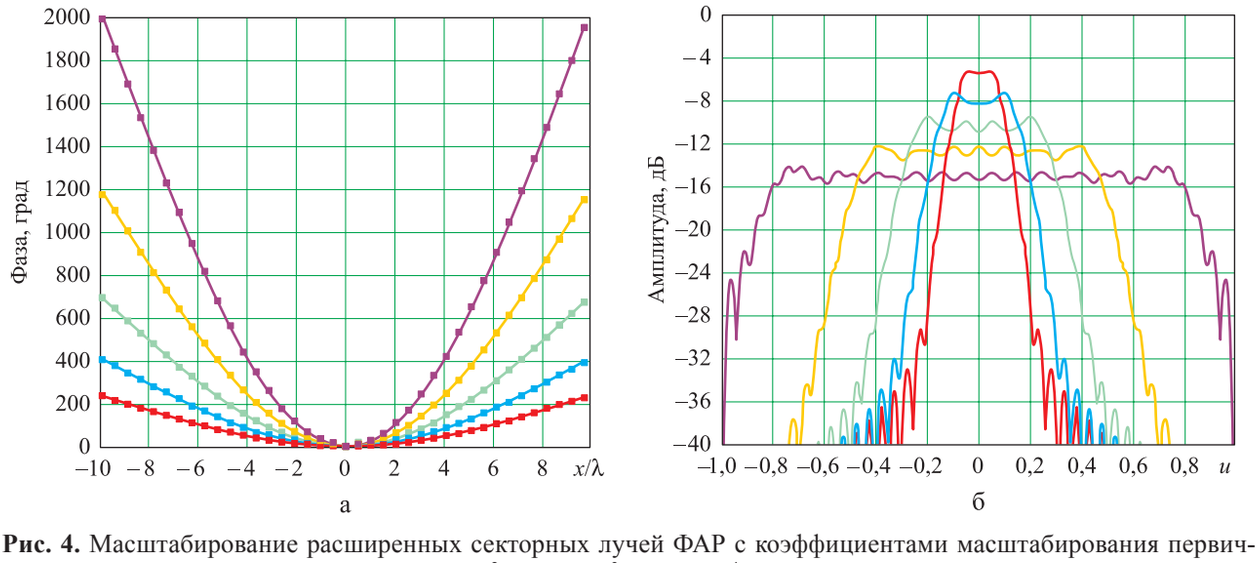


Рис. 4. Масштабирование расширенных секторных лучей ФАР с коэффициентами масштабирования первично расширенного луча (—) в 1,7 (—), $1{,}7^2$ (—), $1{,}7^3$ (—), $1{,}7^4$ (—) раза: а – ФР в раскрыве при различных коэффициентах масштабирования; б – МН при различных коэффициентах масштабирования

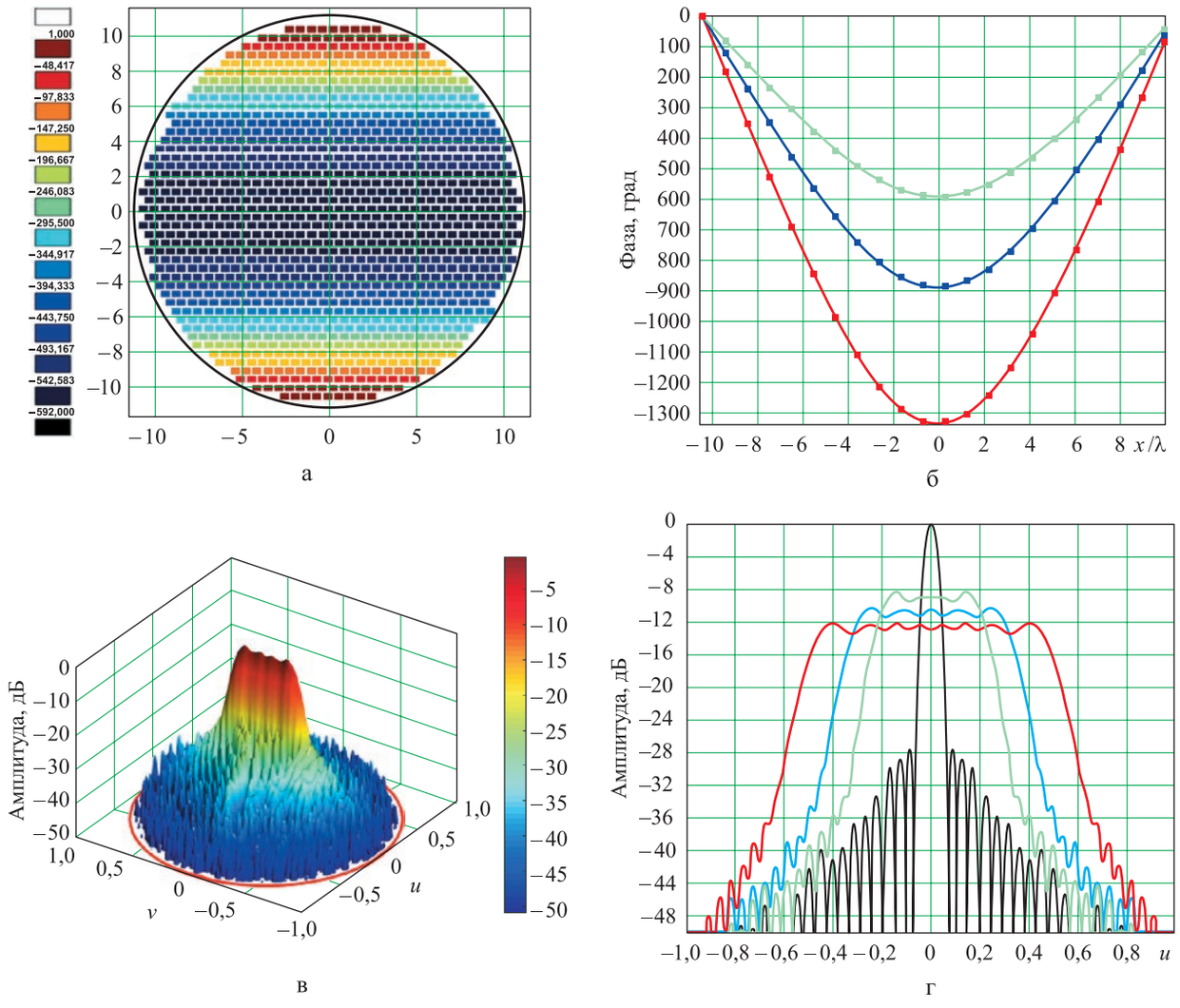


Рис. 5. Формирование секторных лучей в ФАР с круглым раскрывом:
—— – ДН синфазного раскрыва; —— – ФР и ДН с первичным расширением луча в 8 раз; —— – ФР и ДН с масштабированием β = 1,5; —— – ФР и ДН с масштабированием β = $1{,}5^2$; а – фазовое распределение в раскрыве; б – фазовые распределения вдоль центрального столбца излучателей; в – трехмерная ДН; г – угломестная ДН

в тех ситуациях, когда необходимо стабилизировать в угловом пространстве положение и форму луча при эволюциях самолета.

Результаты математического моделирования лучей вида $\mathrm{cosec}^2(\theta)$

Несомненным достоинством метода ВПДН является возможность масштабировать лучи более сложной формы, например вида $\mathrm{cosec}^2(\theta)$ (рис. 6).

На рис. 6, а, б представлены ФР, формирующие косекансные лучи. Синим цветом показано первичное ФР, красным и зеленым – формирующие расширенный и суженный лучи соответственно. На рис. 6, г приведены результаты масштабирования косекансных лучей в 1,7 раза. Построив дополнительно графики функций $\mathrm{cosec}^2(\theta) = 1/\sin^2(\theta)$ легко обнаружить соответствие косекансных лучей, сформированных методом ВПДН, соответствующим математическим функциям, что и подтверждает возможность масштабирования лучей вида $\mathrm{cosec}^2(\theta)$.

Важно учитывать, что при масштабировании косекансного луча в β раз в соответствии с леммой 3 границы луча изменяются по закону $u_{new} = \beta u_{old}$. Это означает, что начало и конец отмасштабированного луча должны сдвигаться на разные угловые расстояния, что и наблюдается на приведенных рисунках.

Необходимо также отметить, что в соответствии с леммой 4 не имеет значения, каким способом (методом масштабирования или не-

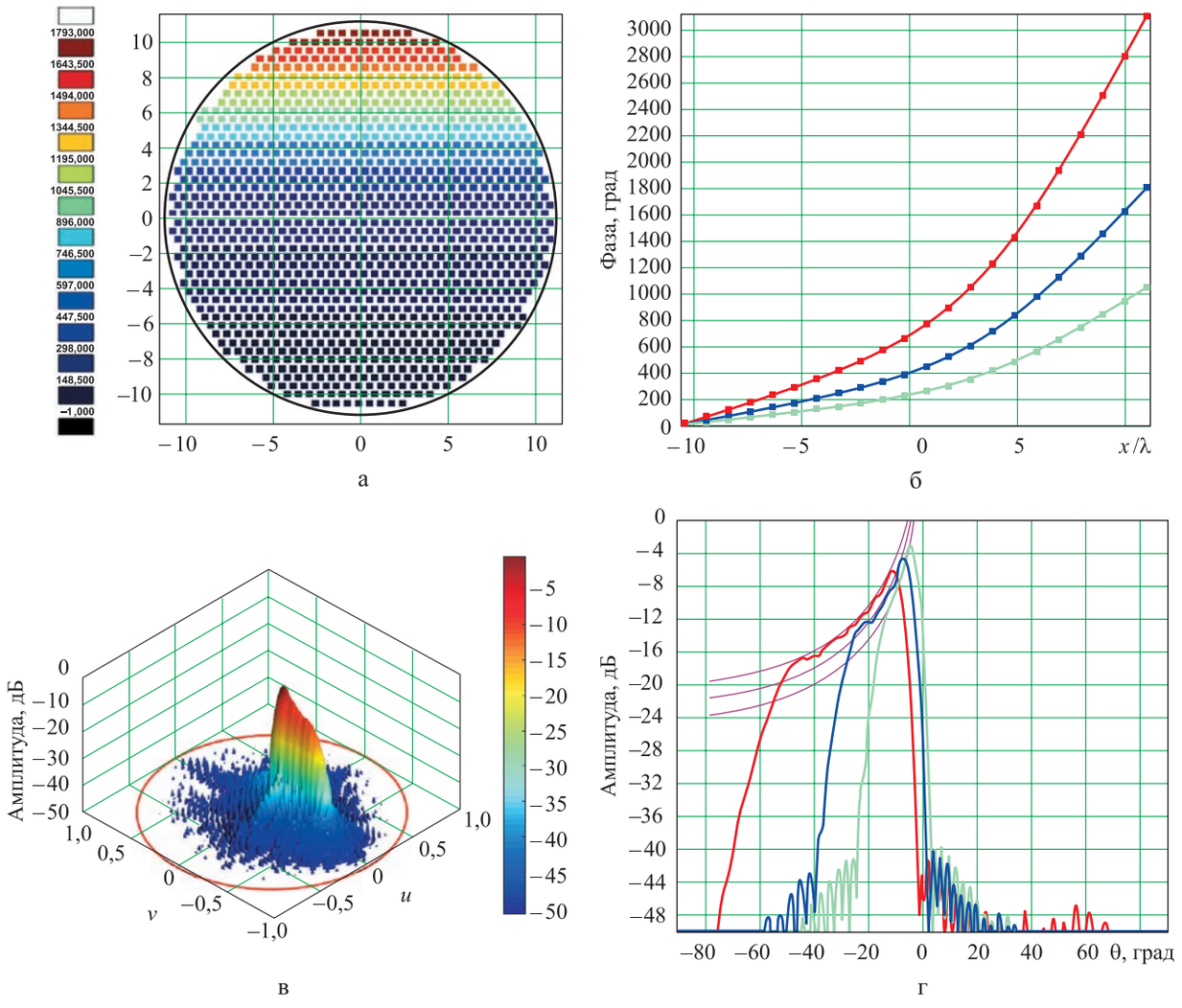


Рис. 6. Формирование ДН вида $\mathrm{cosec}^2(\theta)$ в ФАР с круглым раскрывом:
— – ФР и ДН с первичным расширением луча; — – ФР и ДН с масштабированием $\beta = 1{,}7$; — – ФР и ДН с масштабированием $\beta = 1{,}7^{-1}$; а – фазовое распределение в раскрыве; б – фазовые распределения вдоль центрального столбца излучателей; в – трехмерная ДН; г – угломестная ДН

посредственным синтезом по методу ВПДН) получены представленные варианты расширений. Параметры расширенных лучей будут одинаковы. Также не имеет значения, какой из вариантов расширения используется при масштабировании в качестве первичного.

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 7 представлены результаты экспериментальных исследований по формированию секторных и косекансных лучей, фазовые решения которых получены с применением метода ВПДН. В измерениях была использована ФАР с раскрывом круглой формы, имеющая спадающее вдоль радиуса амплитудное распределение с коэффициентом использования поверхности около 0,91 и случайную ошибку реализации ФР со среднеквадратичным отклонением $\sigma_\varphi \approx 5°$. Отметим, что уровень максимальных боковых лепестков для этой ФАР при формируемом синфазном распределении составляет ≈ –28 дБ.

Из представленных данных следует, что точность результатов моделирования и измерения для уровней ДН свыше –28 дБ достигает доли децибела. Максимальное отличие на рабочем участке смоделированной и измеренной косекансных ДН от функции $\mathrm{cosec}^2(\theta)$ составляет ≈1,5 дБ.

Заключение

Рассмотрен метод ВПДН, позволяющий проводить для ФАР операцию фазового синте-

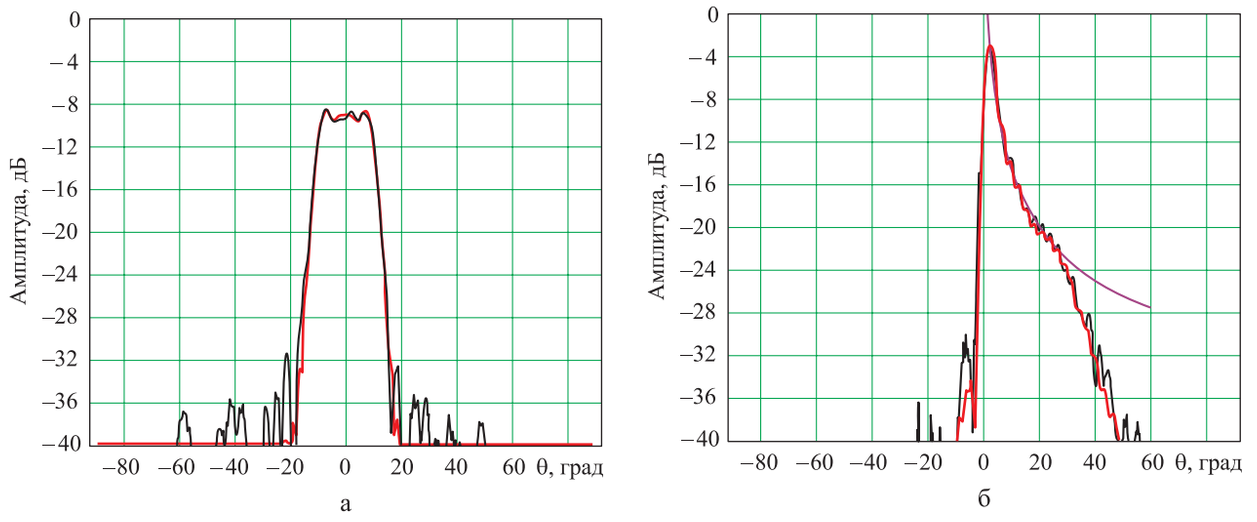


Рис. 7. ДН ФАР с расширенными лучами:
а – ДН ФАР с секторным лучом; б – ДН ФАР с лучом вида $\mathrm{cosec}^2(\theta)$; — – ДН по результатам моделирования; — – ДН экспериментальная; — – функция $\mathrm{cosec}^2(\theta)$

за одномерно расширенных лучей заданной формы. Впервые подробно исследуется новое свойство масштабирования, которое позволяет проводить операцию дополнительного расширения секторных лучей ФАР на основе ранее найденного варианта расширения. Таким образом, если в ФАР необходимо реализовать семейство однотипных расширенных лучей, то достаточно найти по методу ВПДН одно первичное ФР, расширяющее луч в α раз, а все остальные лучи с расширением в $\alpha\beta$ получать посредством умножения первичного фазового распределения на коэффициент β.

В работе были сформулированы и доказаны четыре важных свойства, которые необходимо учитывать при проведении масштабирования.

Результаты математического моделирования по формированию одномерно расширенных секторных и косекансных лучей подтвердили работоспособность метода ВПДН и эффективность масштабирования полученных решений.

Наличие свойства масштабирования дает значительные преимущества в использовании фазового синтеза расширенных лучей по методу ВПДН, важнейшими из которых являются:

• возможность на основе заданного амплитудного распределения в раскрыве и требуемой формы луча на основе простых алгебраических операций однозначно определять первичное фазовое распределение;

• простота математических операций масштабирования, заключающаяся в умножении первичного фазового распределения на коэффициент масштабирования, определяет легкость его практической реализации в ФАР;

• возможность формирования лучей с требуемыми коэффициентами расширения непосредственно в ходе работы РЛС с ФАР;

• возможность использования в активных и пассивных ФАР с линейными и плоскими раскрывами.

Есть основания полагать, что свойством масштабирования обладают также фазовые решения, полученные по методу ГО.

Обсуждаемый метод фазового синтеза с использованием свойства масштабирования прошел экспериментальную проверку в АО «НИИП имени В.В. Тихомирова» на образцах разработанных ФАР и АФАР при формировании секторных и косекансных лучей.

Список литературы

1. *Грибанов А. Н.* Эффективный метод фазового синтеза одномерно расширенных лучей в фазированной антенной решетке // Антенны. 2007. № 6. С. 26–29.

2. *Грибанов А. Н.*, *Титов А. Н.*, *Мосейчук Г. Ф.* Фазовый синтез расширенных лучей ФАР методом веерных парциальных диаграмм // Антенны. 2008. № 9 (136). С. 15–20.

3. *Gribanov A. N.*, *Titov A. N.*, *Moseychuk G. F.*, *Gavrilova S. E.* Generalized formula for phase synthesis of phased array sector beams //

International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), ICATT'13. September 16 –20, 2013, Odessa, Ukraine. Pp. 273–276.
4. *Марков Г. Т.*, *Сазонов Д. М.* Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.
5. *Литвинов А. В.*, *Мищенко С. Е.*, *Шацкий В. В.* Модифицированный метод веерных парциальных диаграмм для синтеза плоской антенной решетки с произвольным раскрывом // Материалы конференции МНК ИРЭМВ-2013, 23–28 июня 2013 г., Таганрог – Дивноморское. С. 250–255.
6. *Безуглов А. А.*, *Литвинов А. В.*, *Мищенко С. Е.*, *Шацкий В. В.* Эволюционный метод многокритериального фазового синтеза линейной антенной решетки // Радиотехника. 2017. № 6. С. 251–260.
7. *Федорюк М. В.* Метод перевала. М.: Наука, 1977. 368 с.
8. *Shanks H. F.* A Geometrical Optics Method of Pattern Synthesis for Linear Array // IRE Transactions on Antennas and Propagation. 1960. Vol. 8. Pp. 485– 490.
9. *Chakraborty A.*, *Das B. N.*, *Sanyal G. S.* Determination of Phase Functions for a Desired One-Dimensional Pattern // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1981. Vol. AP-29. No. 3. Pp. 502–506.
10. *Инденбом М. В.* Антенные решетки подвижных обзорных РЛС. Теория, расчет, конструкции. М.: Радиотехника, 2015. 416 с.
11. *Павлович О. В.*, *Грибанов А. Н.*, *Гаврилова С. Е.*, *Мосейчук Г. Ф.*, *Титов А. Н.* Масштабирование расширенных лучей ФАР // XVI Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии». Москва, 6 декабря 2018 г. Материалы конференции. М.: Мир науки, 2018. С. 82–86.

Поступила 29.11.18

Грибанов Александр Николаевич – кандидат технических наук, начальник сектора Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: математическое моделирование характеристик излучения ФАР и АФАР, фазовый синтез лучей специальной формы, измерение и обработка динамических диаграмм направленности.

Гаврилова Светлана Евгеньевна – инженер 1-й категории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: математическое моделирование характеристик излучения ФАР и АФАР, фазовый синтез лучей специальной формы, измерение и обработка динамических диаграмм направленности.

Павлович Олег Вадимович – инженер 2-й категории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: математическое моделирование характеристик излучения ФАР и АФАР, фазовый синтез лучей специальной формы, цифровое диаграммообразование, обработка сигналов.

Мосейчук Георгий Феодосьевич – начальник лаборатории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: активные и пассивные антенные решетки, СВЧ-техника, управление формой диаграмм направленности и режимами излучения, методы антенных измерений, в том числе динамические диаграммы направленности, настройка ФАР и АФАР.

Титов Алексей Никитич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: активные и пассивные антенные решетки, СВЧ-техника, фазовый синтез лучей специальной формы, сверхширокополосная радиолокация, пассивная радиолокация.

Method of forming and scaling phased array expanded beams

The paper focuses on the phase synthesis of one-dimensionally expanded phased array beams. In the study we used the fan partial diagram method. By this method and applying the known amplitude distribution in the aperture and the desired beam shape, we were able to unambiguously determine the desired phase distribution by means of simple calculations. The method is applicable for a phased antenna array and an active phased antenna array with linear and flat apertures. The study is the first to discuss the scaling properties of expanded beams, which allow one to obtain many synthesis options from only one option by multiplying the phase distribution by the scaling factor. Four important properties of scaling are formulated and proved, which must be taken into account when scaling. The paper gives the results of mathematical simulation and experimental measurements, proving the efficiency of the method.

Keywords: phase synthesis, phased antenna array, radiation pattern, beam expansion, scaling.

Gribanov Aleksandr Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, Head of Section, Joint-Stock Company V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, Zhukovskiy.
Science research interests: mathematical simulation of radiation characteristics of phased array antenna and active phased array antenna, phase synthesis of shaped beams, measurement and processing of dynamic radiation patterns.

Gavrilova Svetlana Evgenievna – engineer of 1st category, Joint-Stock Company V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, Zhukovskiy.
Science research interests: mathematical simulation of radiation characteristics of phased array antenna and active phased array antenna, phase synthesis of shaped beams, measurement and processing of dynamic radiation patterns.

Pavlovich Oleg Vadimovich – engineer of 2nd category, Joint-Stock Company V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, Zhukovskiy.
Science research interests: mathematical simulation of radiation characteristics of phased array antenna and active phased array antenna, phase synthesis of shaped beams, digital beam forming, signal processing.

Moseychuk Georgiy Feodosievich – Head of Laboratory, Joint-Stock Company V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, Zhukovskiy.
Science research interests: active and passive antenna arrays, microwave technology, control of pattern shape and radiation modes, methods of antenna measurements, including dynamic radiation patterns, phased array antenna and active phased array antenna tuning.

Titov Aleksey Nikitich – Candidate of Engineering Sciences, Leading Research Fellow, Joint-Stock Company V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, Zhukovskiy.
Science research interests: active and passive antenna arrays, microwave technology, phase synthesis of shaped beams, ultra-wideband radar, passive radar.

УДК 621.391.26:621.391.96

И. Ф. Лозовский

Применение широкополосных сигналов с псевдошумовой модуляцией фазы в РЛС обзора

Рассмотрены вопросы применения широкополосных сигналов с псевдошумовой модуляцией фазы в РЛС обзора. Определены среднестатистические корреляционные характеристики данных сигналов в диапазоне доплеровских частот и структура системы обработки, включающая многоканальный по частоте согласованный фильтр. Предложены способы защиты систем обнаружения данных сигналов от воздействия узкополосных импульсных и пассивных помех.

Ключевые слова: широкополосный сигнал, псевдошумовая модуляция фазы, корреляционная функция, согласованный фильтр, узкополосная импульсная помеха, медианный фильтр, РЛС обзора.

В настоящее время наметилась тенденция расширения полосы частот зондирующих сигналов в РЛС различного назначения [1–4]. Преимущества использования в РЛС обзора сигналов с псевдошумовой фазовой модуляцией (ПШМ) вместо традиционных линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) или нелинейно-частотно-модулированных (НЧМ) сигналов заключаются в первую очередь в значительном повышении защищенности РЛС обзора от действия имитирующих помех. В настоящей статье рассмотрены основные свойства сигналов с ПШМ фазы при отсутствии и наличии доплеровского сдвига частоты, а также методы обработки данных сигналов при воздействии узкополосных и пассивных помех. Вопросы технической реализации схем генерации и обработки данных сигналов, представляющие безусловный практический интерес, выходят за рамки представленной работы.

Определение и основные свойства сигналов с ПШМ фазы

Сигнал с ПШМ фазы может быть представлен следующим общим выражением:

$$S = \left\{ e^{j2\pi r_k} \right\}_{k=1}^{B}, \; r_k = \{0,1\}. \qquad (1)$$

Здесь r_k – равномерно распределенные случайные числа;

B – база сигнала.

Автокорреляционная функция (АКФ) сигнала с ПШМ выражается следующими формулами:

$$R(m) = \sum_{k=m+1}^{B} S(k)S^*(k-m),$$

$$R(-m) = R(m). \qquad (2)$$

Поскольку сигналы с ПШМ по своей сути являются случайными, можно определить их статистические характеристики. В частности, АКФ в среднем будет иметь нулевые боковые лепестки:

$$\overline{R}(m) = \begin{cases} N, m = 0; \\ 0, m \neq 0. \end{cases} \qquad (3)$$

Дисперсию АКФ можно вычислить по формуле

$$D_R(m) = \sum_{k=m+1}^{B} \sum_{n=m+1}^{B} \overline{S(k)S^*(n)S^*(k-m)S(n-m)} = B - |m|, \quad |m| > 0. \qquad (4)$$

Исходя из этого, среднеквадратическое отклонение (СКО) АКФ равно $\sqrt{D_R(m)} = \sqrt{B-m}$, 1-й боковой лепесток (БЛ) относительно главного лепестка приближенно равен $1/\sqrt{B}$, а последний – $1/B$. На рис. 1 для B = 10 000 и сигнала длительностью 100 мкс представлены статистические характеристики АКФ в виде зависимостей от времени t (мкс) следующих величин:

$$M_z = \frac{\sqrt{D_R}}{B}, \qquad M_z + S_z,$$

где z – выход согласованного фильтра (СФ);

S_z – флюктуационный разброс отдельных БЛ.

Нижняя граница УБЛ $M_z - S_z$ не показана, поскольку представляет меньший инте-

© Лозовский И. Ф., 2019

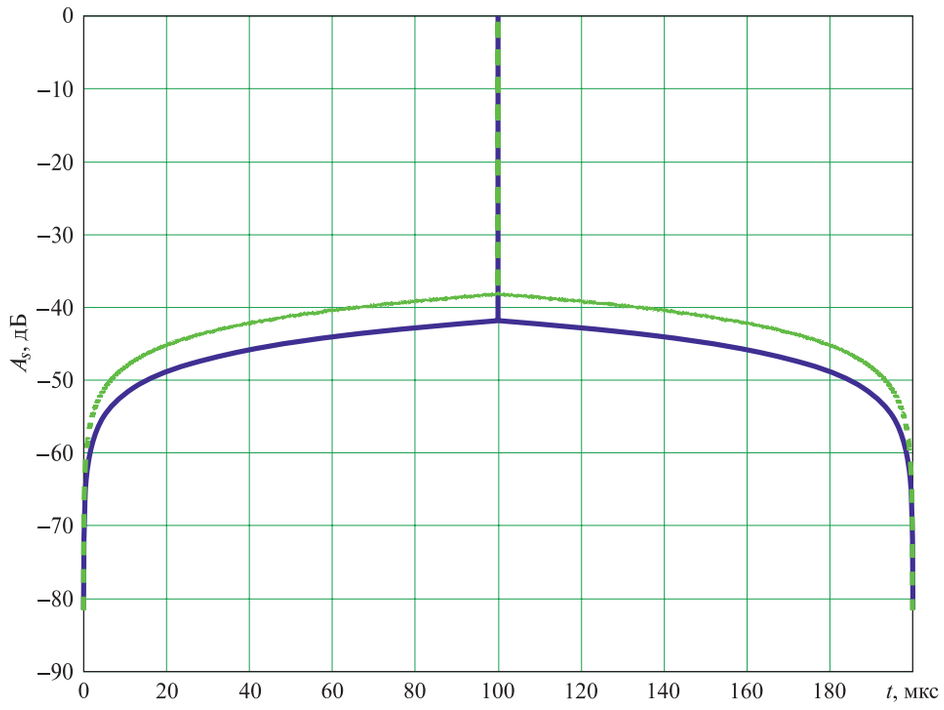


Рис. 1. АКФ сигнала с ПШМ на выходе цифрового СФ:
– M_z; – $M_z + S_z$

рес. Отметим, что величина среднего уровня БЛ (УБЛ) остается практически одинаковой в разных реализациях и равной в данном случае ~ –45 дБ.

Для широкополосных сигналов (ШПС) с ПШМ с большой базой достижим достаточно низкий УБЛ. К отрицательным качествам данных сигналов можно отнести принципиальную невозможность снизить УБЛ за счет применения оконных функций Хэмминга, Дольф – Чебышева и др. Весовая обработка (ВО) практически не влияет на УБЛ, уменьшаются только дальние лепестки. На рис. 2 приведен пример для ВО по Дольф – Чебышеву.

Аналогично (2)–(4) определяются взаимокорреляционная функция (ВКФ) сигналов S_i, S_j и ее дисперсия:

$$R_{ij}(m) = \sum_{k=m+1}^{B} S_i(k) S_j^*(k-m),$$
$$R_{ij}(-m) = \sum_{k=m+1}^{B} S_i(k-m) S_j^*(k); \quad (5)$$

$$D_{R_{ij}}(m) = \sum_{k=m+1}^{B} \sum_{n=m+1}^{B} \overline{S_i(k) S_i^*(n) S_j^*(k-m) S_j(n-m)} = B - |m|, \quad |m| > 0. \quad (6)$$

Пример расчета ВКФ представлен на рис. 3.

В заключение анализа характеристик сигналов с ПШМ найдем спектр такого сигнала:

$$G_n = \frac{1}{B} \sum_{k=1}^{B} e^{j\varphi_k} e^{-j2\pi \frac{(k-1)(n-1)}{B}}; \quad (7)$$

$$\overline{|G_n|^2} = \frac{1}{B^2} \sum_{k=1}^{B} \sum_{m=1}^{B} \overline{e^{j\varphi_k} e^{-j\varphi_m} e^{-j2\pi \frac{(k-m)(n-1)}{B}}} = \frac{1}{B}. \quad (8)$$

Полученный результат ожидаемо соответствует равномерному распределению единичной энергии сигнала по всему частотному диапазону.

Обработка сигналов с ПШМ фазы в диапазоне доплеровских частот

Существенный интерес представляет анализ влияния частоты Доплера на форму и мощность рассматриваемых сигналов на выходе СФ. Частный результат показан на рис. 4 для сигнала с ПШМ длительностью T_i =100 мкс, при частоте Доплера f_d = 2 кГц, потери L при этом составляют порядка 0,6 дБ. Однако при увеличении частоты Доплера до f_d = = 5 кГц потери уже будут неприемлемо велики: L = 3,9 дБ. Вместе с тем УБЛ практически не меняется (среднее значение M_z и верхняя

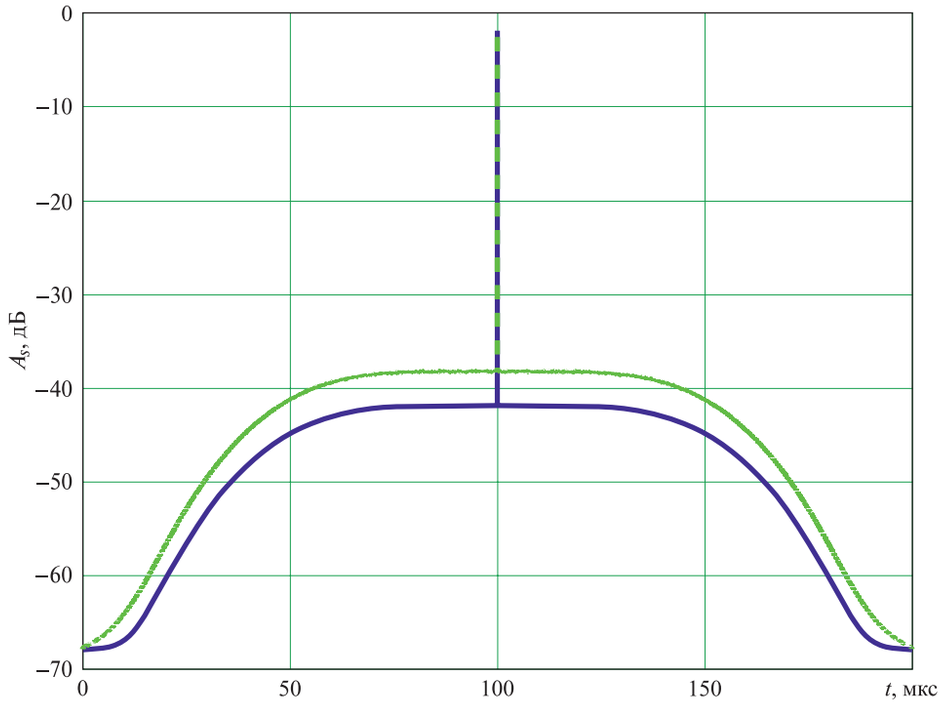


Рис. 2. АКФ сигнала с ПШМ на выходе СФ с ВО по Дольф – Чебышеву при $B = 10\,000$:
$-M_z$; $-M_z + S_z$

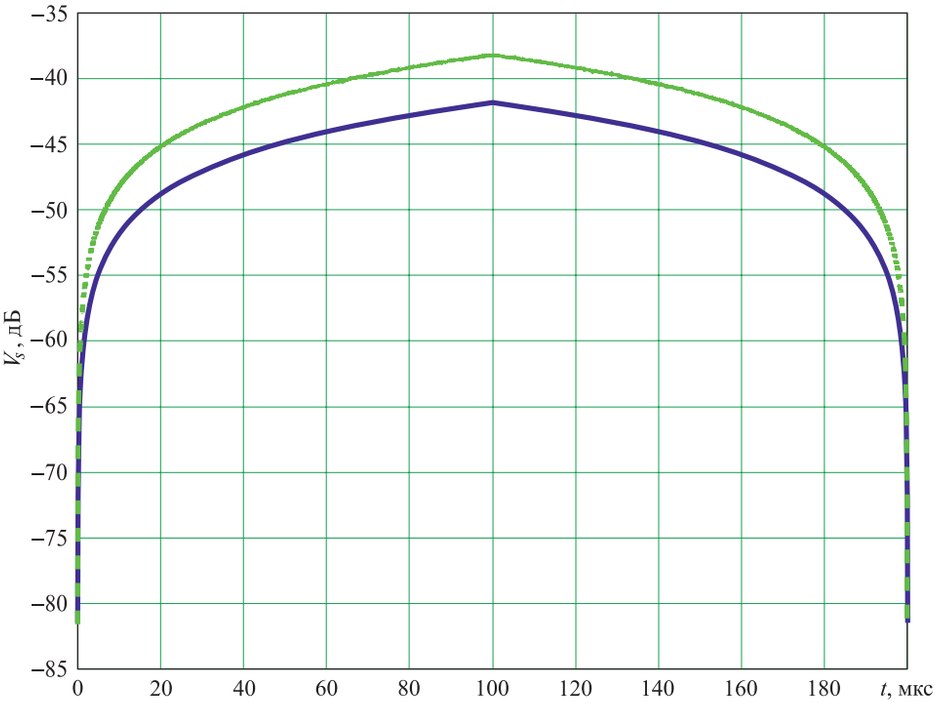


Рис. 3. ВКФ сигналов с ПШМ при $B = 10\,000$, $U_{bl} = -45{,}3$ дБ:
$-M_z$; $-M_z + S_z$

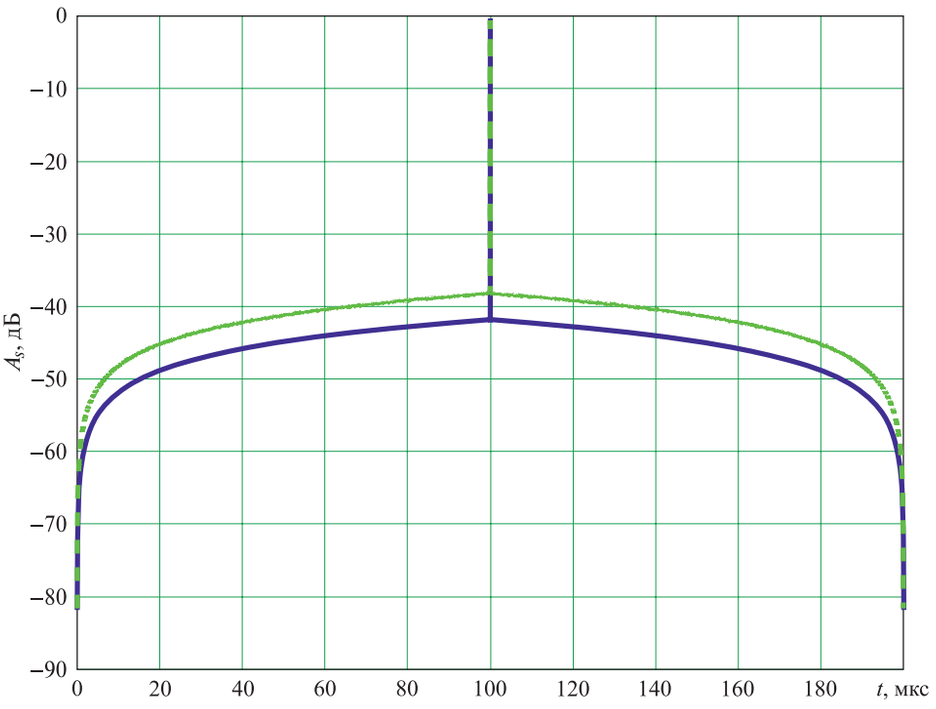


Рис. 4. АКФ сигнала с ПШМ на выходе СФ при доплеровском сдвиге частоты при B = 10 000, U_{bl} = –45,3 дБ, f_d = 2000 Гц, L = 0,6 дБ:
– M_z; – $M_z + S_z$

граница УБЛ $M_z + S_z$ в наборе из 10^4 статистически независимых сигналов увеличились меньше чем на 1 дБ), что определяется кнопочной формой функции неопределенности (ФН) данного сигнала.

Сечение ФН сигнала с ПШМ при $\tau = 0$ то же, что и у прямоугольного импульса соответствующей длительности T_i:

$$\rho(0, f) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} S(\lambda) S^*(\lambda) e^{j2\pi f\lambda} d\lambda \right|}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(\lambda)|^2 d\lambda} = \left| \frac{\sin(\pi f T_i)}{\pi f T_i} \right|. \quad (9)$$

Отметим, что УБЛ от частоты Доплера практически не зависит, т. е. вне основного лепестка ФН образует плоскость уровня:

$$\rho \approx \frac{\sqrt{T_i - \tau}}{T_i}. \quad (10)$$

Зависимость потерь обнаружения от частоты Доплера для T_i = 100 мкс приведена на рис. 5. Ее форма определяется ФН (9), в частности, при $f_d = \frac{1}{T_i}$ = 10 кГц составляет $\rho(0, f) = 0$, а потери – $L \to \infty$.

Для получения достаточно низких потерь обнаружения сигналов с ПШМ в широком диапазоне доплеровских частот потребуется, очевидно, применить многоканальный согласованный фильтр (МСФ). Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) МСФ для сигналов с ПШМ определяется выражением

$$A(f) = \max_{(k)} \left| \frac{\sin\left(\pi(f - f_k)T_i\right)}{\pi(f - f_k)T_i} \right|. \quad (11)$$

Здесь $|f_k| = 0 : \frac{2f_{dm}}{N_k - 1} : f_{dm}$;

f_{dm} – максимальное значение частоты Доплера по модулю;

N_k – общее число каналов для положительных и отрицательных частот.

Для N_k = 16 получается приемлемый результат (рис. 6), что вместе с тем означает, конечно, существенное увеличение объема аппаратуры или мощности вычислительного устройства, на котором реализуется цифровая обработка сигналов.

При обнаружении пачки из N сигналов с ПШМ (каждый сигнал имеет разную модуляцию) и периодом повторения T_p получаем следующую АЧХ:

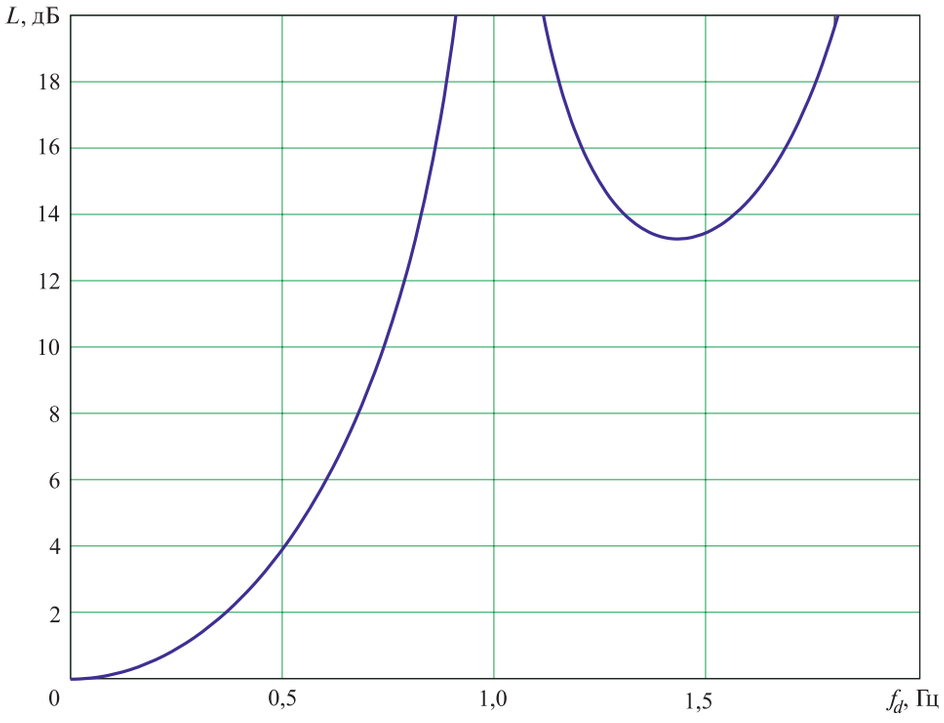


Рис. 5. Зависимость потерь энергии сигнала с ПШМ от частоты Доплера при $B = 10\,000$

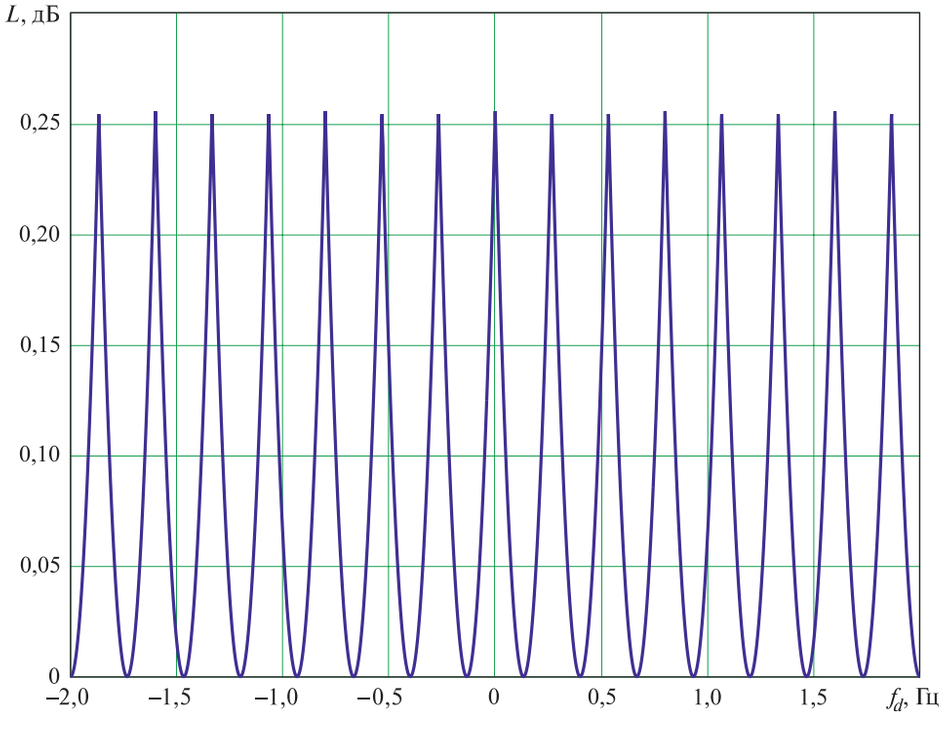


Рис. 6. Зависимость потерь энергии сигнала с ПШМ от частоты Доплера в МСФ для $N_k = 16$

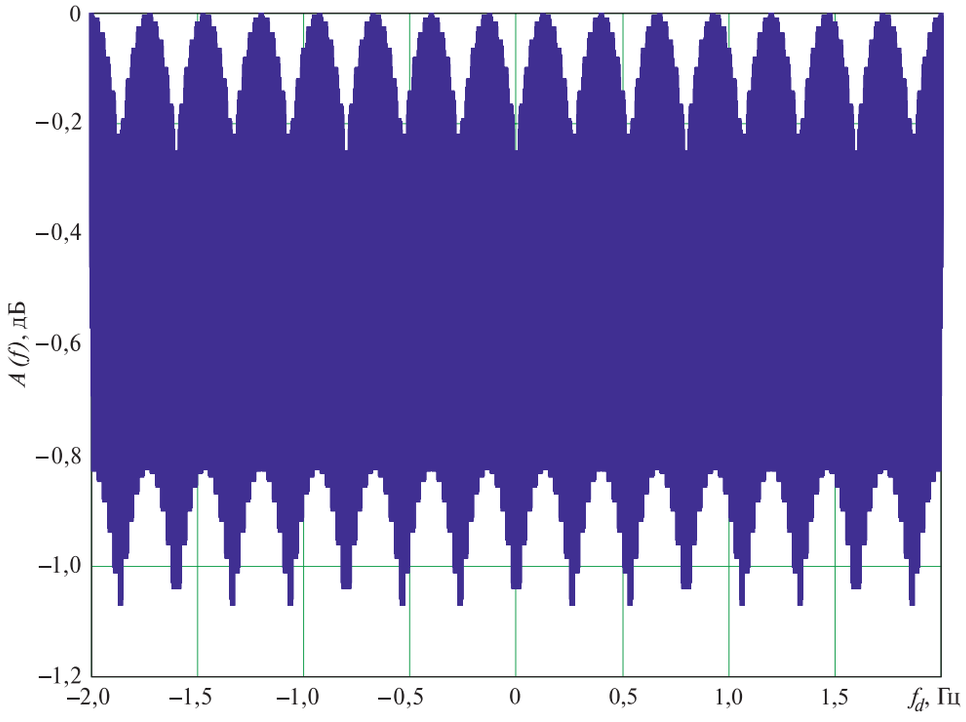


Рис. 7. АЧХ обработки в МСФ с КН при $N_k = 16$, $N = 8$, $N_{kp} = 16$

$$A(f) = \max_{(k)} \left| \frac{\sin\left(\pi(f - f_k)T_i\right)}{\pi(f - f_k)T_i} \right| \times \times \max_{(n)} \left| \frac{\sin\left(\pi N(f - f_{pn})T_p\right)}{N \sin\left(\pi(f - f_{pn})T_p\right)_i} \right|. \quad (12)$$

Здесь $f_{pn} = 0 : \frac{1}{2NT_p} : \frac{1}{T_p} - \frac{1}{2NT_p}$ – центральные частоты доплеровских фильтров при их удвоенном количестве.

Расчетная АЧХ для 8-импульсной пачки и $N_k = 16$, числом доплеровских каналов в когерентном накопителе (КН) пачки $N_{kp} = 16$ показана на рис. 7. Максимумы АЧХ следуют с частотой $\frac{2f_{dm}}{N_k - 1} = 2666{,}7$ Гц, соответствующей шагу настройки каналов МСФ. Фрагмент АЧХ показан на рис. 8, из которого видны чередующиеся с частотой $\frac{1}{2T_p N_{kp}} = 31{,}25$ Гц (период повторения импульсов пачки $T_p = 1$ мс) максимумы и минимумы АЧХ, связанные с частотами настройки каналов КН. Провалы АЧХ составили до ~1 дБ.

Методы обработки сигналов с ПШМ фазы в условиях узкополосных и пассивных помех

Системы обнаружения ШПС, в частности сигналов с ПШМ, могут подвергаться воздействию различных узкополосных импульсных помех с шумовым заполнением (УИП), по разным причинам оставшимся неподавленными на этапе пространственной обработки сигналов. УИП задается следующими параметрами:

P_{ui} – мощность относительно шума;

τ_{ui} – длительность и полоса частот Δf_{ui}.

Временно́е положение и положение на оси частот УИП считаются случайными или неизвестными величинами.

Сигнал с ПШМ в смеси с аддитивным шумом и УИП считаем представленными в виде отсчетов комплексной огибающей $X_1, X_2, \ldots, X_N$. Для устойчивого обнаружения сигналов с ПШМ в условиях УИП используем метод обобщенной медианной фильтрации (ОМФ), предложенный в работе [5]. Этапы обработки сигналов на входе СФ будут изложены далее.

1. Обработка в ОМФ1:

$$Z_i = |X_i|, \; e^{j\varphi_i} = \frac{X_i}{Z_i}, \quad Z_{im} = \begin{cases} Z_i, Z_i \le C_m Z^{(N/2+1)}; \\ Z^{(N/2+1)}, Z_i > C_m Z^{(N/2+1)}. \end{cases} \quad (13)$$

Порог C_m определялся в ходе моделирования алгоритма и соответствовал вероятности ложного срабатывания медианного огра-

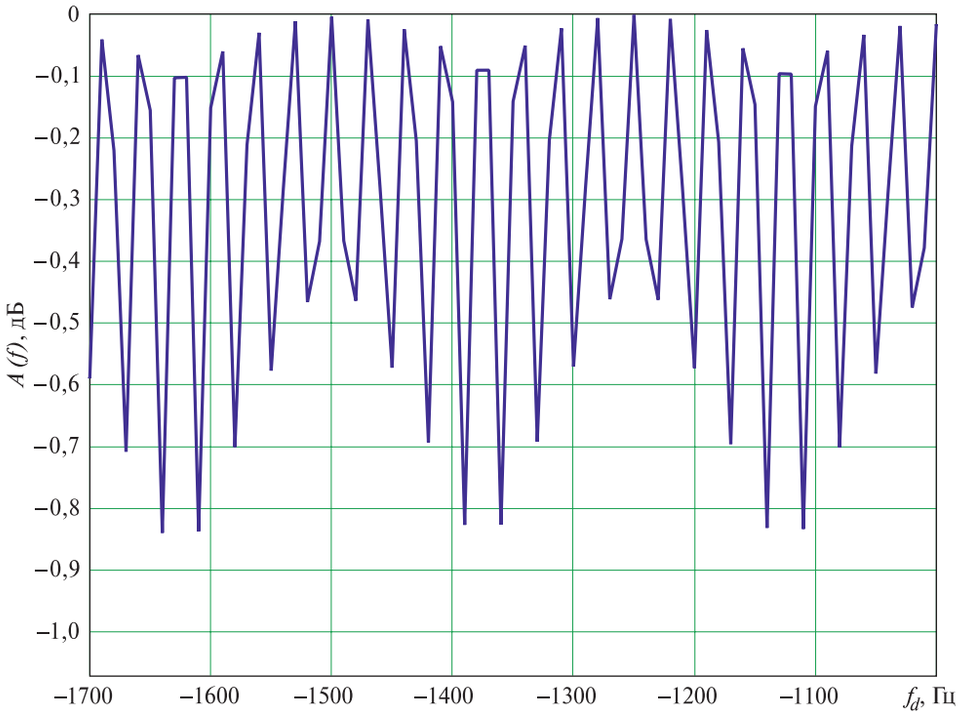


Рис. 8. АЧХ обработки в МСФ с КН (фрагмент) при $N_k = 16$, $N = 8$, $N_{kp} = 16$

ничителя (13) в условиях однородного шума $P_{fm} \approx \frac{1}{B} = 10^{-4}$. Результат обработки:

$$X_{im} = Z_{im} e^{j\varphi_i}. \qquad (14)$$

2. ДПФ отсчетов X_{im}. В результате получены спектральные отсчеты Y_i.

3. Обработка в ОМФ2:

$$U_i = |Y_i|, e^{j\psi_i} = \frac{Y_i}{U_i},$$
$$U_{im} = \begin{cases} U_i, U_i \le C_m U^{(N/2+1)}; \\ U^{(N/2+1)}, U_i > C_m U^{(N/2+1)}. \end{cases} \qquad (15)$$

Результат обработки:

$$Y_{im} = U_{im} e^{j\psi_i}. \qquad (16)$$

4. ОДПФ отсчетов Y_{im}. В результате определена временная последовательность X_{imm}.

Расчеты проводились для сигналов с ПШМ в полосе $W = 100$ МГц, длительность импульса $T_i = 100$ мкс, дискретизация по Найквисту. Коэффициенты поражения УИП рассчитывались по формулам:

$$K_t = \frac{\tau_{ui}}{T_i}, \qquad K_f = \frac{\Delta f_{ui}}{W}.$$

Были получены значения 0,1; 0,2; 0,4. Мощность УИП $P_{ui} = 0 \ldots 40$ дБ. Пример расчета зависимостей пороговых сигналов P_c от мощности УИП показан на рис. 9.

Для РЛС обзора очевидно важной характеристикой является степень подавления пассивных помех (ПП). Пусть зондирующий сигнал является когерентной пачкой из N импульсов с произвольными и меняющимися от периода к периоду пачки законами ПШМ:

$$S = \left\{ e^{j\varphi_{k,n}} \right\}; \quad k = \overline{1,N}; \quad n = \overline{1,N_i},$$

где N_i – число отсчетов на базе сигнала с ПШМ.

Рассмотрим точечный отражатель ПП, который движется с некоторой скоростью V_c, приводящей к доплеровскому смещению частоты f_c. Для упрощения рассмотрим вначале пачку из 2 импульсов. Отраженный сигнал можно записать в следующем виде:

$$X_s = \begin{cases} \sqrt{\sigma_1} e^{j\psi_1} \left\{ e^{j\varphi_{1n} + j2\pi(n-1) f_c \tau_d} \right\}_{n=1}^{N_i}; \\ \sqrt{\sigma_2} e^{j\psi_1 + j2\pi f_c T_p} \left\{ e^{j\varphi_{2n} + j2\pi(n-1) f_c \tau_d} \right\}_{n=1}^{N_i}. \end{cases} \qquad (17)$$

Здесь ψ_1 – начальная фаза;

τ_d – интервал дискретизации;

σ_i – мгновенная ЭПР объекта в i-м импульсе.

Корреляции значений ЭПР в первом и втором периодах определяется так:

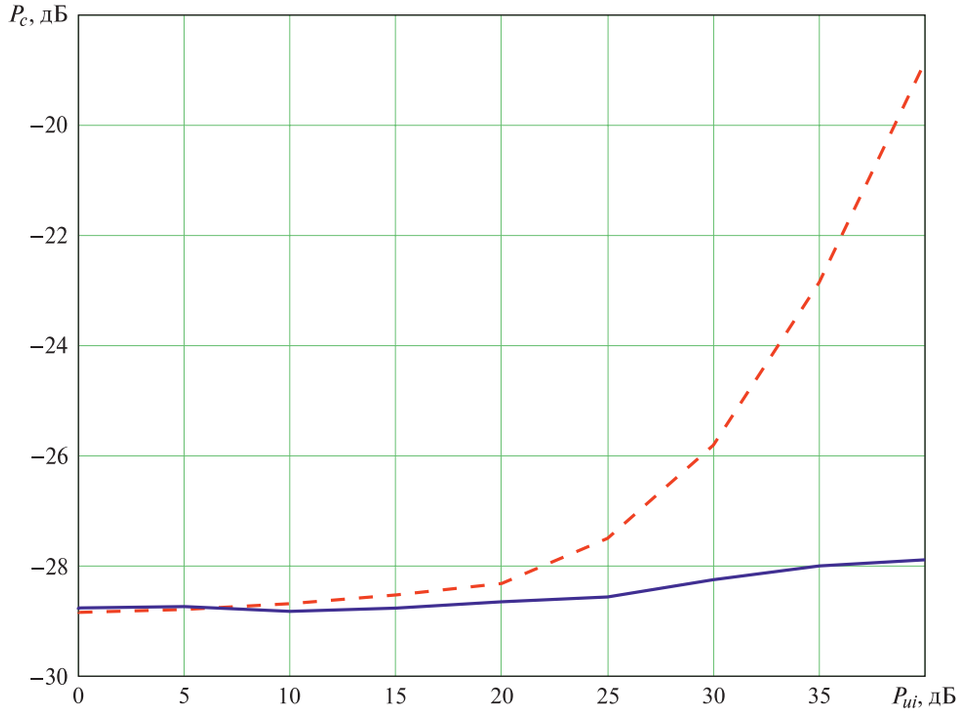


Рис. 9. Зависимости пороговых сигналов от мощности УИП для систем с СФ и ОМФ + СФ при $K_t = 0{,}1$; $K_f = 0{,}1$:
– – – – СФ; ——— ОМФ + СФ

$$\overline{\sigma_1\sigma_2} = \bar{\sigma}\rho,$$

где ρ – модуль межпериодного коэффициента корреляции ПП.

Заметим, что на длительности импульса, допустим 100 мкс, коэффициент корреляции сигнала ПП при ширине спектра ~50 Гц составляет 0,9999, что позволяет не учитывать флюктуации амплитуды сигнала ПП за время импульса.

На выходе СФ, перестраиваемого в соответствии с законом ПШМ в данном периоде пачки, после завершения переходного процесса имеем:

$$Y_s = \begin{cases} \sqrt{\sigma_1} e^{j\psi_1} \sum\limits_{n=1}^{N_i} e^{j2\pi(n-1)f_c\tau_d}; \\ \sqrt{\sigma_2} e^{j(\psi_1+2\pi f_c T_p)} \sum\limits_{n=1}^{N_i} e^{j2\pi(n-1)f_c\tau_d}. \end{cases} \quad (18)$$

С точностью до начальной фазы (18) можно записать в следующем виде:

$$Y_s = \begin{cases} \sqrt{\sigma_1}\rho_s(0, f_c); \\ \sqrt{\sigma_2}\rho_s(0, f_c) e^{j2\pi f_c T_p}. \end{cases} \quad (19)$$

Здесь $\rho_s(0, f_c)$ – ФН сигнала с ПШМ в точке с координатами $(0, f_c)$.

При $f_c = 1$ кГц значение $\rho_s(0, f_c) = 0{,}9837$. Влияние этого множителя сводится к уменьшению на приблизительно 0,14 дБ амплитуды сигнала, отраженного от точечной ПП, на выходе СФ. Из формулы (19) следует, что сигналы на выходе СФ имеют корреляционную матрицу с практически теми же параметрами, что и при излучении, например, пачки ЛЧМ сигналов с одинаковым законом модуляции. Следовательно, эффективность чересперiодной компенсации пассивных точек будет примерно такой же.

Аналогичным образом, рассмотрев ПП в N-импульсной пачке, получим выражение для сигнала, принятого в k-м периоде:

$$Y_s(k) = \sqrt{\sigma_k} e^{j\psi}\rho_s(0, f_c) e^{j2\pi f_c(k-1)T_p}, \quad (20)$$

где $k = \overline{1, N}$;

$\overline{\sqrt{\sigma_k\sigma_m}} = P_c\rho_{k,m}$;

P_c – мощность ПП;

$\rho_{k,m}$ – модуль коэффициента корреляции ПП в k-м и m-м периодах пачки.

Очевидно, что при неизвестных параметрах ПП P_c, $\rho_{k,m}$, f_c в данном случае можно использовать адаптивные методы режекции ПП, разработанные для узкополосных сигналов, например полученные в работе [6].

Для многоканальной обработки в МСФ с каналами, настроенными на разную частоту Доплера f_m, получаем вместо (20) выражение

$$Y_s(k) = \sqrt{\sigma_k} e^{j\psi} \rho_s(0, f_c - f_m) e^{j2\pi f_c (k-1) T_p}. \quad (21)$$

В зависимости от расстройки $\Delta f = f_c - f_m$ амплитуда сигнала ПП будет падать (см. таблицу).

Зависимость амплитуды сигнала ПП от расстройки частоты

Δf, кГц	ΔU, дБ
5	– 3,92
10	– ∞
15	– 13,46
20	– ∞

При расстройках, кратных $\frac{1}{T_i}$, сигнал ПП попадает в нули ФН по оси частот. Более точный расчет мощности ПП на выходах каналов МСФ можно сделать по формуле для коэффициента передачи m-го канала МСФ по мощности:

$$K_p(m) = 1 + \frac{2}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i - 1} (N_i - k) \rho(k) \cos\left(2\pi k \tau_d (f_c - f_m)\right). \quad (22)$$

При этом модуль коэффициента корреляции можно рассчитать, например, для дробно-рационального спектра ПП [5] следующим образом:

$$\rho(k) = \frac{P_c}{1 + P_c} e^{-h_1 k \tau_d} \sin\left(\frac{\pi}{4} + h_1 k \tau_d\right), \quad h_1 = \frac{\pi \sigma_f}{\sqrt{2}}. \quad (23)$$

Пример расчета по данным формулам зависимостей коэффициента передачи по мощности от частоты канала МСФ показан на рис. 10, а. Однако полученный результат соответствует только точечной ПП. Если ПП протяженная и однородная, то вместо формулы (22) получим:

$$K_p(m) = N_i + \frac{2}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i - 1} (N_i - k) \rho(k) \cos\left(2\pi k \tau_d (f_c - f_m)\right). \quad (24)$$

В данном случае мощность ПП во всех каналах МСФ практически одинаковая (рис. 10, б). Вывод (24) получается следующим образом. Для смещенного по дальности на Δ отсчетов одного источника ПП сигнал на выходе СФ:

$$U_\Delta = \frac{1}{\sqrt{N_i}} \sum_{i=1}^{N_i - \Delta} x_i s_i^*; \quad (25)$$

$$\overline{|U_\Delta|^2} = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i - \Delta} \sum_{k=1}^{N_i - \Delta} \overline{x_i x_k^* s_i^* s_k} = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i - \Delta} \sum_{k=1}^{N_i - \Delta} \overline{\rho_{ik} e^{j(\varphi_{i+\Delta} - \varphi_{k+\Delta} - \varphi_i + \varphi_k)}} = \frac{N_i - \Delta}{N_i}. \quad (26)$$

Суммарный коэффициент передачи при воздействии помех от всех смещенных по дальности источников составляет

$$K_{p\Delta} = 2 \sum_{\Delta=1}^{N_i - 1} \frac{N_i - \Delta}{N_i} = N_i - 1. \quad (27)$$

В результате суммирования (27) и (22) получаем запись (24).

Таким образом, на выходах настроенных на частоты Доплера цели каналов МСФ, перестраиваемого в соответствии с законом ПШМ в каждом периоде пачки, были получены в N периодах пачки сигналы ПП с теми же коэффициентами межпериодной ковариации, что и при излучении пачки узкополосных импульсов с одинаковым законом ЛЧМ. Для точечной по дальности ПП мощность помехи в каналах МСФ, настроенных на отличную от ПП частоту Доплера, заметно снижается благодаря кнопочной форме ФН сигналов с ПШМ. Если ПП распределена по дальности, ее мощность практически одинакова во всех каналах МСФ. Подключая на выходы каналов МСФ фильтр режекции сигналов ПП с фиксированными или адаптивными к корреляционным характеристикам ПП коэффициентами, можно получить такую же или даже бóльшую (для точечных ПП), чем в традиционном способе с излучением когерентной пачки импульсов с одинаковым законом ЛЧМ, степень подавления ПП.

Выводы

1. АКФ сигналов с ПШМ имеет средний УБЛ немногим ниже величины $\frac{1}{\sqrt{N}}$. Применение оконных функций не приводит к существенному уменьшению УБЛ. Средний уровень ВКФ сигналов с ПШМ, имеющих одинаковую базу, равен УБЛ АКФ. Вследствие этого для эффективного применения ШПС с ПШМ требуется реализация бóльших баз сигналов.

2. УБЛ сигналов на выходе СФ практически не зависит от смещения по частоте Доплера. Однако для получения достаточно низких потерь обнаружения сигналов с ПШМ в широком диапазоне доплеровских частот вследствие кнопочной формы их функции неопределенности потребуется применить многоканальный согласованный фильтр с числом каналов не менее 8–16.

3. В РЛС обзора возможно применение процедур зондирования когерентной пачкой импульсов с разными законами ПШМ в раз-

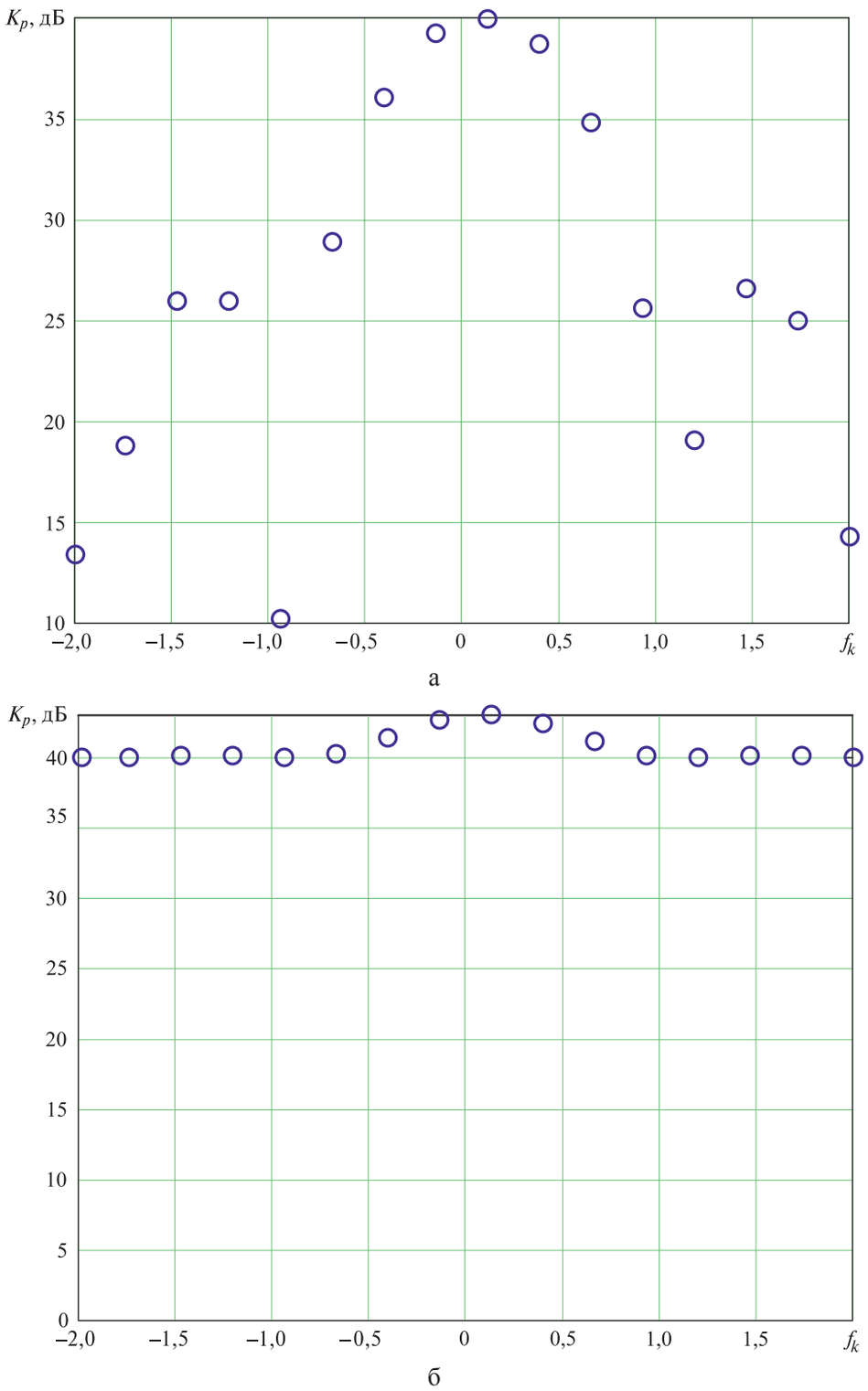


Рис. 10. Коэффициенты передачи по мощности точечной (а) и протяженной (б) ПП в каналах МСФ при $B = 10\,000$, $N_k = 16$, $f_0 = 1000$ Гц, $\sigma_f = 50$ Гц, $P_c = 40$ дБ

ных периодах пачки. Обработка сигналов в таком случае проводится в перестраиваемом под изменения закона модуляции МСФ и ДПФ с удвоенным числом каналов. При этом достигается эффективное подавление имитирующих помех до уровня ВКФ приблизительно –40 дБ.

4. Применение в РЛС обзора ШПС с ПШМ фазы, изменяемой от импульса к импульсу, делает маловероятной и неэффективной постановку имитирующих помех данной РЛС.

5. Система обнаружения ШПС с ПШМ, включающая предварительную обработку сигналов во временно́м и частотном ОМФ, обеспечивает высокую устойчивость характеристик обнаружения к параметрам УИП. Увеличение порогового сигнала составило не более 0,7…4,2 дБ. При этом пороговый сигнал в системе без предварительной обработки сигналов увеличивался в гораздо большей степени – до 9,8…35,7 дБ.

6. При зондировании угловых направлений когерентной пачкой ШПС с ПШМ, отличающейся в разных периодах пачки, при применении перестраиваемого МСФ и адаптивного режекторного фильтра ПП удается подавить ПП так же эффективно или (в случае точечной ПП) даже эффективнее, чем при традиционном способе, использующем пачку ЛЧМ импульсов с одинаковым законом модуляции.

Список литературы

1. *Иммореев И. Я.*, *Черняк В. С.* Обнаружение сверхширокополосных сигналов, отраженных от сложных целей // Радиотехника, 2008. № 4. С. 3–10.

2. *Иммореев И. Я.* Эффективная поверхность рассеяния цели при ее облучении сверхширокополосным сигналом // Успехи современной радиоэлектроники, 2009. № 1, 2. С. 95–100.

3. *Ван дер Спек.* Обнаружение пространственно распределенной цели // Зарубежная радиоэлектроника, 1972. № 9. С. 3–16.

4. *Вовшин Б. М.* Обнаружение протяженной цели на фоне шума приемника сверхширокополосной РЛС // Успехи современной радиоэлектроники, 2009. № 1, 2. С. 101–106.

5. *Лозовский И. Ф.* Цифровая обработка сигналов в РЛС обзора. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 270 с.

6. *Бакулев П. А.*, *Степин В. М.* Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.

Поступила 01.10.19

Лозовский Игорь Филиппович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-тематического сектора АО «НПО НИИИП-НЗиК», г. Новосибирск.
Область научных интересов: радиолокация, цифровая обработка сигналов.

The use of pseudonoise phase modulation broadband signals in radar surveys

The paper focuses on the problems of the use of pseudonoise phase modulation broadband signals in the radar survey. The average correlation characteristics of these signals in the Doppler frequency range and the structure of the processing system, including a multi-channel frequency matched filter, are determined. Methods of protecting the signal detection systems from the effects of narrow-band impulse and passive interference are proposed.

Keywords: broadband signal, pseudonoise phase modulation, correlation function, matched filter, narrow-band impulse interference, median filter, radar survey.

Lozovskiy Igor Filippovich – Doctor of Engineering Sciences, senior researcher, Head of the Scientific and Thematic Sector, Scientific and Research Institute of Measurement Instrumentation – Novosibirsk Plant named after the Komintern, Joint Stock Company, Novosibirsk.
Science research interests: radar, digital signal processing.

УДК 62-551.454

Г. Д. Бабошкин, П. А. Ушаков

Моделирование системы управления дробного порядка с высокоинерционным объектом управления на примере системы стабилизации антенно-поворотного устройства

Рассмотрена проблема достижения высокого качества управления системы с объектом, имеющим высокую инерционную составляющую. Моделирование системы стабилизации с классическим пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регулятором (ПИД-регулятором) показало, что при использовании такого регулятора не удается достичь требуемого качества управления ввиду большого времени установления переходного процесса при требуемом перерегулировании. Выдвинута гипотеза, что с помощью ПИД-регулятора дробного порядка (ФПИД-регулятора) можно решить указанную проблему. Проведено математическое моделирование системы с ФПИД-регулятором. Выявлено, что ФПИД-регулятор позволяет значительно уменьшить время установления переходного процесса исследуемой системы. Дано описание элементов с фрактальным импедансом на основе резистивно-емкостной среды, представлено описание их модели. Подтверждена адекватность математической модели с помощью схемотехнической модели в программе *LTSpice* с использованием выбранной модели. Сделаны выводы о целесообразности и необходимости проведения исследований в области проектирования и изготовления ФПИД-регулятора и элементов с фрактальным импедансом.

Ключевые слова: ПИД-регулятор дробного порядка, элемент с фрактальным импедансом, системы автоматического управления, качество управления.

Введение

В бóльшей части отраслей промышленности пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (далее – ПИД-регуляторы) для управления процессами использовались в течение нескольких десятилетий. Причина их популярности заключается в простоте схемотехнического исполнения и наличии динамических характеристик, обеспечивающих низкий процент перерегулирования и малое время установления инерционных объектов [1].

В то же время растет число исследований, связанных с проектированием и применением во многих областях науки и техники, ПИД-регуляторов дробного порядка (ФПИД-регуляторов) [2–5]. Особенностью такого регулятора заключается в том, что кроме классических коэффициентов управления K_p, K_d, K_i в уравнении передаточной функции контроллера появляются параметры, определяющие порядок интегрирования λ и дифференцирование δ ФПИД-регулятора.

Использование ФПИД-регулятора позволяет достичь преимуществ системы автоматического управления [6], среди которых:

• отсутствие или низкая вероятность статической ошибки системы;

• высокий запас по фазе и амплитуде системы управления;

• высокая помехоустойчивость системы;

• устойчивость к внешним возмущениям объекта управления;

• высокая чувствительность к сигналу ошибки системы благодаря увеличенному числу параметров настройки (K_p, K_i, K_d, λ, δ).

Однако в отечественной научной литературе недостаточно полно освещены вопросы применения и проектирования ФПИД-регуляторов. Отметим работы, посвященные исследованиям, цель которых – увеличение чувствительности работы ПИД-регулятора за счет реализации дробного дифференцирования и интегрирования, такие как ПИД-регулятор с добавочными И- и Д-звеньями [2], ЛИД-регулятор [3] и ПИД-регулятор дробного порядка, реализованный на дискретных элементах [4, 5]. Это связано с тем, что теория дробных исчислений пока не получила широкого распространения в инженерной среде: отсутствуют достаточно универсальные методики проектирования ФПИД-регуляторов и элементная база, позволяющая выполнять операции дробного аналогового дифференцирования и интегрирования без усложнения схемотехнического исполнения регулятора.

Целями данной статьи являются моделирование системы управления объектом с

© Бабошкин Г. Д., Ушаков П. А., 2019

высокой инерцией при использовании классического ПИД-регулятора и ФПИД-регулятора, а также сравнение достигнутых показателей управления этих систем и демонстрация возможности построения ФПИД-регуляторов на основе новых пассивных *RC*-элементов, обладающих фрактальным (дробным) импедансом.

Статья построена следующим образом. Сначала определено выражение для передаточной функции объекта управления. Затем описан процесс оптимизации коэффициентов управления классического ПИД-регулятора и произведена оценка характеристик модели системы. В следующем разделе выполнена оптимальная настройка ФПИД-регулятора и представлен сравнительный анализ характеристик системы автоматического управления (САУ) с ФПИД-регулятором и классическим ПИД-регулятором. Далее дано понятие об *RC*-элементах с фрактальным импедансом, на основе которых можно выполнять операции интегрирования и дифференцирования дробного порядка. В заключительном разделе проведено схемотехническое моделирование САУ с ФПИД-регулятором, построенным с использованием схемотехнических моделей фрактальных элементов.

Передаточная функция высокоинерционного объекта управления

Представим объект управления в виде синхронной машины с маховиком, создающим высокий маховый момент на вал двигателя. Классическое выражение для передаточной функции двигателя в комплексно-частотной области определяется выражением

$$W(p)=\frac{K}{T_э T_j s^2+T_j s+1}, \qquad (1)$$

где K – коэффициент передачи двигателя;

$T_э$ – электромагнитная постоянная времени двигателя (с);

T_j – электромеханическая постоянная времени (с) [6];

s – комплексная частота в области Лапласа.

Электромеханическая (инерционная) постоянная определяет время нарастания кривой разгона двигателя до ее асимптоты. Значит, если K – коэффициент передачи по скорости двигателя (рад/с), то T_j – время разгона двигателя до его максимальной скорости. Для наглядности примем электромеханическую составляющую с бóльшим значением, например $T_j = 2137{,}2$ с. Такую инерционную составляющую может обеспечить маховик массой 6,5 т на валу диаметром 0,2 м. Маховый момент равен 0,263 т · м^2 согласно [7] .

Электромагнитная постоянная двигателя определяет время нарастания тока якоря до установившегося значения и определяется по формуле

$$T_м=\frac{L_я}{R_я}=\beta\frac{U_я}{2\pi f_{ном} I_я}\frac{1}{R_я}=\frac{\beta}{2\pi f_{ном}}=1{,}19\cdot10^{-4}\ \text{с},$$

где $L_я$ – индуктивность якорной обмотки электромотора;

$R_я$ – сопротивление якорной обмотки;

β – коэффициент пропорциональности, согласно приближенной формуле Уманского [7], для расчета двигателя с компенсацией β = 0,3;

$U_я$ – рабочее напряжение якорной обмотки электромотора;

$I_я$ – ток якорной обмотки электромотора;

$f_{ном} = 400$ Гц – рабочая частота двигателя.

Пусть максимальная скорость вращения двигателя равна 2980 об/мин (312 рад/с). Примем допущение, что коэффициентом передачи объекта управления системы является максимальная скорость вращения двигателя при появлении на его входе условной единичной величины входного возмущения. Этим возмущением может являться напряжение управления, частота или разность фаз напряжений на обмотках статора двигателя в зависимости от реализации способа управления, который в данной статье не рассматривается.

Таким образом, условная передаточная функция двигателя с высокой инерцией по скорости определим выражением

$$W(p)=\frac{K}{T_э T_j s^2+T_j s+1}=\frac{312}{0{,}255s^2+2137{,}2s+1}. \qquad (2)$$

Построим кривую разгона объекта управления (рис. 1).

Для принятой передаточной функции объекта управления промоделируем системы с классическим ПИД-регулятором и ФПИД-регулятором. В качестве основных критериев управления примем перерегулирование не более 10 % и запас по фазе не менее 50°, про-

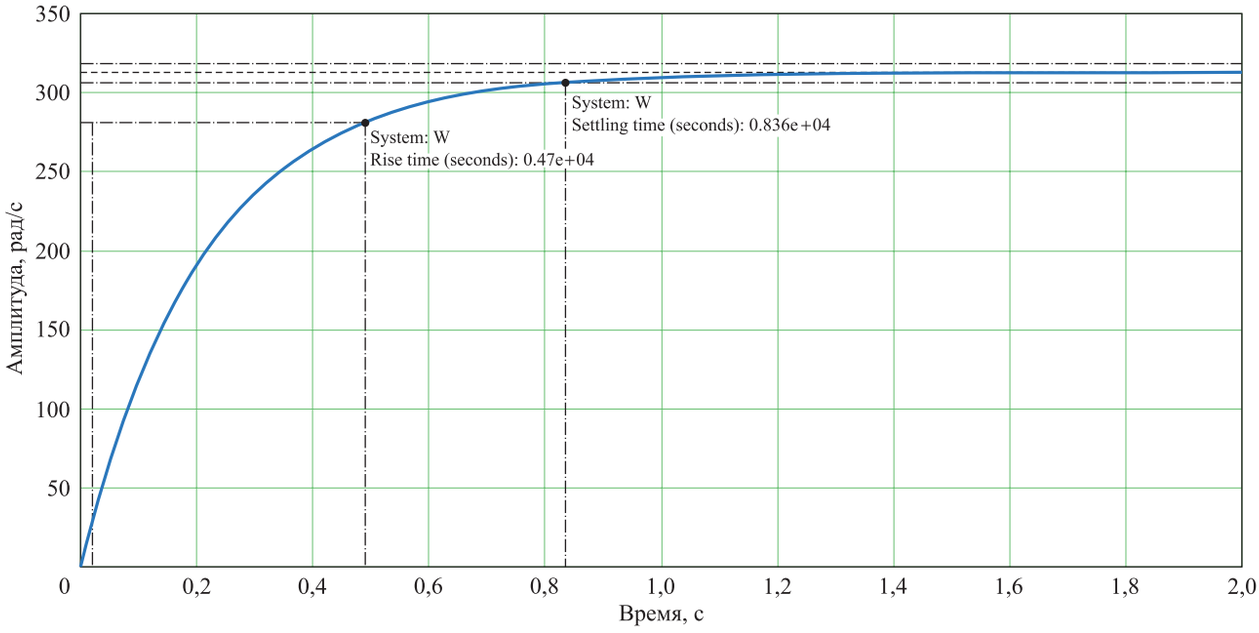


Рис. 1. Кривая разгона объекта управления

ведем сравнительную оценку остальных параметров переходной функции и частотные характеристики.

Суть процесса моделирования ФПИД-регулятора, как и для классической цепи, заключается в проверке рассчитанных коэффициентов регуляторов на модели, наиболее полно отражающей поведение объекта. Расчет коэффициентов осуществлялся с помощью имеющихся программных средств, исходными данными для которых является передаточная функция объекта управления системы, ее необходимо было получить в первую очередь.

Оптимизация коэффициентов классического ПИД-регулятора

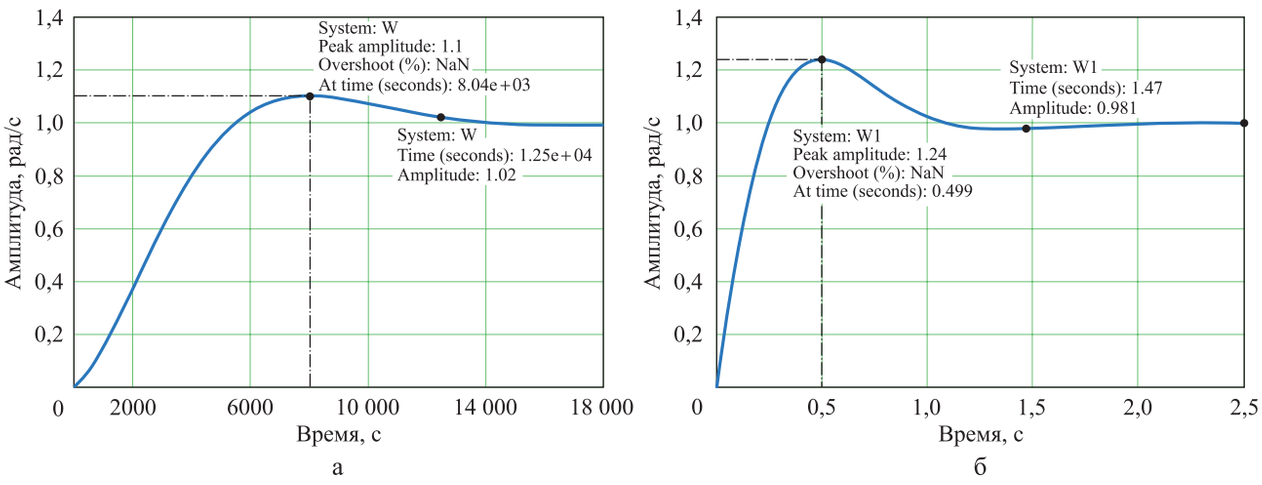
Для расчета коэффициентов классического ПИД-регулятора был использован встроенный оптимизатор коэффициентов управления *PIDTuning* в программе *MATLAB R20120b*. Он позволяет настроить коэффициенты регулирования по требуемым характеристикам АЧХ системы и ее временны́м характеристикам. В качестве исходных данных оптимизатору необходима передаточная функция объекта управления, заданная функцией *tf* (передаточная функция) в программе *MATLAB*.

Оптимизатор предлагает на выбор две схемы ПИД-регулятора: классическую (звенья регулятора включены параллельно) схему регулятора и последовательную (пропорциональное звено влияет на коэффициент передачи И- и Д-звена). На данный момент существует только параллельная реализация ФПИД-регулятора, поэтому для более достоверной оценки результатов моделирования для классического ПИД-регулятора выберем параллельную схему.

При настройке ПИД-регулятора выявлено, что САУ с требуемым перерегулированием имеет большое время установления переходного процесса, а при уменьшении времени установления САУ значение перерегулирования растет. Переходные характеристики полученных моделей САУ представлены на рис. 2, сравнительные характеристики САУ приведены в таблице.

Характеристики полученных моделей САУ

K_i	K_p	Полоса пропускания, Гц	Частотный коэффициент колебательности	Перерегулирование, %	Время установления, с	Запас по фазе
$1{,}454 \cdot 10^{-6}$	0,00050	0,0005	1,05	9,99	12 500	60°
109,2094	33,5301	0,9000	1,32	24,3	1,47	60°



а б

Рис. 2. Переходные характеристики САУ с классическим ПИД-регулятором:
а – перерегулирование 10 %; б – перерегулирование 24 %

В обоих случаях $K_d = 0$, а полученные коэффициенты для системы без перерегулирования очень малы и, вероятно, технически не реализуемы. Для выбранного объекта управления очевидна проблема: применение классического ПИД-регулятора не позволяет одновременно уменьшить перерегулирование системы и время установления ее переходного процесса.

Теперь рассмотрим процесс моделирования САУ с ФПИД-регулятором.

Оптимизация коэффициентов ФПИД-регулятора

Для расчета коэффициентов ФПИД-регулятора использована программа оптимизации на базе генетического алгоритма, реализованная в программе *MATLAB* по принципу, описанному в работе [8]. Внешний вид окна программы показан на рис. 3.

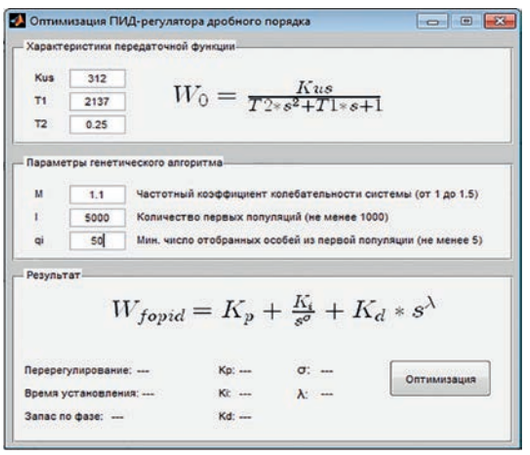


Рис. 3. Внешний вид окна программы оптимизации коэффициентов ПИД-регулятора

Исходными данными в программе служат коэффициенты передаточной функции объекта управления из уравнения вида (1). В качестве критерия оптимальности пользователь самостоятельно задает частотный коэффициент колебательности (ЧКК), характеризующий перерегулирование переходного процесса. Точность оптимизации настраивается за счет задания количества первых популяций генетического алгоритма и минимального числа отобранных особей в результате первой селекции.

Для уменьшения времени установления переходного процесса в программе вычисляется интегральное квадратичное отклонение САУ, используемое в качестве еще одного критерия оптимальности. Таким образом, оптимальными принимаются коэффициенты ФПИД-регулятора, при которых интегральное квадратичное отклонение сводится к минимуму, а ЧКК – к требуемому значению. Обоснование выбора критериев оптимизации коэффициентов и решения, принятые для реализации данного программного обеспечения, представлены в работе [9].

В качестве результатов программа выдает коэффициенты управления ФПИД-регулятора, характеристики качества управления: перерегулирование, запас по фазе, время установления переходного процесса, а также строит графики переходной характеристики, диаграммы Боде открытого и закрытого контуров САУ, годографа САУ для более точного анализа характеристик управления.

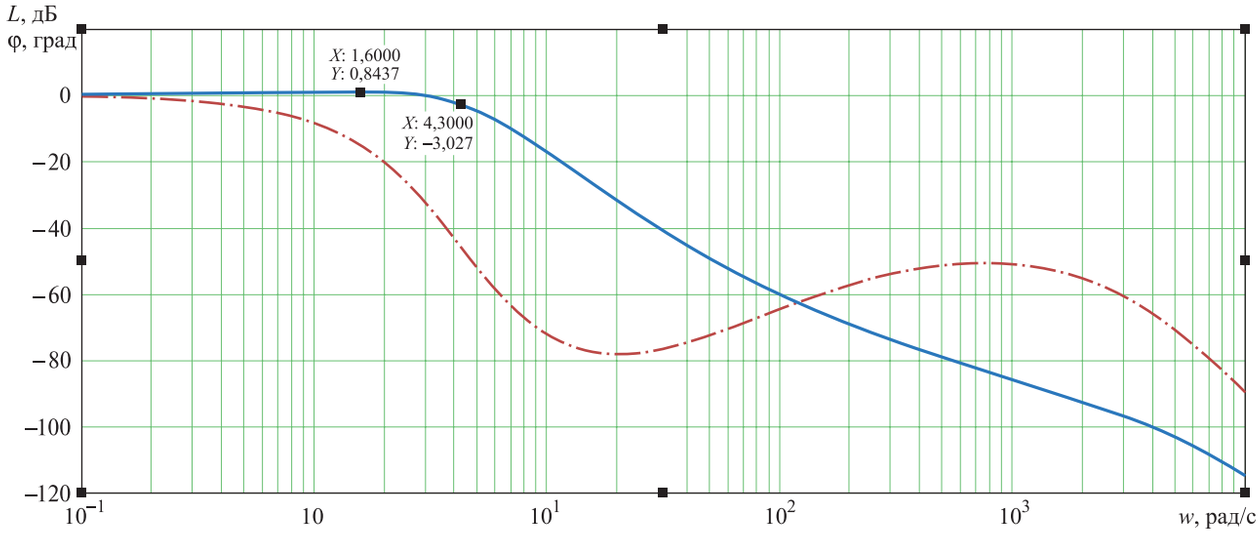


Рис. 4. ЧХ САУ с ФПИД-регулятором: ЛЧХ – логарифмическая частотная характеристика; *A* – амплитуда; φ – фазовый поворот; *w* – радиальная частота

Результирующие ЧХ замкнутой САУ исследуемым объектом управления изображены на рис. 4, а ее переходная характеристика – на рис. 5.

Ниже приведены результаты оптимизации.

Коэффициенты	Порядки
p-звеньев K_p…3,706	
i-звеньев K_i…..41,56	σ….0,238
d-звеньев K_d....1,738	λ….0,570
Полоса пропускания, Гц..... 0,680	
ЧКК..... 1,100	
Перерегулирование, %..... 6,700	
Время установления переходного процесса, с 4,575	
Запас по фазе .....77°	

Полученная математическая модель САУ полностью удовлетворяет заданным требованиям. Очевидно, что при требуемом перерегулировании ФПИД-регулятор позволяет обеспечить переходный процесс САУ меньшим временем установления, чем классический ПИД-регулятор.

Для того чтобы убедиться в правильности полученных результатов, необходимо построить схемотехническую модель САУ и сравнить результаты.

Элементы с фрактальным импедансом и их схемотехнические модели для моделирования АСУ с ФПИД-регулятором

Элементы с фрактальным импедансом (ЭФИ) – это пассивные двухполюсники, импеданс которых определяется выражением [10]:

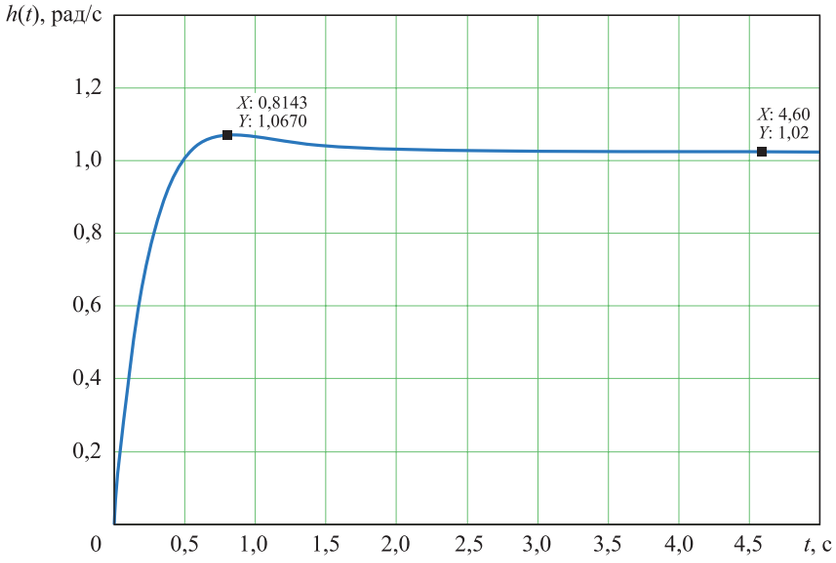


Рис. 5. Переходная характеристика САУ с ФПИД-регулятором

$$\dot{Z}(p) \cong F_0 p^{\alpha}, \qquad (3)$$

где $p = \sigma + j\omega$ – комплексная частота;

$F_0 = \text{const}$ для $\omega_1 < \omega < \omega_2$;

$0 \le |\alpha| \le 1$.

При вещественном значении показателя α ЭФИ характеризуются компонентным уравнением:

$$i_{C_\alpha} = C_\alpha \frac{d^\alpha u_{C_\alpha}}{dt^\alpha},$$

где C_α – коэффициент пропорциональности, подобный коэффициенту пропорциональности C в компонентном уравнении классического емкостного элемента.

В установившемся режиме уравнение (3) примет вид:

$$\dot{I}_{C_\alpha} = (j\omega)^\alpha C_\alpha \dot{U}_{C_\alpha}.$$

Здесь $\dot{I}$ – комплексная амплитуда тока через элемент;

ω – круговая частота;

$\dot{U}$ – комплексная амплитуда напряжения на выводах элемента.

Тогда выражение для фрактального импеданса (ФИ) можно записать так:

$$\dot{Z}_F = (1/\omega^\alpha C_\alpha) e^{-j\alpha\pi/2}.$$

В отличие от импеданса классического емкостного элемента ФИ характеризуется тремя параметрами: величинами α и C_α диапазоном частот $(\omega_1 < \omega < \omega_2)$, в котором эти величины можно считать постоянными с заданной погрешностью. Характерной особенностью ФЧХ ФИ является постоянство фазового сдвига, который в ограниченном диапазоне частот принимает значения $\varphi_c = -\alpha\pi/2$.

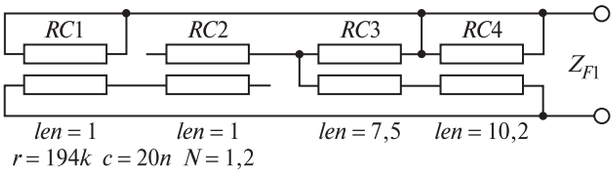
В настоящее время ЭФИ используются в схемах частотно-избирательных фильтров, генераторов, интеграторов и дифференциаторов дробного порядка, в которых параметр α является дополнительной степенью свободы, отсутствующей в схемах на обычных *R*- и *C*-элементах [11, 12]. Однако ЭФИ в этих работах выполнены в виде многозвенных *RC*-цепей Фостера или Кауэра, которые сложно в полном смысле назвать элементами, поскольку, по сути, это сборки, содержащие, как правило, десятки дискретных элементов.

В отличие от указанных ЭФИ в работе [13] предложен ЭФИ, представляющий собой двухполюсник в виде многослойной системы чередующихся резистивных и диэлектрических слоев (*R*1-*C*-*R*2), полученных стандартными методами интегральных пленочных микросхем.

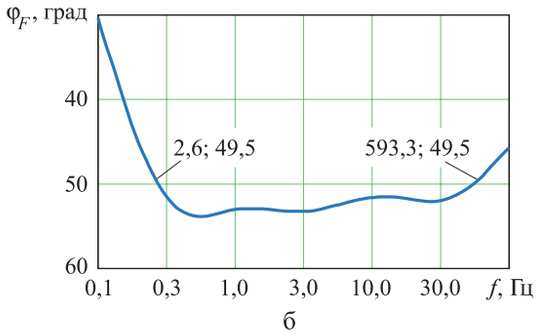
Синтез ЭФИ с требуемыми параметрами и характеристиками выполняется в специализированной программе, результатом работы которой является схема замещения двухполюсника несколькими отрезками однородных *RCNR*-линий, соединенных между собой определенным образом и имеющих определенные длины и удельные параметры слоев [14]. Для схемотехнического моделирования таких ЭФИ в программах, языком описания которых является *Spice*, каждая *RCNR*-линия представляется многозвенной (до 1024 звеньев) лестничной цепью соответствующей структуры.

Получим схемотехнические модели ЭФИ, синтезированные по требуемым значениям показателя α (величине угла постоянства фазы ФЧХ импеданса $\varphi_c = \alpha\pi/2$), допустимой неравномерности и диапазону частот, используя указанную выше программу синтеза.

Схема замещения и ФЧХ импеданса для ЭФИ с $\alpha = 0{,}238$ ($\varphi_c = 21{,}4°$), допустимой неравномерностью $\pm 1{,}5°$ в диапазоне частот не менее двух декад, приведены на рис. 6; для ЭФИ с $\alpha = 0{,}57$ ($\alpha_c = 51{,}3°$), допустимой не-



а



б

Рис. 6. Модель ЭФИ при $\alpha = 0{,}238$:
а – схема замещения; б – ФЧХ импеданса Z_{F1}; φ_F – фазовый поворот ФЭ

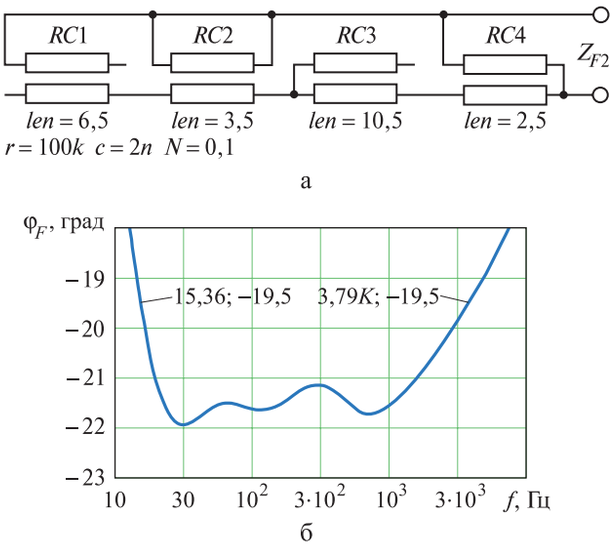


Рис. 7. Модель ЭФИ при α = 0,57:
а – схема замещения; б – ФЧХ импеданса Z_{F2}

равномерностью ±1,5° в диапазоне частот не менее двух декад, – на рис. 7.

Схемотехническая модель САУ в ФПИД-регулятором

Схема модели САУ изображена на рис. 8. Введены следующие обозначения:

*U*4 – параллельный сумматор;
*U*1 –П-звено;
*U*2 –Д-звено с ЭФИ Z_{F2} с α = 0,57;
*U*3 – И-звено с ЭФИ Z_{F1} с α = 0,238;
*U*13 – инвертор;
*E*1 – модель объекта управления Лапласа;
*V*4 – источник питания, имитирующий появление уставки (функция Хевисайд).

Настройка коэффициентов И- и Д-звеньев ФПИД-регулятора осуществлялась по методике, описанной в работе [6] для классического ПИД-регулятора и основанной на настройке собственных частот АЧХ П-, И- и Д-звеньев. Для настройки ФПИД-регулятора получены идеальные АЧХ звеньев регулятора (рис. 9, а). Далее в результате изменения номиналов резисторов *R13*, *R3*, *R4*, а также удельных параметров *r* и *c* ЭФИ проведена настройка по АЧХ схемотехнической модели ФПИД-регулятора (рис. 9, б).

Отклонения в области верхних частот вызваны ограниченным диапазоном рабочих частот используемых моделей операционных уси-

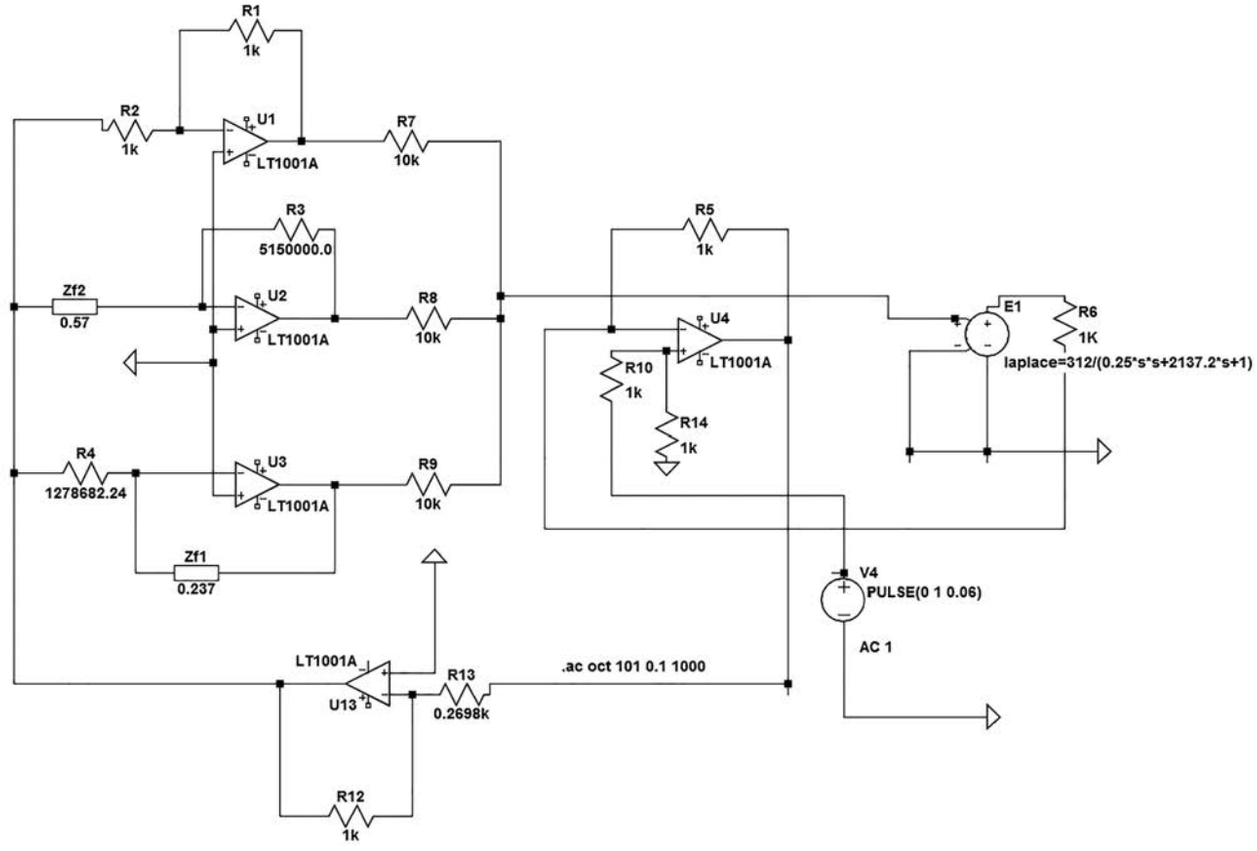


Рис. 8. Схемотехническая модель САУ с ФПИД-регулятором

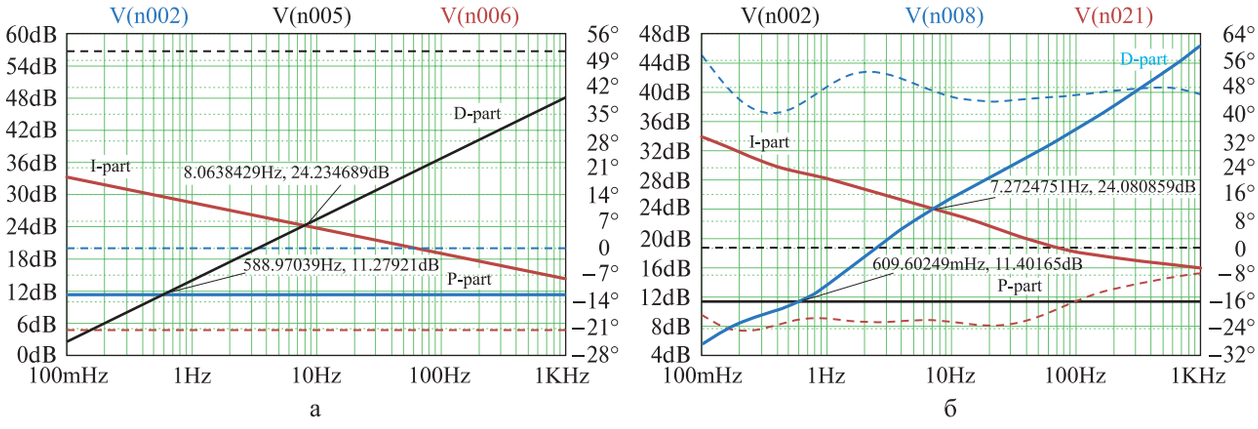


Рис. 9. ЧХ звеньев идеального (а) и реального (б) ФПИД-регулятора

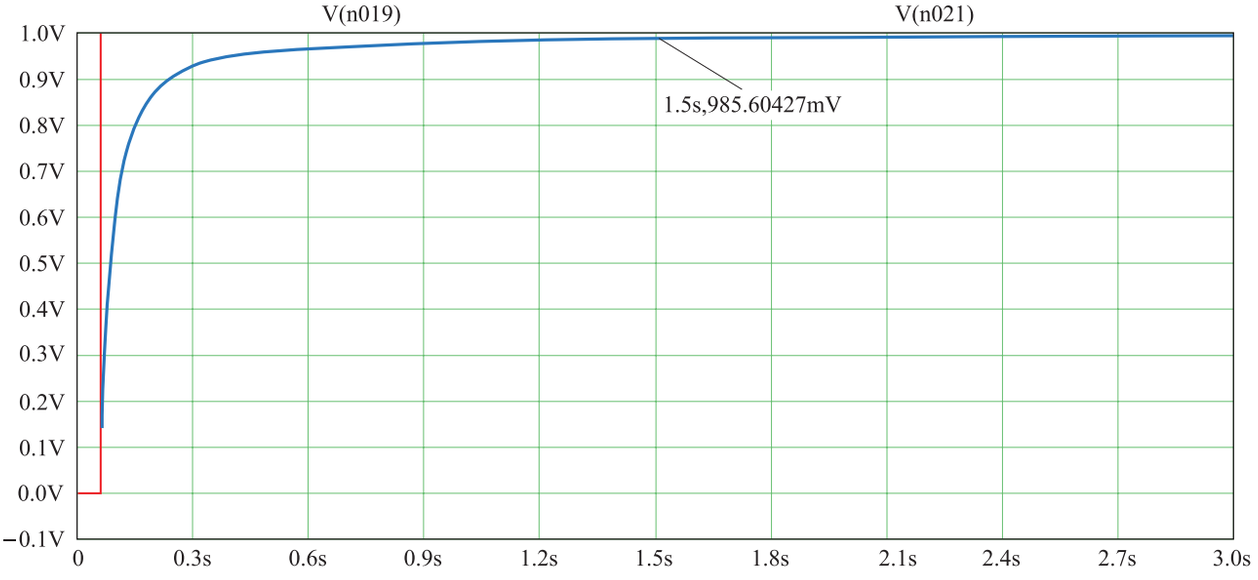


Рис. 10. Переходная характеристика САУ с ФПИД-регулятором

лителей *LT1001A*, отклонения в области нижних частот – применением схемотехнической модели ЭФИ. Общая картина поведения ФПИД-регулятора схожа с идеальной с учетом перечисленных выше причин отклонений, точки пересечений АЧХ П- и Д-, а также И- и Д-звеньев идеальной и схемотехнической модели совпадают.

Переходная характеристика настроенной модели САУ с ФПИД-регулятором представлена на рис. 10, ЧХ закрытого контура – на рис. 11, ЧХ открытого контура – на рис. 12. На рисунках ЛАЧХ – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика.

Ниже приведем характеристики модели САУ.

Полоса пропускания, Гц 0,38
ЧКК 1,05
Перерегулирование, % 6,50
Время установления, с 2,95
Запас по фазе, град 72

Выявлены несоответствия между математической моделью системы в *MATLAB* и *LTSpice*, вызванные ограниченным диапазоном рабочих частот используемых в схемотехнической модели усилителей и ЭФИ. Однако в целом форма переходного процесса совпадает, перерегулирование не превышает 10 %, что соответствует требуемым условиям. По результатам схемотехнического моделирования можно сделать вывод, что результаты оптимизации, полученные программой в разделе «Оптимизация коэффициентов ФПИД-регулятора» настоящей статьи, достоверны.

Заключение

Результаты проведенного моделирования и сравнения показателей САУ с классическим ПИД- и ФПИД-регуляторами показали, что последний позволяет улучшить качество управ-

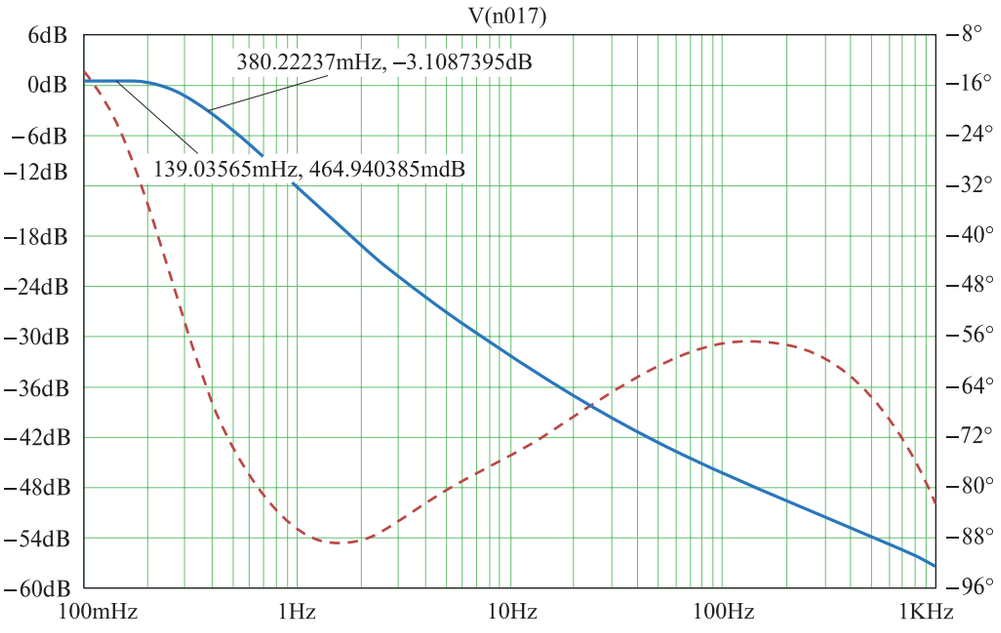


Рис. 11. ЧХ закрытого контура схемотехнической модели САУ:
——— – ЛАЧХ; - - - - – ФЧХ

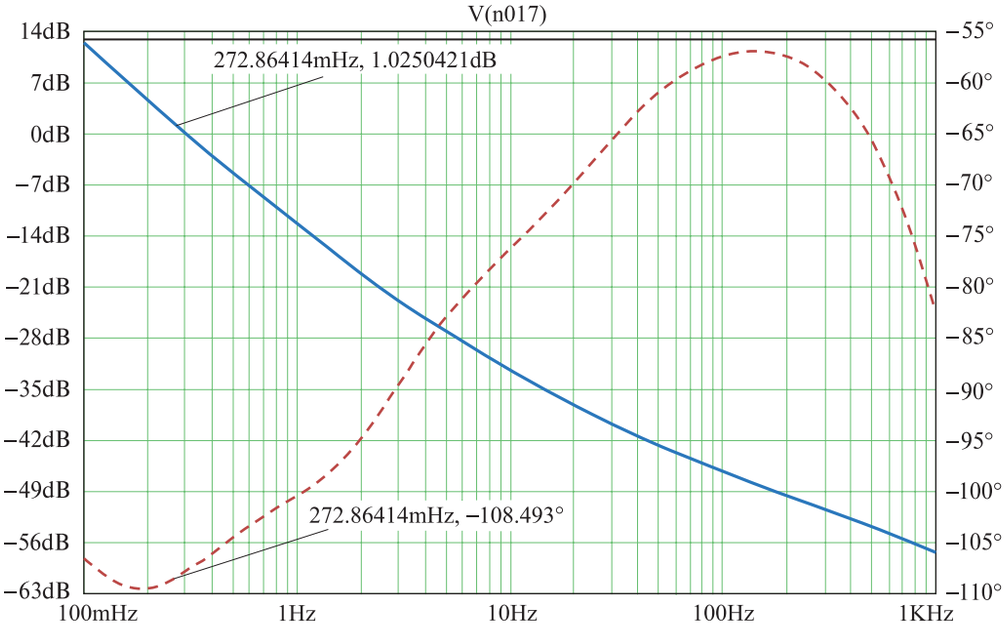


Рис. 12. ЧХ открытого контура схемотехнической модели САУ:
——— – ЛАЧХ; - - - - – ФЧХ

ления САУ объектами, обладающими высокой инерцией, по сравнению с классическим ПИД-регулятором. Это является еще одним доказательством актуальности и эффективности использования ФПИД-регуляторов в САУ. Схемотехническое моделирование САУ с ФПИД-регулятором с применением моделей, как стандартных элементов, так и модели ЭФИ продемонстрировало возможность физической реализации таких аналоговых ФПИД-регуляторов при промышленном производстве ЭФИ в виде интегральных элементов с требуемыми свойствами. Реализовать ФПИД-регулятор можно и с помощью мощных вычислительных средств с использованием целочисленных аппроксимаций дробно-рациональной функции [15, 16].

Цифровая реализация цепей отрицательной обратной связи позволяет реализовать более точные САУ, например, за счет использова-

ния корректировки коэффициентов регулирования классического ПИД-регулятора генетическим алгоритмом, нейронными сетями или нечеткой логикой (*fuzzy*-алгоритмом) [17]. Но следует отметить, что подобные методы меняют лишь собственные частоты работы звеньев ПИД-регулятора, при этом чувствительность ПИД-регулятора остается без изменений. По мнению авторов статьи, идеальным могло бы стать решение адаптации коэффициентов ФПИД-регулятора за счет перечисленных ранее алгоритмов, обеспечивающее изменяемый наклон АЧХ И- и Д-звеньев и настраиваемые их собственные частоты.

Тем не менее многочисленные положительные результаты моделирования различных АСУ дробного порядка подтверждают актуальность и целесообразность проводимых исследований, а также необходимость продолжения работ по исследованию и разработке технологии изготовления ЭФИ.

Список литературы

1. *Astrom K. J.*, *Hagglund T.* The Future of PID Control, in IF AC Workshop on Digital Control // Past. Present and Future of PID Control. Terrassa. Spain. April 2000. Pp. 19–30.

2. *Судник Ю. А.*, *Лазаренко Л. М.*, *Лазаренко М. Л.* Способ управления температурным режимом теплицы. Патент RU 2589163. Публ. 06.08.16.

3. *Lurie B. J.* Three-parameter tunable tilt-integral-derivative (TID) controller. Patent US 5371670 A, USA. 1993.

4. *Жмудь В.*, *Заворин А.* О нецелесообразности применения дробно-степенных ПИД-регуляторов // Автоматика и программная инженерия. 2013. № 2 (4). С. 6–21.

5. *Kempfle S.*, *Schaefer I.* Fractional Models of Loudspeaker Coils // Proc. Of 2nd IF AC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications (Porto, Portugal, July 19–21). Porto, 2006. Pp. 111–114.

6. *Бесекерский В. А.*, *Попов Е. П.* Теория систем автоматического управления. СПб: Профессия, 2003. 747 с.

7. *Ключев В. И.* Теория электропривода. М.: Энергия,1985. 288 с.

8. *Бабошкин Г. Д.*, *Подсизерцев М. А.*, *Бабошкина А. А.* Оптимизация параметров ПИД-регулятора дробного порядка с помощью генетического алгоритма // Сб. ст. Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, общества, производства и промышленности» (Казань, 5 мая 2018 г.). В 2 ч. Ч. 1. Уфа: АЭТЕРНА, 2018. 8–10 с.

9. *Бабошкин Г. Д.*, *Ушаков П. А.*, *Подсизерцев М. А.* Выбор критериев качества управления АСУ для автоматизированной оптимизации параметров ПИД-регулятора дробного порядка // Сб. материалов XIV Всерос. науч.-техн. конф. «Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства» (Ижевск, 12–14 дек. 2018 г.). Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. 30–37 с.

10. *Потапов А. А.*, *Гильмутдинов А. Х.*, *Ушаков П. А.* Фрактальные элементы и радиосистемы: физические аспекты / под ред. А. А. Потапова. Радиотехника, 2009. 200 с.

11. *Maundy B.*, *Elwakil A. S.*, *Freeborn T. J.* On the practical realization of higher-order filters with fractional stepping // Signal Processing. 2011. Vol. 91. Iss. 3. Pp. 484–491.

12. *Radwan A. G*, *Soliman A. M.*, *Elwakil A. S.* Design equations for fractional-order sinusoidal oscillators: Four practical circuit examples // International Journal of Circuit Theory and Applications. 2008. Vol. 36. Iss. 4. Pp. 473–492.

13. *Ushakov P. A.*, *Maksimov K. O.*, *Filippov A. V.* Research of fractal thick-film elements frequency responses // 11th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 30 June – 4 July 2010 Novosibirsk, Russia.

14. *Koton J.*, *Kubanek D.*, *Ushakov P.*, *Maksimov K.* Synthesis of fractional-order elements using the RC-EDP approach // Proc. 23 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD 2017), Catania, Italy, 2017. DOI: 10.1109/ECCTD.2017.8093314

15. *Chan C.-H.*, *Shyu J.-J*, *Yang R. H.-H.* A New Structure for the Design of Wide-band Variable Fractional Order FIR Differentiators // Signal Proc. 2010. Vol. 90. Pp. 2595–2604.

16. *Oustaloup A.* Systemes Asservis Lineaires d'Ordre Fractionnaire: Theorie et Pratique. Editions Masson, Paris. 1983. 272 p.

17. *Бураков М. В.*, *Коновалов А. С.* Синтез нечетких логических регуляторов// Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-nechetkih-logicheskih-regulyatorov (дата обращения: 25.03.2019).

Поступила 29.11.18

Бабошкин Глеб Дмитриевич – инженер-конструктор АО «ИЭМЗ «Купол», аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» ФГБОУ ВО «Ижевский государственный университет имени М. Т. Калашникова».
Область научных интересов: системный анализ, управление и обработка информации, системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Ушаков Петр Архипович – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» ФГБОУ ВО «Ижевский государственный университет имени М. Т. Калашникова».
Область научных интересов: системный анализ, управление и обработка информации, системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Modeling a fractional order control system with a high-inertia control object using the example of an antenna rotator stabilization system

The paper considers the problem of achieving high quality control of the system with an object having a high-inertia component. Modeling a stabilization system with a classical proportional-integral-differential controller (PID controller) showed that when using such a controller, it is not possible to achieve the desired control quality due to the long time needed to establish a transition process with the required overshoot. We suggested a hypothesis that using a fractional order PID controller (FPID controller) it is possible to solve this problem. We carried out mathematical modeling of the system with the FPID controller and revealed that the FPID controller can significantly reduce the time needed to establish the transition process of the system under consideration. The study describes elements with fractal impedance based on a resistive-capacitive medium, and gives a description of their model. The adequacy of the mathematical model is confirmed by means of the sheet-oriented model in the LTSpice program using the selected model. Conclusions are made about the feasibility and necessity of conducting research in the field of design and manufacture of a FPID controller and elements with fractal impedance.

Keywords: fractional-order PID controller, element with fractal impedance, automatic control systems, control quality.

Baboshkin Gleb Dmitrievich – design engineer, Izhevsk Electromechanical
Plant Kupol, Joint Stock Company, post-graduate, Department of Radio Electronics Design, Kalashnikov Izhevsk State Technical University.
Science research interests: system analysis, management and information processing, systems, networks and telecommunication devices.

Ushakov Petr Arkhipovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Radio Electronics Design, Kalashnikov Izhevsk State Technical University.
Science research interests: system analysis, management and information processing, systems, networks and telecommunication devices.

УДК 621.396.969.12

А. А. Топилин

Точность измерения азимута вторичным радиолокатором при увеличенной скорости обзора

Представлена зависимость точности измерения азимутальной координаты летательного аппарата вторичным радиолокатором от скорости обзора пространства и отношения сигнал – шум при различных алгоритмах первичной обработки радиолокационной информации в условиях воздействия нормального гауссовского и райсовского процессов. Дополнительным моментом является доступность практического применения полученных результатов при модернизации программного обеспечения, реализующего обработку радиолокационной информации в существующих радиолокаторах.

Ключевые слова: обработка радиолокационной информации, метод максимального правдоподобия, оценка азимутальной координаты цели.

Одним из важных ресурсов, расходуемых при работе радиолокационной системы (РЛС) с электронным или электронно-механическим перемещением луча антенны, является ресурс времени. От его распределения зависят основные характеристики РЛС. Для снижения временны́х затрат, требуемых для обнаружения летательных аппаратов (ЛА) и измерения их пространственных координат, в радиолокаторах применяется двухэтапная процедура обнаружения и измерения. На первом этапе (этапе обзора) поиск ЛА выполняется с высокой скоростью обзора, пониженной достоверностью обнаружения ЛА и грубыми оценками их координат. Второй этап (этап измерения) осуществляется на меньшей скорости обзора, но только в направлениях вероятного нахождения ЛА, полученных в результате выполнения этапа обзора. Меньшая же скорость обзора на втором этапе позволяет получить более высокую достоверность обнаружения и снизить ошибки измерения координат. В результате такого распределения в сравнении с одноэтапной процедурой обнаружения и измерения временны́е затраты снижаются.

В данной статье исследована зависимость точности измерения азимутальной координаты вторичным радиолокатором с помощью одноканального метода от скорости обзора и отношения сигнал – шум при различных алгоритмах первичной обработки радиолокационной информации (РЛИ). Отметим, что под вторичным подразумевается радиолокатор, принимающий сигналы, излучаемые ЛА (т. е. использующий активный ответ).

© Топилин А. А., 2019

С учетом ориентации на практическое применение сделаем некоторые упрощения при выводе алгоритмов. Исходя из этого выполним следующие действия.

1. Создадим модель первичной обработки РЛИ вторичным радиолокатором при воздействии аддитивного гауссовского шума на полезный сигнал, модулированный огибающей диаграммы направленности антенны (ДНА) радиолокатора.

2. Разработаем алгоритм обработки на основе критерия максимального правдоподобия.

3. Осуществим статистическое моделирование предложенного (основанного на критерии максимального правдоподобия) алгоритма и традиционного алгоритма при условии воздействия гауссовского шума. Под традиционным алгоритмом будем подразумевать алгоритм, основанный на линейной фильтрации с импульсной характеристикой фильтра, соответствующей огибающей ДНА радиолокатора.

4. Осуществим статистическое моделирование предложенного алгоритма при райсовском распределении входного процесса (смеси сигнала и шума) и сравним полученные данные с результатами нормального распределения.

Рассмотрим случай, когда радиолокатор с временны́м периодом излучений t_α и азимутальным шагом излучений $\Delta\alpha$ выполняет обзор сектора шириной Θ. Число излучений k в секторе Θ определим выражением

$$k = \frac{\Theta}{\Delta\alpha}.$$

Скорость обзора $\Omega\alpha$ радиолокатором сектора шириной Θ определим выражением

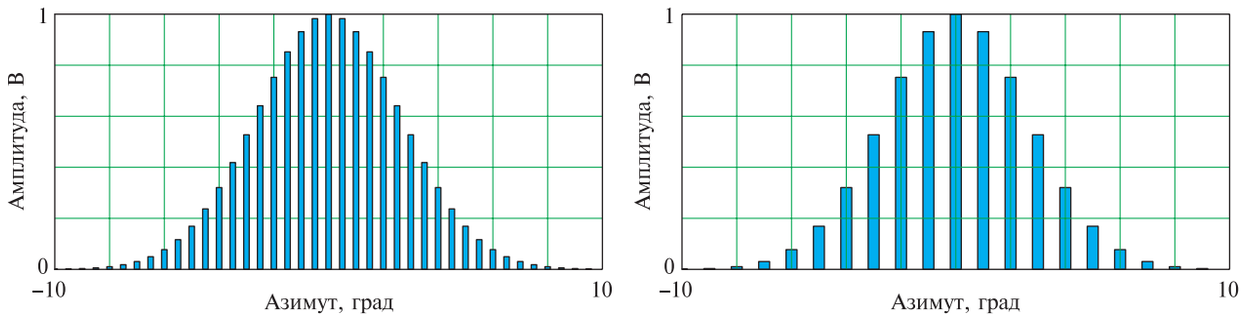


Рис. 1. Пакеты ответных сигналов (без воздействия шума):
а – Δα = 0,5°; б – с шагом Δα = 1°

$$\Omega\alpha = \frac{1}{kt_\alpha} = \frac{\Delta\alpha}{\Theta t_\alpha}.$$

Период t_α и ширину сектора Θ будем полагать постоянными, а шаг Δα – переменным. Данные выражения и условие фиксации параметров введены для того, чтобы рассмотреть зависимость точности измерения от шага излучения, что эквивалентно зависимости от скорости обзора. Приведем пример: при увеличении шага излучения в два раза, скорость обзора повышается также в два раза.

Пакеты ответных сигналов без воздействия шума при Δα, равном 0,5 и 1°, представлены на рис. 1. Ширина ДНА по уровню половинной мощности составляет 4,5°.

Представим математическую модель первичной обработки РЛИ (рис. 2).

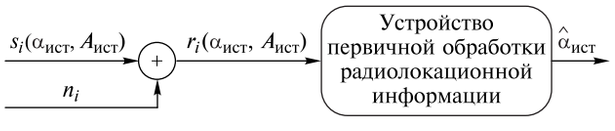


Рис. 2. Математическая модель первичной обработки РЛИ

В модели, представленной на рис. 2, использованы следующие величины:

$s_i(\alpha_{ист}, A_{ист})$ – отсчет полезного сигнала, модулированного ДНА радиолокатора;

i – номер отсчета;

$\alpha_{ист}$ – истинное значение азимута;

$A_{ист}$ – истинное значение амплитуды;

n_i – отсчет шума;

$r_i(\alpha_{ист}, A_{ист})$ – отсчет смеси полезного сигнала и шума;

$\hat{\alpha}_{ист}$ – оценка азимута.

Выражение для модели, представленной на рис. 2, можно записать так:

$$r_i(\alpha_{ист}, A_{ист}) = s_i(\alpha_{ист}, A_{ист}) + n_i. \quad (1)$$

При гауссовом шуме функция правдоподобия (ФП) p (r|α, A) может быть представлена выражением [1]:

$$p(\mathbf{r} \mid \alpha, A) = \prod_{i=1}^{M} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp \frac{-\left[r_i(\alpha_{ист}, A_{ист}) - s_i(\alpha, A)\right]^2}{2\sigma_n^2}. \quad (2)$$

где $\mathbf{r} = \{r_1, r_2, \ldots, r_M\}$ – вектор отсчетов смеси сигнала и шума;

σ_n – среднеквадратичное отклонение (СКО) шума;

M – количество ответных сигналов в пакете;

α – предполагаемое значение азимута;

A – предполагаемое значение амплитуды.

Критерий максимального правдоподобия подразумевает поиск такой пары значений α и A, при которых значение ФП будет максимальным.

Как известно, логарифм ФП имеет максимальное значение при тех же значения α и A, что и сама ФП. Это позволяет перейти к рассмотрению логарифма ФП, что удобно на практике, так как произведение по M в выражении (2) меняется на сумму по M в следующей формуле:

$$\ln p(\mathbf{r} \mid \alpha, A) = \ln \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^M} + \frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{i=1}^{M} -\left[r_i(\alpha_{ист}, A_{ист}) - s_i(\alpha, A)\right]^2. \quad (3)$$

Функцию $\ln p(\mathbf{r}|\alpha, A)$ можно представить как трехмерную фигуру в пространстве де-

картовых координат X, Y, Z. Условно отведем значениям α и A горизонтальные оси X и Y, а значению функции – вертикальную ось Z.

При рассмотрении выражения (3) стоит отметить, что слагаемое $\ln\frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^M}$ влияет на смещение функции $\ln p(\mathbf{r}|\alpha, A)$ вверх или вниз относительно оси Z, а множитель $\frac{1}{2\sigma_n^2}$ – на расширение или сжатие функции вдоль той же оси. При этом оба члена выражения не влияют на расположение максимума функции в горизонтальных координатах.

Слагаемое $r_i^2(\alpha_{ист}, A_{ист})$, полученное после раскрытия скобок в правой части выражения (3), является константой для рассматриваемой реализации $\mathbf{r}$ и не зависит от значений α и A. Следовательно, это слагаемое влияет на смещение функции вверх или вниз относительно оси Z, но также не оказывает влияние на расположение максимума функции в горизонтальных координатах.

С учетом этого упростим выражение (3) для более удобного прикладного использования. Введем функцию $L(\alpha, A)$, исключив из формулы (3) члены выражения, не влияющие на значения аргументов α и A, при которых логарифм ФП, а, следовательно, и сама ФП испытывают максимум:

$$L(\alpha, A) = \sum_{i=1}^{M}\left[r_i(\alpha_{ист}, A_{ист}) s_i(\alpha, A) - \frac{1}{2} s_i^2(\alpha, A)\right]. \quad (4)$$

Запишем выражение для оценки параметров $\hat{\alpha}_{ист}$ и $\hat{A}_{ист}$ по максимуму функции $L(\alpha, A)$, которая по сути является оценкой по критерию максимального правдоподобия:

$$\hat{\alpha}_{ист}, \hat{A}_{ист} = \arg\max_{\alpha, A} L(\alpha, A), \quad (5)$$

где $\hat{A}_{ист}$ – оценка амплитуды.

В предложенном алгоритме поиск максимума функции $L(\alpha, A)$ осуществляется перебором по α и A, согласно выражению (5). Оценка амплитуды $\hat{A}_{ист}$ в рамках данной задачи является вспомогательной, а оценка азимута $\hat{\alpha}_{ист}$ – искомой.

Для измерения азимутальной координаты традиционно применяется линейная фильтрация смеси сигнала и шума с импульсной характеристикой фильтра, соответствующей огибающей ДНА. Образуется взаимокорреляционная функция, аргумент максимума которой является искомой оценкой.

Оценим эффективность предложенного алгоритма обработки по сравнению с традиционным алгоритмом. В качестве критерия оценки будем использовать СКО ошибки измерения азимута $\sigma(\delta\alpha)$:

$$\sigma(\delta\alpha) = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^{N}\left[\delta\alpha(j) - \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\delta\alpha(j)\right]^2}, \quad (6)$$

где N – количество выборок;

$\delta\alpha(j) = \hat{\alpha}_{ист}(j) - \alpha_{ист}(j)$ – ошибка измерения азимута в j-й выборке.

Отметим, что шумовая составляющая ошибки измерения выбрана в качестве критерия оценки целенаправленно.

Результаты статистического моделирования традиционного и предложенного алгоритмов в условиях воздействия аддитивного гауссовского шума представлены на рис. 3.

Так как в РЛС широко применяется квадратурный способ приема сигнала с итоговым вычислением модуля вектора, образованного квадратурами, проведем вычисления с учетом этого обстоятельства. Как известно, распределение входного процесса в таком случае становится райсовским.

Напомним, что предложенный алгоритм был разработан для нормального (гауссовского) входного процесса. Однако далее целенаправленно проведем моделирование предложенного алгоритма при условии райсовского распределения. Как уже было сказано в начале статьи, автор данной статьи сделал некоторые допущения, обусловленные ориентацией на практическое применение.

Отметим, что строго математически правильной была бы разработка алгоритма для процесса с распределением Райса. Но для этого требуются инженеры-проектировщики радиотехнической аппаратуры определенного уровня подготовки, свободно ориентирующиеся в специализированной литературе, например [1, 2].

С практической точки зрения применение подхода, изложенного в данной статье,

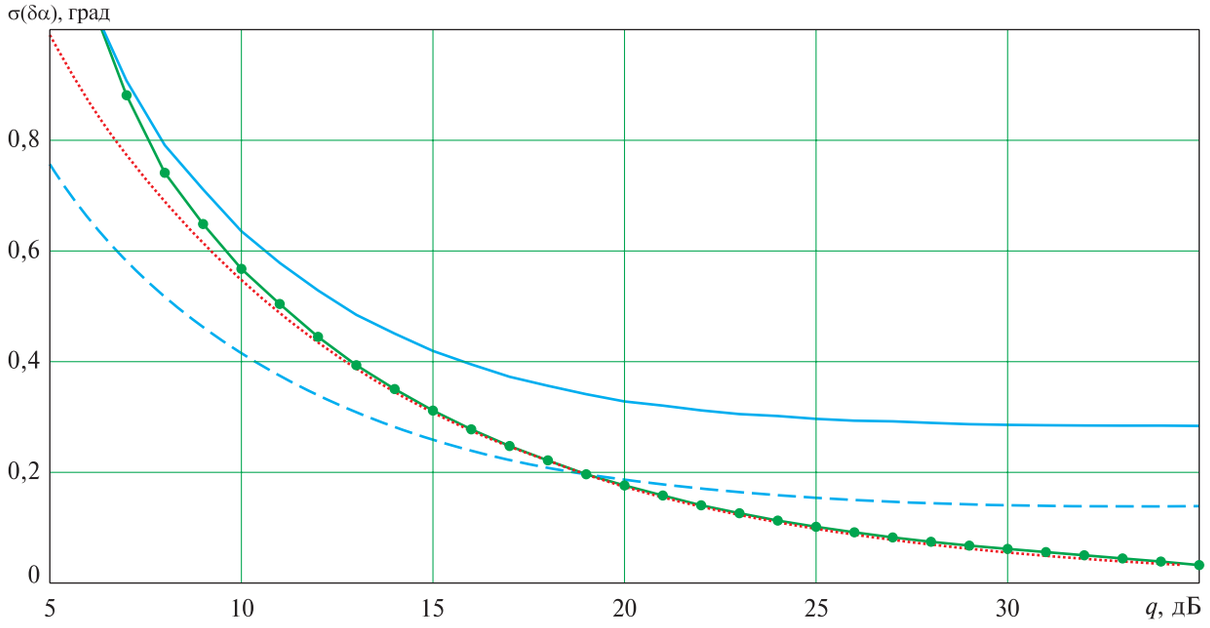


Рис. 3. Зависимость СКО ошибки измерения азимута σ(δα) от отношения сигнал – шум q при воздействии гауссовского шума:
— – Δα=0,5° (традиционный алгоритм); – – – Δα=1° (традиционный алгоритм); —●— Δα=1° (предложенный алгоритм); ····· Δα=1° (граница Крамера – Рао)

является значительно более простым и в то же время допустимым. Так, известно, при больших отношениях сигнал – шум райсовское распределение приближается к гауссовскому. При этом, согласно работе [2], при отношении сигнал – шум, равном 16,9 дБ и выше, замена распределения Райса на распределение Гаусса при проведении даже теоретических расчетов не влечет за собой существенных ошибок.

На рис. 4 представлены результаты статистического моделирования предложенного алгоритма для нормального и райсовского распределений.

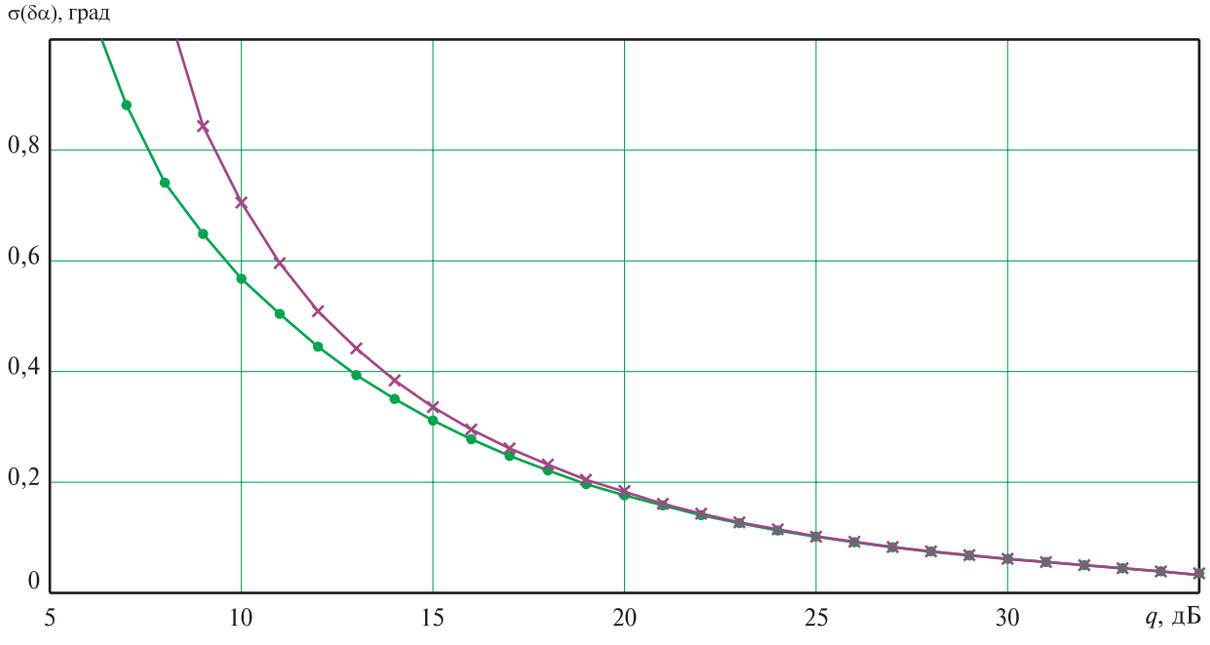


Рис. 4. Зависимость СКО ошибки измерения азимута σ(δα) от отношения сигнал – шум q для предложенного алгоритма обработки при Δα=1°:
—●— – нормальный процесс; —×— – райсовское распределение

Рассмотрим реализацию предложенного алгоритма на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Для обработки пакета, содержащего до 25 ответных сигналов, желательно наличие 25 блоков аппаратных умножителей – блоков *DSP* (при их отсутствии можно заменить операцию умножения на разложение в ряд и суммирование). Значения $\sum_{i=1}^{M}\frac{1}{2}s_i^2(\alpha, A)$ из выражения (4) являются априорно известными и могут быть заранее записаны в блок памяти. Расчет и поиск максимума функции $L(\alpha, A)$ при наличии 25 параллельно работающих блоков *DSP* с 80 возможными значениями α и 16 возможными значениями A на тактовой частоте 100 МГц занимает около 15 мкс. При этом временно́й интервал излучения t_α, как правило, существенно больше и может составлять сотни микро- или единицы миллисекунд. Малое количество возможных значений A, позволяющее снизить затрачиваемое для вычислений время, достигается за счет нормировки входной реализации.

Отметим, что в представленном для реализации примере выбранные константы обусловлены рассмотренной моделью: шириной ДНА около 4,5°, при шаге излучения около 1° и результирующей точностью измерения, приведенной на рис. 3 и 4. При этом рассмотренная модель относится к существующему радиолокатору.

Заключение

При традиционном алгоритме обработки среднеквадратичное отклонение (СКО) ошибки измерения азимута $\sigma(\delta\alpha)$ возрастает при увеличении шага излучения $\Delta\alpha$ и, как и следовало ожидать, с ростом отношения сигнал – шум стремится к величине $\Delta\alpha/\sqrt{12}$.

При отношении сигнал – шум, равном 19 дБ и выше, использование предложенного алгоритма обработки РЛИ позволяет достичь такой же или лучшей точности измерения азимута, как при традиционном алгоритме, увеличив в два раза азимутальный шаг излучения и, соответственно, повысив в два раза скорость обзора пространства.

При отношении сигнал – шум более 12 дБ оценка, выполненная по предложенному алгоритму, близка к потенциальной точности [1] (границе Крамера – Рао). По мере уменьшения отношения сигнал – шум, начиная с 12 дБ, оценка, выполненная по предложенному алгоритму, все более расходится с потенциальной точностью. Это расхождение объясняется наличием так называемых «аномальных» ошибок [3].

В результате расчетов установлено, что при отношении сигнал – шум, равном 20 дБ, и шаге излучения $\Delta\alpha$, равном ширине ДНА по уровню половинной мощности, СКО ошибки измерения азимута, выполненного по предложенному алгоритму, составляет около 1/10 от $\Delta\alpha$, что на практике является достаточно хорошим результатом.

При отношении сигнал – шум более или равном 15 дБ использование предложенного алгоритма при райсовском распределении входного процесса позволяет достичь СКО ошибки измерения азимута, расходящейся не более чем на 10 %, с СКО ошибки измерения азимута, полученной при нормальном распределении (и с потенциальной точностью). Можно утверждать, что алгоритм обладает определенной инвариантностью к закону распределения, несмещенностью оценки и эффективностью при большом отношении сигнал – шум.

При реализации предложенного алгоритма на базе ПЛИС время, необходимое для расчета и поиска максимума функции $L(\alpha, A)$, составляет десятки микросекунд, что существенно меньше, чем период излучения t_α, составляющий, как правило, сотни микро- или единицы миллисекунд.

Список литературы

1. *Ван Трис Г.* Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. / пер. с англ. под ред. В. И. Тихонова. М.: Советское радио, 1972. 744 с.

2. *Яковлева Т. В.* Условия применимости статистической модели Райса и расчет параметров райсовского сигнала методом максимума правдоподобия. Компьютерные исследования и моделирование. М.: 2014 Т. 6 № 1. С. 13–25.

3. *Куликов Е. И., Трофимов А. П.* Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Советское радио, 1978. 296 с.

Поступила 06.05.19

Топилин Алексей Александрович – главный специалист-разработчик программируемых логических интегральных схем, АО «ВНИИРА», г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: алгоритмы обработки радиолокационной информации.

Secondary radar azimuth accuracy with increased surveillance speed

The study introduces the dependence of the secondary radar aircraft azimuth accuracy on the space surveillance speed and the signal-to-noise ratio for various algorithms of the primary processing of radar data under the influence of normal Gaussian and Rice processes. The results obtained are practically applicable when upgrading software which implements the processing of radar data in existing radars.

Keywords: radar data processing, maximum likelihood method, target azimuth coordinate estimation.

Topilin Aleksey Aleksandrovich – chief specialist developer of field-programmable gate array, Federal Scientific Production Center All-Russian scientific Research Institute of Radio Equipment awarded with the Order of Red Banner (JSC “VNIIRA”), Saint Petersburg.
Science research interests: algorithms for radar data processing.

УДК 623.4.01

В. В. Доронин

Анализ опыта оценки объемов натурных испытаний изделий зенитной ракетной техники при разработке и модернизации

Рассмотрен подход к оценке количества пусков изделий зенитной ракетной техники на различных стадиях натурных испытаний, требуемых при выполнении опытно-конструкторской работы. Приведен анализ подхода к определению объема летных испытаний с использованием практического опыта «МКБ «Факел» 1960-х гг. Предложен способ оценки стоимости экспериментального этапа опытно-конструкторской работы.

Ключевые слова: надежность ракеты, отказ блока аппаратуры (агрегата), уровень надежности, функциональная эффективность изделия, летные испытания, работоспособность ракеты, точка испытательного пуска.

Введение

Многие конструкторские школы в области ракетостроения в настоящее время переживают второе рождение. Это связано с тем, что за последние годы существенно обновился кадровый состав проектных организаций, осваиваются новые технологии проектирования и испытаний изделий ракетной техники, активно применяются все виды компьютерного и полунатурного моделирования. Производственная база предприятий-разработчиков ракетной техники и предприятий-разработчиков бортового оборудования и агрегатов также претерпевает существенное обновление.

Часто обновленным коллективам разработчиков приходится сталкиваться с проблемами, которые были успешно решены ранее их предшественниками. В связи с этим для определения оптимальных путей дальнейшего развития конструкторских школ необходимо проанализировать опыт разработчиков предыдущих поколений и применять его для решения текущих задач планирования работ, проектирования и испытаний изделий нового поколения.

Цель статьи – анализ подхода к определению объема натурных испытаний с учетом надежности зенитных ракет на основе опыта, накопленного в АО «Машиностроительное конструкторское бюро «Факел» имени академика П. Д. Грушина» (АО «МКБ «Факел») в начале своей деятельности, а также с учетом разработок XXI в. Оценка надежности разрабатываемых изделий не теряет актуальности, поскольку для определения объема испытаний новой техники, а также для определения потребного объема финансирования и сроков разработки необходимо знать достижимый уровень функциональной эффективности изделий соответствующего технологического уровня на различных стадиях проведения испытаний. Ошибки при расчете потребного количества изделий на этапе конструкторских испытаний, как это не раз доказано на практике, приводят к возникновению значительных рисков невыполнения работ в установленные сроки.

Терминология

В 60-е годы XX в. термин «надежность» не имел до конца устоявшегося определения. Так, в ОКБ-2 (в настоящее время – АО «МКБ «Факел», входящее в состав АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей») термин «надежность» зенитной ракеты характеризовал вероятность безотказной работы в полетных условиях [1], т. е. вероятность того, что опытный образец ракеты выполнит задачу испытательного пуска в заданных условиях. При этом определяющим фактором являлась эффективность выполнения задачи пуска ракетой. Пуск ракеты считался удачным, а ракета – работоспособной, если основные задачи пуска выполнены.

Однако это определение не соответствует современному понятию «надежность». В известном многотомном справочнике под редакцией В. С. Авдуевского [2], а также в ГОСТ 27.002–2015 [3] под надежностью понимается свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность

© Доронин В. В., 2019

выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Ключевым смысловым параметром современного определения понятия «надежность» является способность сохранять определенные свойства и характеристики. Отметим, что для решения задачи сохранения совокупности параметров и характеристик эффективности необходимо сначала решить задачу их достижения и подтверждения стабильности результатов. Именно эта задача решается на этапе летных конструкторских испытаний. В это время осуществляются поиск и отработка таких технических решений, которые должны обеспечить выполнение заданных требований. По этой причине для этапа отработки (испытаний) термин «надежность изделия в пуске» не вполне подходит. К тому же на данном этапе нельзя оценивать необходимое количество испытательных пусков, используя указанное в техническом задании требование по надежности изделия.

Имеющееся на первый взгляд противоречие в подходах к оценке надежности ракет на этапе летных испытаний может быть преодолено без каких-либо корректировок с учетом следующих фактов. В 1960-е гг. количество пусков опытных изделий в АО «МКБ «Факел» на этапах испытаний достигало нескольких сотен и более (рис. 1). В распоряжении испытателей имелась внушительная статистика пусков и в целом были основания на получение статистических оценок надежности на этапах испытаний. В этих условиях с помощью оценки надежности действительно можно было охарактеризовать вероятность выполнения задачи испытательного пуска.

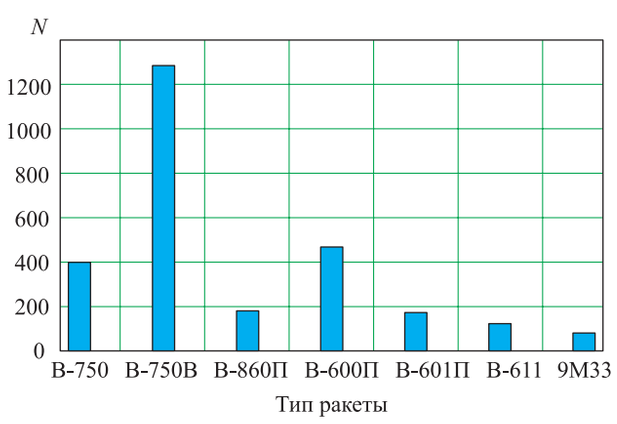


Рис. 1. Данные о количестве испытаний (*N*) ракет начального периода деятельности АО «МКБ «Факел»

На современном этапе разработок новой техники ситуация иная. Так, количество натурных работ сократилось ввиду большой стоимости опытных экземпляров изделий ракетной техники и ограниченного бюджета разработок. С учетом того что проводимые доработки материальной части и программного обеспечения при проведении испытаний зачастую существенно меняют свойства зенитной ракеты от пуска к пуску, ни о какой статистике в малой серии пусков не может быть и речи. Статистические оценки результатов на этапах испытаний возможны с определенными допущениями на имитационных математических моделях. Однако результат моделирования будет иметь требуемую достоверность только после осуществления верификации моделей, которая в свою очередь завершается в целом после выполнения всего объема летных испытаний. К тому же использование математических моделей в качестве мощного инструмента восполнения недостающего объема испытаний пока не в должной мере допускается заказывающими структурами.

На основании изложенного выше, по мнению автора, процессу испытаний новой техники в части достижения результата больше соответствует название «функциональная эффективность изделия» в реализовавшихся условиях, определяющее степень выполнения задач пуска совокупностью функциональных блоков и агрегатов ракеты. Количественно функциональная эффективность должна соответствовать вероятности выполнения ракетой задачи испытательного пуска.

Термин «надежность» наилучшим образом может быть применен при оценке повторяемости результата в серийном производстве, когда конструкторской документации (КД) присвоена литера «О1», а государственной комиссией признано, что изделие, изготовленное по принятой КД, подтвердило правильность конструкции, реализованных технических решений и стабильно выполняет функциональное предназначение. С указанного момента

может быть дан старт накоплению статистики по отказам с одновременным улучшением технологических процессов производства для последующего получения оценок надежности техники серийного производства.

Также следует обратить внимание на ряд вопросов к прежней терминологии в части трактовки используемого ранее понятия «отказ». В ОКБ-2 в 60-е годы XX в. под отказом понималась утрата работоспособности ракеты в полете, следствием которого являлся неуспешный результат пуска [1].

С учетом изложенного ранее следует отметить, что при испытаниях новой техники невыполнение задач пуска возможно по разным причинам.

Во-первых, это может быть собственно отказ какого-либо блока аппаратуры или агрегата ракеты, связанный с нарушением штатного функционирования соответствующей аппаратуры из-за поломки или выхода из строя элементов того или иного блока (агрегата).

Во-вторых, в ряде испытаний невыполнение задач пуска может быть обусловлено некорректной работой того или иного блока или агрегата из-за неправильного исполнения ими своих функций в конкретных условиях. Причем сам блок или агрегат может правильно функционировать в соответствие с заложенной логикой.

Корректность выполнения алгоритма (функции) обеспечивается как отсутствием ошибок в алгоритме, т. е. явных несоответствий исполняемого кода исходному алгоритму, так и адекватностью представления действительности, на основе которого спроектирован алгоритм (агрегат). Отсутствие у разработчика полного представления обо всех явлениях, внутренних и внешних процессах, свойствах внешней среды и других ключевых моментах может стать причиной некорректного построения алгоритмов (блоков, агрегатов) для некоторых указанных условий. В этом случае, характерном для процесса испытаний новой техники, следует говорить не об отказе, а о недостаточной функциональной эффективности аппаратуры, агрегатов или ракеты в целом в тех или иных условиях применения.

Такая интерпретация возникшей проблемы важна для того, чтобы правильнее сформулировать проблему и спланировать дальнейшие работы по ее решению. Очевидно, что искать неисправность, которой могло и не быть, или искать причину неуспешной работы в свете изложенных выше соображений, по сути, разные задачи.

Рассмотренные отличия в трактовках понятий «надежность» и «отказ» ракеты можно объяснить разным уровнем технического совершенства ракет 1960-х гг. и их современных аналогов. Так, бóльшая часть ракет первого поколения представляла собой сложные аналоговые системы автоматического регулирования. По этой причине разнообразия ситуаций с выбором алгоритмов решения задач во всех условиях применения практически не возникало. Многие нарушения в системах автоматического регулирования действительно можно было интерпретировать как сбои (отказы).

Для современных ракет с цифровыми системами на борту [4] причинами невыполнения задач и отрицательных результатов в пусках могут быть некорректности алгоритмов, неучтенные ситуации, возникшие в полетных условиях, другие виды неопределенности, а также поломки (отказы) узлов аппаратуры и агрегатов.

В следующем разделе представлен анализ опыта испытаний в ОКБ-2 начального этапа работы предприятия, результаты которого позволяют получить представление об объемах испытаний техники нового поколения того периода.

Для обеспечения возможности цитирования исходных текстов в указанных материалах использована прежняя терминология в части определения надежности и отказов.

Опыт работ МКБ «Факел» в части оценки надежности изделий основной тематики в период 1953–1968 гг.

Обсуждаемая тематика в рамках открытой публикации может базироваться на материалах прошлых лет периода становления ОКБ-2, которые в настоящее время находятся в открытом доступе.

Несмотря на то что с тех пор прошло около полувека, сменилось несколько поколений ракетной техники, опыт советской оборонной промышленности очень важен для современного этапа развития отечественной техники.

Отечественная школа зенитного ракетостроения активно развивалась под руководством академика П. Д. Грушина. В те годы приоритетной была задача обеспечения требуемого результата в минимально возможные сроки. Страна остро нуждалась в эффективной защите воздушных рубежей. При больших объемах выпуска продукции в советское время важную роль играла правильная оценка этих объемов и сроков проведения испытаний, которые напрямую определяли затраты государства на разработку новой техники. Не все получалось с первого раза, возникали проблемы и неудачи в пусках, но задачи в конечном счете решались, что обеспечивало мировое лидерство нашим разработкам. Отечественная техника противовоздушной обороны (ПВО) практически все время применялась в зонах локальных военных конфликтов, совершенствовалась по результатам боевого применения. Стоит отметить, что средства воздушного нападения, применяемые в зонах локальных военных конфликтов, представляли собой новейшую технику американского и европейского (израильского) производства. А отечественная техника ПВО практически все время применялась в зонах локальных военных конфликтов, совершенствовалась по результатам боевого применения. По этой причине России многие годы удавалось и удается на практике доказывать лидерство в разработках и производстве зенитного ракетного оружия.

В XXI в. определяющими факторами при разработке новой техники выступают выделенный заказчиком бюджет на разработку и строго установленные сроки завершения этой разработки, законодательно закрепленные системой наказаний предприятий и руководителей за неисполнение в срок. Это отличие наложило отпечаток на результативность проводимых работ, сказалось на сроках достижения целей разработок, эффективности финансовых вложений, общем состоянии предприятий-разработчиков. По этой причине так важно уметь правильно оценить объем испытаний, который должен обеспечить выполнение задачи в установленный срок с минимизированными рисками.

Глубокий анализ богатого научно-практического наследия предшественников – первого поколения отечественных ракетостроителей показывает, что требования к объемам испытаний и их результативности были в свое время досконально изучены и на основе всесторонних оценок сформулированы основные подходы к организации испытаний и их объективной оценке.

На основании опыта отработки и эксплуатации зенитных ракет первого поколения типа В-750, использованных в ЗРК С-75, и их модификаций сделан вывод о том, что значение надежности, близкое к расчетному, было достигнуто только через 3–4 года серийного производства, после отстрела в общей сложности 600–800 ракет. В этот период продолжалась доводка оборудования ракет, совершенствовались технические решения, отрабатывалась технология серийного производства. График количества пусков, требующихся для достижения установленной надежности ракет, приведен ранее (см. рис. 1). Статистические данные достигнутого уровня надежности ряда зенитных ракет разработки АО «МКБ «Факел» представлены на рис. 2. Приняты следующие обозначения:

P_{00} – установившийся уровень надежности ракет после завершения заводского цикла освоения серийного производства (через 3–4 года серийного выпуска);

СКО P_{00} – среднеквадратическое отклонение значения установившегося уровня надежности по всей выборке;

P_n – уровень надежности, достигнутый к моменту завершения испытаний изделия определенного типа, спланированных до начала серийного производства;

СКО P_n – среднеквадратическое отклонение значения уровня надежности P_n.

По ряду изделий типа В-601П, В-611, 9М33 значения установившегося уровня надежности на рис. 2 отсутствуют ввиду того, что указанные данные появились позднее и не вошли в цитируемые материалы.

С помощью рис. 2 можно проанализировать особенности результатов испытаний ракет разного типа. Кроме того, эти данные можно использовать для установки связи с особенно-

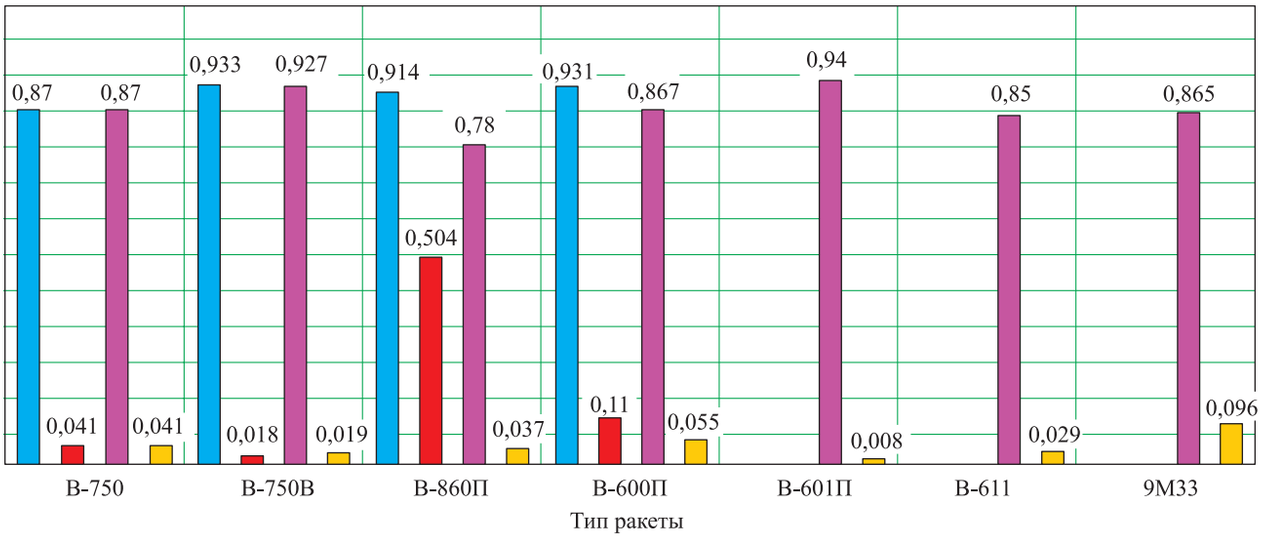


Рис. 2. Установившийся уровень надежности ракет первого поколения:
– установившийся уровень P_{00}; – СКО P_{00}; – P_n; – СКО P_n

стями конструкции указанных ракет. Этой возможностью читатель может воспользоваться самостоятельно.

В работах МКБ «Факел» 1960-х гг. показано, что в период налаживания производства ракет в промышленности и освоения новой техники в войсках надежность ракет оказывается ниже расчетного значения. Причем у ракет различных заводов-изготовителей, как правило, уровень надежности разный по причине отличий уровня подготовки производства, технической оснащенности, квалификации персонала и культуры производства в целом.

На совместных (государственных) испытаниях ракеты В-750В, проходивших в период с мая по август 1958 г., по результатам пусков 30 ракет «надежность» ракеты оценивалась величиной 0,7. В пусках ракет, проведенных впоследствии в период с августа 1958 г. до конца 1959 г. на полигоне Капустин Яр в условиях, сходных с условиями совместных летных испытаний (СЛИ), надежность ракет характеризуется величиной 0,859 (по результатам 368 пусков), а в 1960 г. – величиной 0,928 (по результатам еще 223 пусков).

Аналогичные данные есть и по ракете В-600П, однако вследствие меньшей интенсивности испытаний ракет процесс доводки надежности этих ракет до установленного уровня занял бóльший период времени.

В целом опыт отработки серийных зенитных ракет показал, что к концу СЛИ при числе пусков 150 в среднем был достигнут уровень надежности (функциональной эффективности) около 0,7. На примере ракет типа В-750В получено, что для достижения уровня надежности, близкого к предельно достижимому, потребовалось провести около 600 пусков серийных ракет, что вместе с пусками ракет на заводских и совместных испытаниях составляет 750.

Практика отработки зенитных ракет служит доказательством того, что в процессе заводских и совместных испытаний не могут быть полностью выявлены все недостаточно надежные элементы – устраняются только явные дефекты, которые проявляются достаточно часто. При этом ввиду исключительной сложности организации испытаний зенитных ракет и недостаточности информации по работе всего бортового оборудования зачастую проводится большая серия испытаний, прежде чем удается найти верный путь устранения того или иного дефекта.

В процессе последующего серийного производства и эксплуатации зенитных ракет их надежность продолжает непрерывно возрастать до предельного уровня, поскольку совершенствуется технология изготовления и эксплуатации ракет, повышается квалификация как производственного, так и обслуживающего персонала, а главное – продолжают устраняться отдельные дефекты, выявляющиеся в ходе отстрела зенитных ракет и типовых испытаний аппаратуры.

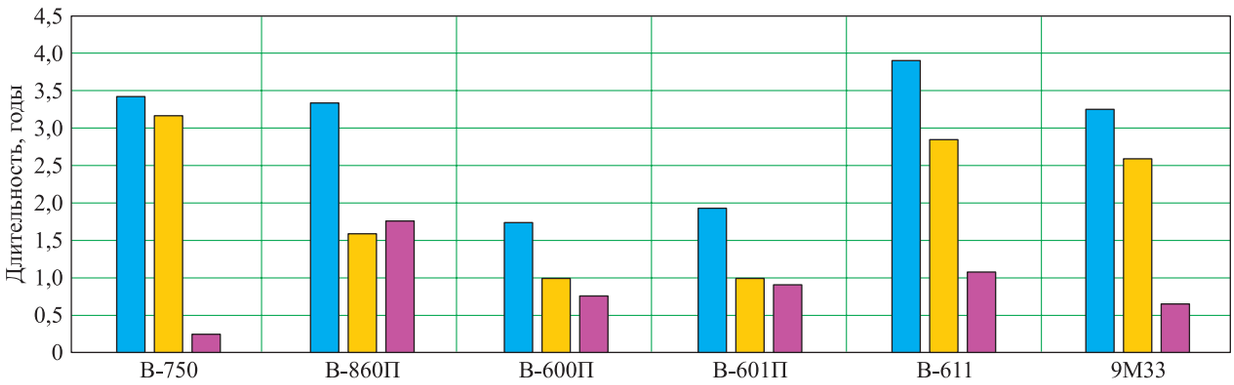


Рис. 3. Продолжительность летных испытаний ракет разработки АО «МКБ «Факел» на различных стадиях: – общая продолжительность летных испытаний; – продолжительность предварительных (конструкторских) и СЛИ; – продолжительность совместных летных государственных (заказчика) испытаний

Интенсивность проведения испытаний, а также объем выпуска изделий изготовителями ракет определяет продолжительность испытаний.

На рис. 3 отражены значения продолжительности натурной отработки изделий нескольких типов, созданных в 1960-е гг. в АО «МКБ «Факел».

Следует отметить, что в те годы вместо современного термина «государственные испытания» использовался термин «совместные летные испытания».

Целесообразно обратить внимание на продолжительность летных испытаний ракеты В-611 (см. рис. 3), созданной специально для зенитно-ракетного комплекса (ЗРК) «Шторм» Военно-морского флота (ВМФ) без сухопутного аналога. При выполнении опытно-конструкторской работы (ОКР) по созданию указанной ракеты потребовалось наибольшее время отработки. Это связано с особенностями техники для ВМФ и дополнительными сложностями при испытаниях, при том что в те годы были специализированные средства испытаний: опытовые корабли, оптико-электронные береговые измерительные позиции, широкий спектр специально оборудованных мишеней. При проведении испытаний изделий В-611 использовался специально оборудованный испытательный морской полигон в г. Феодосия. Можно предположить, что при отсутствии перечисленных средств обеспечения испытаний сроки проведения указанной ОКР могли значительно увеличиться.

Испытания зенитных ракет в корабельном ЗРК на море значительно сложнее и сопряжены с большими рисками получения отрицательных результатов в процессе испытаний. При испытаниях на море требуется бóльшее время отработки, поскольку не удается получить объект воздействия для детального анализа – остатки мишеней скрываются под водой.

На рис. 4 приведены важные данные по начальному уровню надежности зенитных ракет новых разработок АО «МКБ «Факел» 1960-х гг., которые получены методом статистической обработки результатов натурных работ до-

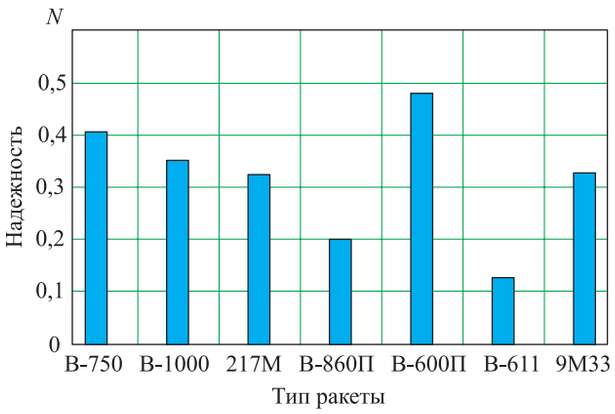


Рис. 4. Начальный уровень надежности ракет новых разработок периода 1960-х гг. в АО «МКБ «Факел»

статочного объема. Под начальной надежностью понималась надежность изделий ракетной техники на начальном этапе натурных работ – автономных летных и предварительных испытаний после завершения цикла наземных проверок. На этом этапе велик риск отказов блоков аппаратуры и агрегатов из-за их новизны, недостаточной технологичности изготовления и качества контрольных прове-

рок. Стоит обратить внимание на результат по «морской» ракете В-611, уровень начальной надежности которой оказался не выше 0,12. Значит, начальный этап испытаний указанных ракет на море шел тяжело и было много неуспешных пусков. По мнению автора данной статьи, подкрепленному опытом работ на море на этапе создания изделий современной ракетной техники, эти результаты обусловлены наличием объективных закономерностей разработок морских систем.

Решение задач определения требуемых объемов испытаний, их качества, динамики отработки и ряда других задач в ОКБ-2 было поручено опытному конструктору, на тот момент кандидату технических наук, Евгению Самуиловичу Иофинову. С 1954 г. и до последних дней своей жизни он работал на «Факеле» и прошел путь от старшего инженера до начальника проектного отдела – заместителя главного конструктора по научно-исследовательским и перспективным разработкам. Награжден орденом Трудового Красного Знамени, лауреат Ленинской и Государственной премий за участие в создании зенитных ракет В-750, их модификаций и ряд других работ.

Е. С. Иофинов по результатам анализа пусков зенитных ракет классов В-750, В-1000, В-860П, В-600, В-601, 9М33 и других получил уникальные статистические данные по уровням надежности вновь разрабатываемых зенитных управляемых ракет (ЗУР) на различных стадиях жизненного цикла. Он определил начальные уровни надежности различных типов ЗУР при выходе на летные конструкторские испытания, сделал важные обобщающие выводы о закономерностях проведения конструкторских испытаний.

Докторская диссертация Е.С. Иофинова (далее – диссертация) до недавнего времени имела статус ограниченного доступа, в связи с чем научная общественность не имела возможности ознакомиться с важнейшими результатами проведенных работ. Результаты этой работы не утратили актуальности по прошествии столь продолжительного времени и могут быть использованы для альтернативных оценок потребного количества испытательных пусков при разработке техники нового поколения.

Ниже приведены наиболее важные выводы докторской диссертации Е.С. Иофинова [1].

«…

1. В работе проведен подробный анализ процесса отработки 13 типов зенитных ракет, среди которых 7 типов вновь разработанных ракет и 6 типов модификаций за период 1953–1968 гг.

Всего проанализированы пуски более 8200 ракет, из которых около 5000 использованы для анализа процесса роста надежности. При этом выявлены основные закономерности сложившейся практики отработки зенитных ракет.

2. Показано, что установившийся уровень надежности зенитных ракет достигает значения P_{00} = 0,92...0,95 для телеуправляемых ракет и P_{00} = 0,90...0,92 для ракет с самонаведением. Этот уровень надежности достигается в серийном производстве через несколько лет войсковой эксплуатации после 600–800 пусков ракет.

Для модификаций серийных ракет установившийся уровень надежности P_{00} выше указанного ранее.

3. Установлено, что начальный уровень надежности зенитных ракет P_0, с которым ракеты поступают на летные испытания, как правило составляет 0,2…0,4. Для модификаций серийных ракет начальный уровень надежности выше начального уровня надежности прототипа, но ниже его достигнутого уровня надежности в серии.

4. Уровень надежности вновь разрабатываемых зенитных ракет в конце этапа летных испытаний составляет 0,70…0,75 и редко превышает 0,8. Для достижения такого уровня надежности в среднем затрачивается 160…200 пусков зенитных ракет, испытания длятся 2…4 года. При этом средняя надежность зенитных ракет на этапе летных испытаний составляет 0,5…0,7.

Для модификаций серийных ракет уровень надежности в конце этапа летных испытаний составляет величину 0,75…0,90 – в зависимости от глубины модернизации. На летные испытания таких ракет затрачивается 50…100 ракет, а продолжительность испытаний составляет 1…2 года.

5. За время летных испытаний одного типа изделия в среднем устраняется 20…30 типов дефектов, приводящих к отказам в пусках. В среднем на устранение одного типа отказа тратится 2,4 неудачного пуска. В некоторых случаях на устранение одного дефекта тратится до 10…12 неудачных пусков. Каждый дефект устраняются одной удачно проведенной доработкой.

6. Основную информацию для повышения надежности зенитных ракет дают неудачные пуски. Удачные пуски практически не оказывают влияния на рост надежности зенитных ракет, хотя имеющаяся информация позволяет выявить неисправности в работе бортового оборудования и агрегатов, которые впоследствии приводят к аварийным пускам ракет…»

Несмотря на имеющиеся отличия в современных оценках ключевых параметров испытаний от приведенных данных, тенденции, отмеченные в первоисточнике, не утрачивают актуальности и в XXI в. Вывод 6, приведенный выше, несомненно, актуален во все времена. Важно помнить, что для успешного завершения испытаний необходимо на практике пройти весь трудный путь ошибок и неудач.

Как показано в статье [4], вероятность выполнения задачи изделием нового поколения в испытательном пуске зависит от уровня отработки аппаратуры, программного обеспечения (ПО) и может быть оценена аналитическими методами. Несмотря на это полученные оценки в изложенных выводах диссертации могут быть полезными в качестве ориентиров при расчетах, проводимых по новым методикам.

Для получения оценок необходимого количества пусков на этапах испытаний с учетом достигнутой надежности (функциональной эффективности) можно использовать известную формулу накопления вероятности положительного исхода в серии испытаний [4].

Таким образом, данные, полученные на основе большой статистики прошлых лет, имеют прикладное значение и в XXI в.

Практические аспекты применения оценок функциональной эффективности на этапах испытаний

Как отмечено ранее, для получения достоверных оценок стоимости новой ОКР, а значит и успешности разработки ракетной техники в целом, необходимо иметь корректный прогноз необходимого количества пусков (натурных испытаний). Указанное число испытаний складывается из следующих факторов.

Во-первых, для проверки эффективности применения изделий в диапазоне требований технического задания планируется определенное количество эпизодов с заданными параметрами условий. На языке испытателей каждый эпизод – это так называемая точка испытательного пуска (далее – точка). В качестве параметров условий, как правило, используются: тип мишени, характеристики поверхностей отражения мишеней для радиосигналов, координаты объектов и их производные в точке встречи ракеты с целью, помеховая обстановка, режимы взаимодействия ракеты с комплексом и др.

Во-вторых, при выполнении каждого пуска в конкретную точку могут возникать ситуации, приводящие к невыполнению задач пуска. Причины возникновения таких ситуаций рассмотрены в статье [4]. В целом отмеченное явление характеризует достигнутую функциональную эффективность изделия на соответствующем этапе испытаний. Как видно из рис. 4, на начальном этапе испытаний значение функциональной эффективности изделий новой разработки в среднем составляло 0,32. При этом для наиболее сложных изделий (например, В-860П зенитного ракетного комплекса С-200) значение функциональной эффективности составляло 0,2. Такой низкий показатель эффективности начального этапа испытаний можно объяснить тем, что впервые в практике АО «МКБ «Факел» на ракете новой конструкции была применена высокочувствительная полуактивная радиолокационная головка самонаведения.

В-третьих, для современных изделий с большим объемом цифровых вычислителей на борту очень важным фактором реализации высокой функциональной эффективности является уровень отработки ПО. Следует обратить внимание на особенности отработки ПО современных ракет, отмеченные в статье [4], которые характеризуются зависимостью от объемов используемого кода, сроков выполнения работ, квалификации разработчиков ПО и многих других факторов.

В-четвертых, существенное влияние на функциональную эффективность испытываемых зенитных ракет оказывают уровень отработки средств ЗРК и качество отработки взаимодействия с бортовым оборудованием ракет в различных условиях применения. Как показывает опыт АО «МКБ «Факел», до 20…30 % испытательных пусков с неудовлетворительным результатом случалось по причине ошибок или некорректной работы средств комплекса, а не ракеты. Значит, даже при полной готовности ракеты к выполнению полетного задания положительный результат мог быть получен только в 70…80 % случаев в зависимости от уровня отработки комплекса. Очевидно, что при вводе ракеты в существующий и отработанный комплекс указанная вероятность будет выше.

В-пятых, при определении объема испытаний необходимо учитывать наличие или отсутствие, а также полноту оснащения специализированного испытательного полигона, уровень обеспеченности испытаний современными средствами полигонных измерений, включая многопозиционные оптические средства фиксации работы боевого снаряжения. Отсутствие полного объема данных внешних измерений увеличивает количество неудачных пусков, затрачиваемых для обнаружения и устранения ошибок или неточностей алгоритмов.

В-шестых, при проведении контрольных тестовых испытаний на стадии завершения ОКР необходимо заранее готовить типаж мишеней, условия пусков и способы контроля результатов, максимально соответствующих требованиям тактико-технического задания. Целесообразно заранее предусмотреть последствия неудач, которые неизбежны на этапе контрольных стрельб. Необходимо установить условия и способы частичного зачета результатов контрольных стрельб. В противном случае «стрельба до победного конца» может превратиться в битву за выживание в условиях интенсивного истощения ресурсов предприятия-разработчика при восполнении количества изделий за свой счет.

С учетом важности корректной оценки стоимости ОКР, а значит и корректного определения количества испытательных пусков, целесообразно в техническом задании на разработку новых изделий ракетной техники, помимо типов целей, указывать соответствующие им мишени и условия их поражения, по которым должна быть проведена проверка зачетности на этапе государственных испытаний. Можно привести ряд примеров, когда имевшиеся в распоряжении испытателей мишени значительно отличались по уязвимости от реальных целей, заданных в техническом задании, что связано с отсутствием большей части агрегатов и блоков аппаратуры из тех, которые есть на реальных целях. Очевидно, что для получения требуемого результата в указанных условиях требуется больший расход ракет.

Указанная конкретизация требований обеспечит достоверную оценку необходимого количества пусков на этапах испытаний и, как следствие, позволит снизить общие риски срыва работ в установленные сроки.

Таким образом, если учесть все указанные факторы, можно получить необходимое количество изделий, изготавливаемых в рамках ОКР для проведения всего объема испытаний с достижением ожидаемого результата. С учетом оценки стоимости опытного образца несложно получить ориентировочную цену ОКР.

Оценим для примера требуемое количество изделий для обеспечения всего объема работ в рамках новой ОКР с исходными данными по изделию МКБ «Факел» 60-х гг. XX в.

Пусть на этапе автономных летных испытаний, когда проводятся испытания ракет без использования радиолокационных средств ЗРК, необходимо проверить работу изделия по трем точкам, отличающимся дальностью полета. Эффективность полигонного обеспечения для определенности примем 0,9, т. е. вероятность получения всего объема данных близка к высокой, но не максимальная. Выбор значения можно объяснить тем, что испытания новой техники всегда требуют совершенствования оборудования полигона, а опережающее обеспечение испытаний пока не всегда реализуется в полной мере.

Примем значение функциональной эффективности начального этапа 0,2 (как у изделия В-860П на рис. 4). Тогда вероятность выполнения задачи в экспериментальном пуске с учетом получения всех необходимых экспе-



риментальных данных составит 0,18. Для получения требуемого результата по одной точке с вероятностью 0,95 потребуется не менее 15 пусков с учетом отказов и прочих непредвиденных ситуаций. Для проведения автономных летных испытаний в полном объеме в условиях принятых исходных данных получим количество изделий $N_{АЛИ}$: $15 \cdot 3 = 45$.

При правильной организации испытаний на начальном этапе работ не требуется одновременно проверять все точки зоны поражения. В противном случае будет получен значительный перерасход изделий. Целесообразно определить такие эпизоды (точки) испытаний, в которых может быть проверена работа всей аппаратуры изделий в полетных условиях. Вместе с тем для проверки всех особенностей работы сложной аппаратуры все-таки потребуется значительный объем летных испытаний.

На этапе СЛИ с ЗРК может потребоваться следующее количество изделий. Функциональную эффективность на рассматриваемом этапе примем за 0,7 в соответствии с выводом 4 из диссертации Е. С. Иофинова. Примем, что зенитная ракетная система (комплекс), использующая новое изделие, также разработана впервые. Значение функциональной эффективности этой системы на этапе СЛИ примем равным 0,8. Тогда вероятность выполнения задачи в экспериментальном пуске этапа СЛИ с учетом получения всего объема необходимых экспериментальных данных (эффективности полигонных измерений) составит $0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \approx 0,5$. Для получения требуемого результата по одной точке с вероятностью 0,95 необходимо не менее 4,3 пуска. Для проведения СЛИ в полном объеме в условиях принятых исходных данных с учетом проверок по 15 точкам получим количество изделий $N_{СЛИ} = 4,3 \cdot 15 \approx 65$. Следует отметить, что число проверяемых точек на этапе конструкторских испытаний определяется совместным решением заказчика и разработчика по программе испытаний и может отличаться от приведенного значения. Важно напомнить, что под точкой понимается не только пространственное положение точки встречи ракеты с целью, но и параметры цели (ее эффективная отражающая поверхность, уязвимость ее блоков и агрегатов и т. п.). В части уязвимости, как уже отмечалось ранее, очень важно обеспечить соответствие характеристикам имитируемых целей. Недооценка этого требования приводит к повышенному расходу ракет на испытаниях. Число 15 взято исключительно для примера.

Примем, что на этапе государственных испытаний проверяется 10 точек с учетом не только координат точек встречи, но и различного типа мишеней. На этапе государственных испытаний функциональная эффективность изделия может достичь величины 0,8. Пусть функциональная эффективность комплекса достигла величины 0,9, а эффективность полигонных измерений также 0,9. Тогда можно получить, что в условиях принятых допущений для этапа государственных испытаний потребуется порядка 30 опытных ракет.

В условиях принятых допущений общий объем летных испытаний с учетом изменяющейся в процессе отработки функциональной эффективности составит порядка 140 пусков.

Если не учесть потенциально реализуемую функциональную эффективность изделий и комплекса на этапах испытаний, то количество планируемых натурных работ будет существенно занижено относительно объективно необходимого количества этих работ. В рассмотренном примере исходя из планируемых точек испытаний это количество составит 3 + 15 + 10 = 28 — всего 20 % от необходимого. Эта кажущаяся экономия средств при определении объемов финансирования ОКР существенно увеличивает риск того, что спланированного объема испытаний не хватит даже для автономной летной отработки. Сроки испытаний с высокой вероятностью будут сорваны из-за необходимости поиска дополнительных средств, изготовления дополнительного количества ракет и продолжения испытаний.

Таким образом, использование объективных статистических данных, накопленных в АО «МКБ «Факел» в различные периоды деятельности, позволяет получать экспертные оценки требуемого количества пусков опытных образцов изделий ракетной техники для выполнения всего запланированного объема испытаний. Вместе с тем за рамками изложенного

материала остается методический аппарат выбора объема натурных работ, т. е. количества проверяемых точек зоны поражения комплекса на этапах испытаний, и допустимый вклад методов имитационного моделирования для оптимизации количества натурных испытаний. Этому вопросу планируется посвятить отдельное исследование.

Выводы

1. Несмотря на годы, прошедшие с момента обобщения первых результатов испытаний отечественной зенитной ракетной техники, и появление новых технологий создания и испытаний этой техники, актуальность исследований прошлых лет в методическом плане не теряет своей значимости.

2. Для корректной оценки необходимого объема натурных испытаний изделий ракетной техники необходимо учитывать объективные данные по предельно достижимым характеристикам функциональной эффективности изделий на различных этапах испытаний.

3. Разработка и испытания зенитных ракет нового поколения – весьма дорогостоящий процесс. Бóльшую часть суммарных затрат на разработку новой техники составляет стоимость изготовления ракет для проведения всего объема натурных работ. По опыту АО «МКБ «Факел» необоснованная экономия на объемах и интенсивности испытаний с высокой вероятностью приводит к срыву сроков разработок и увеличению материальных затрат.

В связи с этим заказчику совместно с разработчиком при формировании ведомости исполнения контракта по созданию новых образцов ракетного оружия целесообразно проводить всестороннюю оценку рисков испытаний с целью планирования оптимального объема испытаний и стоимости ОКР в целом.

Список литературы

1. *Иофинов Е. С.* Исследование процесса роста надежности зенитных ракет при летных испытаниях и в серийном производстве: дисс. … д-ра техн. наук. Кн. 1. Химки, 1969 г. 351 с. (экз. единственный – техническая библиотека АО «МКБ «Факел»).

2. Надежность и эффективность в технике. В 10 т. Т. 1. Методология. Организация. Терминология / под ред. *А. И. Рембезы*. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

3. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.

4. *Доронин В. В.* Проблемы оценки качества отработки опытных образцов ракетной техники в натурных экспериментах этапа конструкторских испытаний и пути их преодоления // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2018. № 2. С. 35–52.

Поступила 15.07.19

Доронин Виктор Валентинович – доктор технических наук, генеральный директор, генеральный конструктор Акционерного общества «Машиностроительное конструкторское бюро «Факел» имени академика П. Д. Грушина, г. Химки.

Область научных интересов: разработка и проектирование зенитных ракет.

Analysis of experience in assessing the extent of full-scale testing of anti-aircraft missile products during development and modernization

The paper focuses on the approach to assessing the number of launches of anti-aircraft missile products at various stages of full-scale tests required for the implementation of development work. We analyzed the approach to determining the extent of flight tests using the practical experience of the “MKB” Fakel” of 1960s. Furthermore, we proposed a method for estimating the cost of the experimental stage of development work

Keywords: rocket reliability, unit failure, reliability level, product functional efficiency, flight tests, rocket performance, test launch point.

Doronin Viktor Valentinovich – Doctor of Engineering Sciences, Director General, Designer General, Engineering Design Bureau “Fakel” named after academician P. D. Grushin, Joint Stock Company, Khimki.

Science research interests: development and design of anti-aircraft missiles.

УДК 629.7.058.68

М. А. Шарова, С. С. Дядин

Анализ погрешностей динамически настраиваемого гироскопа для гироинерциального блока методом вариации Аллана

Рассмотрен алгоритм получения измерительной информации с динамически настраиваемого гироскопа в режиме датчика угловых скоростей и оценки шумовых составляющих выходного сигнала, основанный на методе вариации Аллана. Проведена оценка полученных результатов.

Ключевые слова: навигационная система, вариация Аллана, динамически настраиваемый гироскоп, вычисление шумовых составляющих.

Введение

Источником информации в навигационной системе является гироинерциальный блок (ГИБ), включающий гироскопы и акселерометры. Составная часть и характеристические особенности датчиков первичной информации (ДПИ) определяются требованием конкретной системы. От точности самих чувствительных элементов (ЧЭ) и канала обработки будет зависеть точность навигационной системы. В качестве ДПИ в серийных бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) и перспективных системах, производимых на АО «Арзамасский приборостроительный завод им. П. И. Пландина», для измерения параметров углового движения используются динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) в режиме датчиков угловых скоростей (ДУС).

Для повышения точности навигации БИНС необходима проработка новых подходов и методов для совершенствования технических характеристик, в рамках которых осуществляется контроль выходных характеристик, способных разложить выходной сигнал на составляющие с последующим анализом каждой из них.

В данной статье предложены новые алгоритм и программное обеспечение обработки выходного сигнала ДНГ в режиме ДУС, разработанные на АО «Арзамасский приборостроительный завод им. П. И. Пландина» М. А. Шаровой под руководством С. С. Дядина. Определены и проанализированы численные значения погрешностей, присутствующих в данных.

© Шарова М. А., Дядин С. С., 2019

Обзор методов оценки выходных данных

В настоящий момент широко применяется классический метод оценки выходного сигнала гироскопа, согласно которому полная ошибка аддитивной составляющей выходного сигнала, присутствующая в каждом измерении выходной характеристики, представляет собой сумму случайной (Δ^0) и систематической (Δ_c) составляющих:

$$\Delta = \Delta_c + \Delta^0. \quad (1)$$

Модель измерения выходной характеристики отображена на рис. 1, на котором введены следующие обозначения:

ω – истинное значение угловой скорости;

$\tilde{\omega}$ – угловая скорость с учетом систематической и случайной составляющих;

Ω – угловое приращение с учетом систематической и случайной составляющих.

Однако электроника и ошибки в выходном сигнале гироскопа дают дополнительную погрешность, соизмеримую с погрешностью самого прибора, которую с помощью классического метода не обнаружить, что является недостатком данного метода.

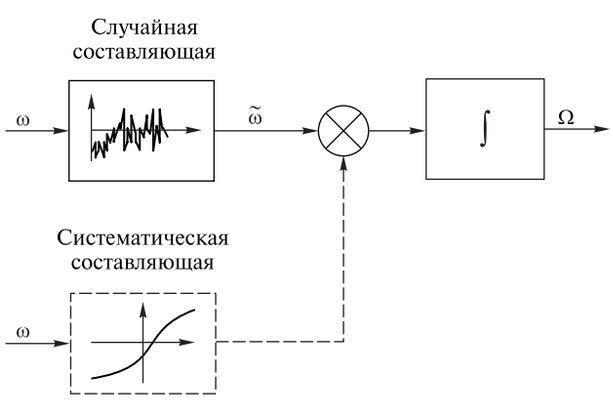


Рис. 1. Модель измерения угловой скорости с учетом систематической и случайной составляющих

Величина, которая изменяется случайным образом под влиянием многих факторов, оказывающих воздействие на прибор с учетом измерения одной величины, называется случайной погрешностью.

Величина, находящаяся под влиянием нескольких факторов, значение которой остается постоянным в течение времени, – это систематическая погрешность.

Классический метод анализа погрешностей дрейфа ДНГ, который применяется при измерении угловой скорости, заключается в определении систематической и случайной составляющих по каждой из осей чувствительности, поскольку ДНГ имеет два канала измерения по следующему алгоритму.

1. Оценить в соответствии с конструкторской документацией дрейф гироскопа по 8 положениям.

2. Провести компенсацию вертикальной и горизонтальной составляющих вращения Земли.

3. Рассчитать систематические и случайные составляющие по полученным значениям с помощью метода усреднения на последовательных временны́х интервалах.

Известно множество методов анализа стохастического шума в выходных данных инерциальных датчиков, в том числе метод в частотной области посредством спектральной плотности мощности (СПМ), метод, использующий функцию корреляции, а также дисперсионные методы. Однако самым известным и используемым является метод вариации Аллана.

Метод вариации Аллана

В основу метода вариации Аллана заложен метод кластерного анализа, предусматривающий разделение всего набора данных на группы определенной длины.

Весь объем подлежащих анализу данных делим, как показано рис. 2, на некоторое количество групп одинаковой длины с интервалом осреднения

$$T = nt_0,$$

где n – количество опросов на интервале измерения ($n = 1,2, \ldots < N/2$);

t_0 – шаг опроса измерителя.

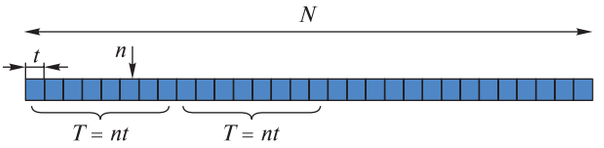


Рис. 2. Структурная схема данных, используемая при вычислениях вариации Аллана

Количество групп определяется по формуле

$$K = \frac{N}{n}.$$

Здесь N – количество измерений.

Рассчитаем среднее значение данных для каждой группы в отдельности:

$$\overline{\Omega}_k(T) = \frac{1}{T}\int_{t_k}^{t_k+T} \Omega(t)dt. \qquad (2)$$

Здесь $\Omega_k(t)$ – среднее значение выходной скорости в группе, начинающееся с k-й точки и содержащее n точек данных;

t_k – шаг опроса измерителя в k-й точке.

Последующее среднее значение выходной скорости группы можно представить в следующем виде:

$$\overline{\Omega}_{next}(T) = \frac{1}{T}\int_{t_{k+1}}^{t_{k+1}+T} \Omega(t)dt, \qquad (3)$$

где $t_{k+1} = t_k + T$.

Вычислив разность между средними значениями каждой пары соседних групп, получаем:

$$\xi_{k+1,k} = \overline{\Omega}_{next}(T) - \overline{\Omega}_k(T). \qquad (4)$$

Определенный уравнением (4) набор ξ для каждой группы с интервалом осреднения T образует совокупность случайных величин. В данном случае представляет интерес значение дисперсии ξ для всех групп одинакового размера.

Вычислив средний квадрат этих разностей, разделим его на определенный коэффициент и получим:

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2}\left\langle\left[\overline{\Omega}_{next}(T) - \overline{\Omega}_k(T)\right]^2\right\rangle = \frac{1}{2(N-2n)}\sum_{k=1}^{N-2n}\left[\overline{\Omega}_{next}(T) - \overline{\Omega}_k(T)\right]^2. \qquad (5)$$

Скобки $\langle\ \rangle$ в уравнении (5) определяют операцию осреднения для набора групп.

Логарифмический график зависимости девиации Аллана $\sigma(T)$ от времени осреднения T является прямым указанием на типы случайных процессов, которые присутствуют в выходных данных гироскопа, поскольку значение вариации Аллана $\sigma^2(T)$ – измеримая величина.

Метод вариации Аллана является способом классификации и оценки уровня шумов в выходном сигнале, связанных со статистическими свойствами собственных случайных процессов, которые влияют на работу гироскопа. Применимо для ДНГ определены погрешности, свойственные ему при работе в режиме ДУС, которые можно проанализировать с помощью метода вариации Аллана.

Шумовые составляющие на основе метода вариации Аллана

Большую часть погрешностей по методу вариации Аллана, содержащихся в одном измерении угловой скорости, можно представить в виде модели

$$I_\omega = \omega + R_\omega + K_\omega + B_\omega + N_\omega + Q_\omega. \qquad (6)$$

Здесь I_ω – измерения (град/ч);

R_ω – тренд в угловой скорости;

K_ω – случайное блуждание по угловой скорости;

B_ω – нестабильность нуля;

N_ω – случайное блуждание угла;

Q_ω – шум квантования.

На рис. 3 приведена кривая девиации Аллана для выходного сигнала, меняющаяся под влиянием различных стохастических процессов, которые соответствуют погрешностям гироскопов.

Тренд в угловой скорости R_ω – это систематическая погрешность, представляющая собой детерминированное отклонение выходного сигнала, полученного с исследуемого датчика на значительных промежутках времени. Случайное блуждание угла гироскопа N_ω представляет собой компоненту аддитивного белого шума и проявляется как шум или медленное изменение выходных сигналов во времени [1–16]. Случайное блуждание угловой скорости K_ω представляет собой случайный уход реально измеряемых исследуемым датчиком физических величин, таких как угловая скорость. Шум квантования выходного сигнала Q_ω – ошибки, вносимые в аналоговый сигнал при кодировании к цифровой форме [12, 13]. Нестабильность нуля B_ω – электронный шум, наблюдаемый практически в любых электронных устройствах, источниками которого могут являться неоднородности в проводящей среде [16].

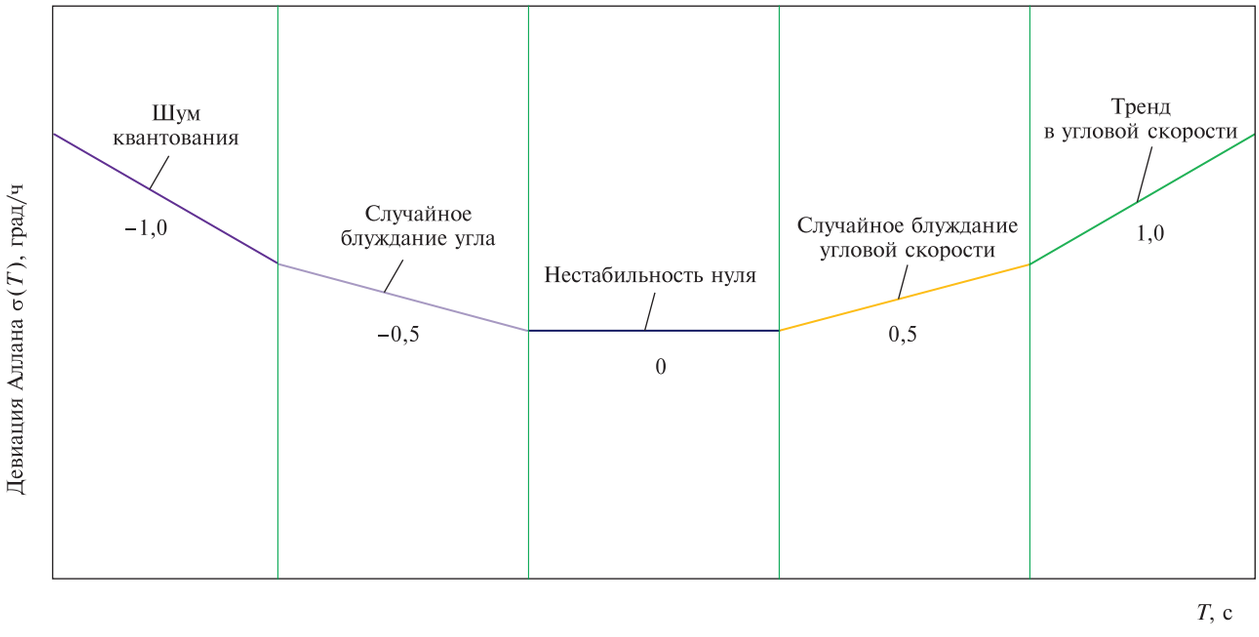


Рис. 3. Соответствие участков девиации Аллана типовым процессам

Разработка и реализация алгоритма для анализа выходных характеристик

В результате работы экспериментальной установки (рис. 4) получен выходной сигнал ДНГ в режиме ДУС.



Рис. 4. Структурная схема экспериментальной установки для проведения испытаний:
КТХ – камера тепла и холода; ДНГ – динамически настраиваемый гироскоп; ДУК – дистанционно управляемый кронштейн; ИП – источник питания; ПУ – пульт управления

Экспериментальная установка, структурная схема которой изображена на рис. 4, включает следующие элементы:

- блок управления, в состав которого входит источник питания и пульт управления;
- камера тепла и холода, в которую был помещен ДНГ, зафиксированный в дистанционно управляемом кронштейне;
- ПЭВМ, в которой установлена плата *Advantech PCI-1710*.

Для корректной работы платы *Advantech PCI-1710* на компьютер пользователя необходимо установить программное обеспечение, которое прилагается в комплекте вместе с платой. Данное программное обеспечение позволяет настроить оборудование и сохранить настройки в реестре *Windows*, а также использовать настройки при вызове функций *API* для работы с драйвером. При использовании этого драйвера доступен большой набор функций в различных средах программирования для повышения производительности аппаратных средств, например, функция обработчика событий, с помощью которой можно узнать статус передачи или получения данных.

На рис. 5. схематично изображено взаимодействие аппаратных и программных средств.

Работа с платой аналогоцифрового преобразователя (АЦП) начинается с ее инициализации. Сначала необходимо определить константы, командные слова, контрольные параметры платы, объявить структуры и выделить память под массивы данных. Затем

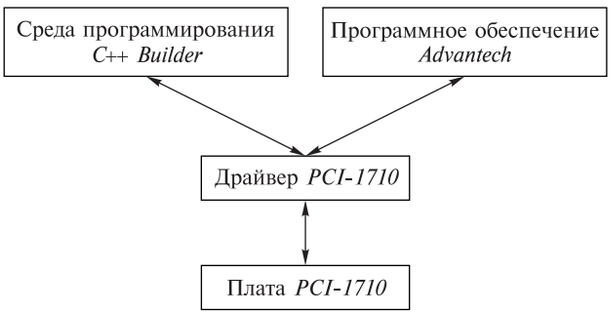


Рис. 5. Взаимодействие аппаратных и программных средств

проверить плату на наличие ошибок и создать поток для чтения поступающих на вход данных. После выполнения этих операций плата готова к работе и находится в режиме ожидания входных данных.

Процедуру подготовки модуля АЦП к работе можно представить в виде блок-схемы (рис. 6).

Работа установки (см. рис. 4) – это имитация работы гироинерциального блока, время измерения которого примем равным 10 мин.

Реализуя в действии установку, представленную на рис. 4, произведен сбор экспериментальных данных, который записыва-

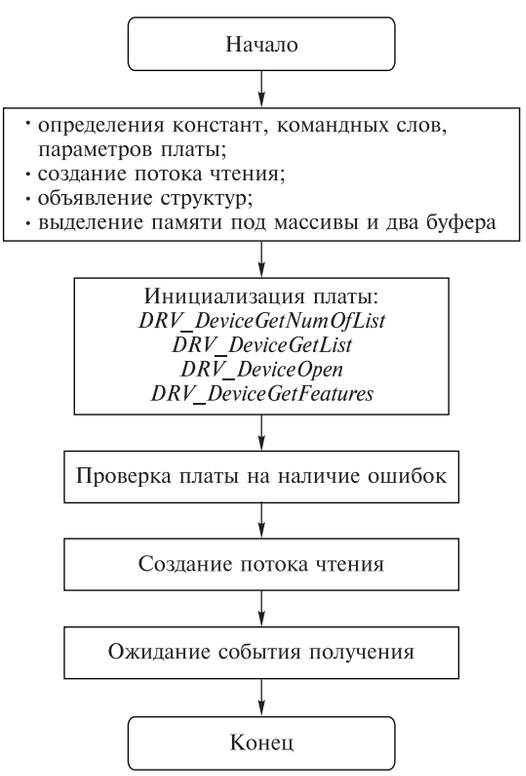


Рис. 6. Блок-схема процедуры подготовки АЦП к работе

Фрагмент экспериментальных данных

Канал измерения, град/ч	
X	*Y*
91,8	–139,00
То же	–116,13
68,38	–139,93
…	…
114,28	–103,76
57,14	–127,55

ем, сохраняем и экспортируем в файлы **.txt*. В таблице представлен фрагмент экспериментальных данных.

Для получения первичного представления о данных необходимо выполнить их преобразование [2]. Для этого вычисляется среднее значение, дисперсия и среднеквадратичное отклонения [10]. Следующим шагом является представление данных в графической форме. Для его реализации в среде программирования *C++ Builder 6* создан дополнительный модуль [3]. На рис. 7 представлен график выходного сигнала гироскопа по осям *X* и *Y* в нормальных климатических условиях (22 °C).

Для расчета вариации Аллана $\sigma^2(T)$ интервал осреднения данных T примем кратным шагу опроса измерителя:

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2\times T^2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} \left(\theta_{k+2n} - 2\theta_{k+n} + \theta_k\right)^2. \quad (7)$$

Здесь θ_k – угол, накопленный в результате интегрирования значений выходной скорости, вычисляется по формуле

$$\theta_k = \int_0^{kt_0} \Omega(t)dt.$$

Блок-схема алгоритма, реализующего метод вариации Аллана, приведена на рис. 8.

Вариацию Аллана $\sigma^2(T)$ на основе известных шумовых составляющих [6, 7] можно представить с помощью аппроксимирующего полинома $p^2(T)$ в виде:

$$\sigma^2(T) \approx p^2(T) = \frac{3Q^2}{T^2} + \frac{N^2}{T} + \frac{2B^2}{\pi}\ln 2 + \frac{K^2T}{3} + \frac{R^2T^2}{2}. \quad (8)$$

Здесь R, K, B, N, Q – коэффициенты полинома $p(T_k)$.

Каждый их полученных коэффициентов R, K, B, N, Q полинома (8) представляет собой отдельные шумовые составляющие, присутствующие в выходном сигнале гироскопа [4, 5, 8]. Эф-

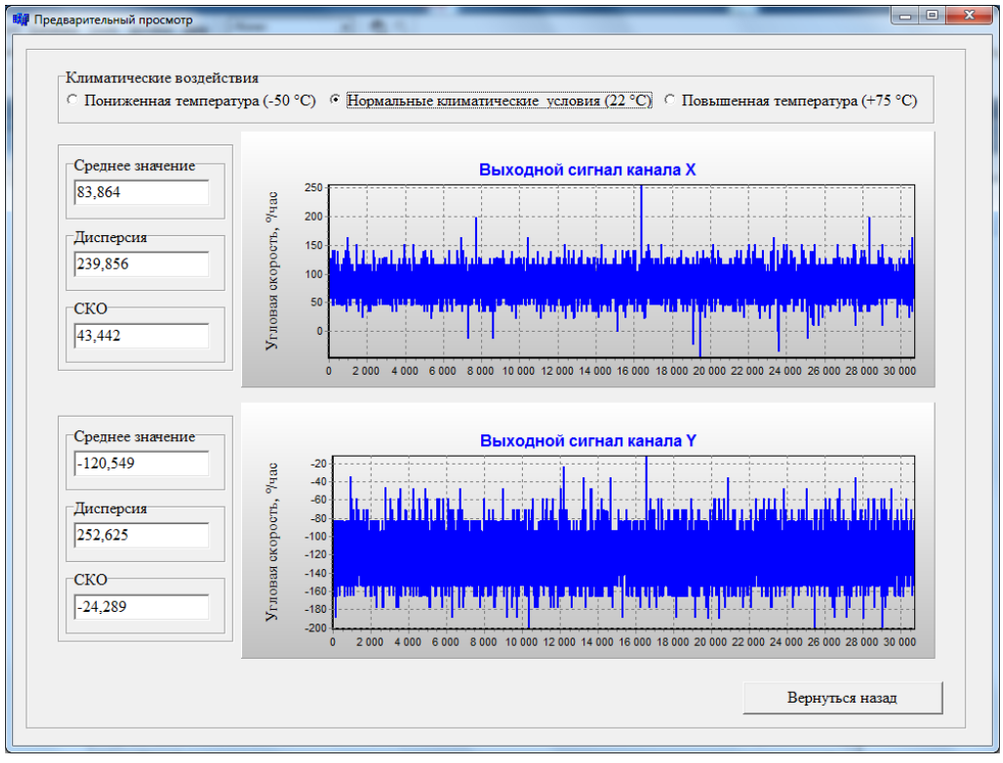


Рис. 7. График выходного сигнала гироскопа по осям *X* и *Y* при нормальных климатических условиях (22 °C)

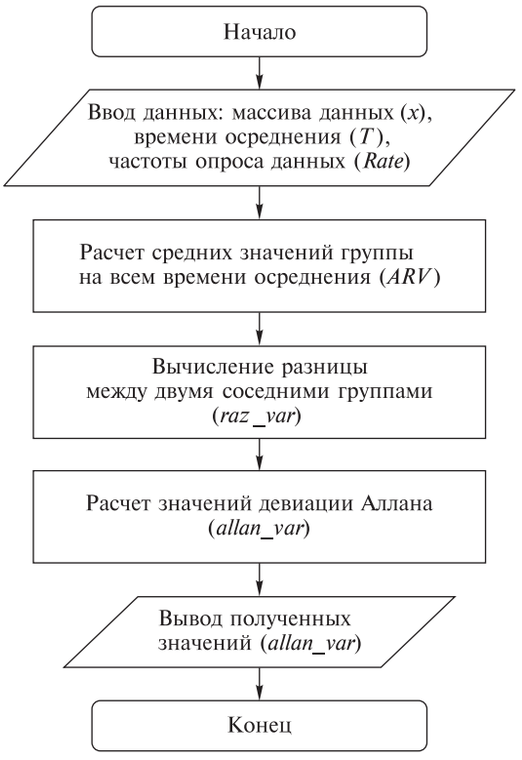


Рис. 8. Блок-схема алгоритма, основанного на методе вариации Аллана

фективным методом для получения значений коэффициентов при условии того, что вариация Аллана – это полиномиальная функция 5 неизвестных коэффициентов, является метод наименьших квадратов.

Суть данного метода заключается в том, чтобы найти коэффициенты R, K, B, N, Q, для которых было бы справедливо условие минимума суммы квадрата отклонений девиации Аллана $\sigma^2(T)$ от аппроксимирующей поверхности:

$$\Phi = \sum_{k=0}^{K} [\sigma(T_k) - p(T_k)]^2 \overset{\{R,K,B,N,Q\}}{\rightarrow} \min, \qquad (9)$$

где $\sigma(T_k)$ – девиация Аллана;

$p(T_k)$ – аппроксимирующий полином.

Для выполнения соотношения (9) все частные производные функционала Φ по всем $\{R,K,B,N,Q\}$ должны быть равны нулю:

$$\frac{\partial \Phi\{R,K,B,N,Q\}}{\partial\{R,K,B,N,Q\}} = 0. \qquad (10)$$

Получаем систему уравнений для нахождения 5 неизвестных $\{R,K,B,N,Q\}$:

$$\frac{\partial \Phi\{R,K,B,N,Q\}}{\partial\{R,K,B,N,Q\}} = 2\sum_{k=0}^{K}\left[\left(\sigma(T_k) - p(T_k)\right)\frac{\partial\sigma(T_k)}{\partial\{R,K,B,N,Q\}}\right] = 0, \qquad (11)$$

которую удобнее записать в матричной форме

$$[A]*[C] = [B],$$

$$[A] = \begin{bmatrix} T_1^{-2} & T_1^{-1} & 1 & T_1 & T_1^2 \\ T_2^{-2} & T_2^{-1} & 1 & T_2 & T_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_i^{-2} & T_i^{-1} & 1 & T_i & T_i^2 \end{bmatrix}, \quad [C] = \begin{bmatrix} 3Q^2 \\ N^2 \\ \frac{2B^2}{\pi}\ln 2 \\ K^2 \\ R^2 \end{bmatrix},$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 \\ \sigma_2^2 \\ \vdots \\ \sigma_i^2 \end{bmatrix}.$$

Здесь $[A]$ – матрица времени осреднения данных;

$[C]$ – вектор, обозначающий искомые коэффициенты;

$[B]$ – вектор, отображающий полученное значение девиации Аллана.

Матрица коэффициентов, согласно алгоритму наименьших квадратов, может быть решена так:

$$[C] = -(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T B, \qquad (12)$$

где $\mathbf{A}^T$ – транспонированная матрица $\mathbf{A}$.

Блок-схема алгоритма, реализующего метод наименьших квадратов для получения коэффициентов, приведена на рис. 9.

Для удобства работы при исследовании выходного сигнала ДНГ на наличие шумовых составляющих и отображения соответствующей информации и графиков было разработано программное обеспечение в среде программирования *C++ Builder 6*. Рабочая программа включает следующие функции:

• измерение и запись в файлы **.txt* выходных сигналов ДНГ с помощью платы аналогового ввода/вывода *PCI -1710*;

• вычисление значений девиации Аллана и представление в графической форме полученных результатов;

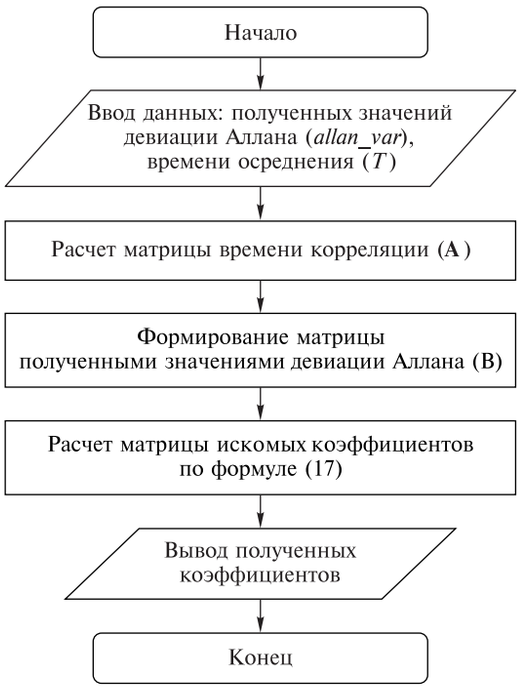


Рис. 9. Блок-схема алгоритма метода наименьших квадратов

• аппроксимация полученных значений девиации Аллана для получения численных значений коэффициентов, соответствующих определенным погрешностям.

При запуске программы появляется главное окно – «Расчет вариации Аллана», которое является центральным управлением программным модулем. В правой части окна расположено поле для отображения графика полученных значений в результате всех вычислений. Однако при нажатии на кнопку «Измерить» появляется дополнительный модуль с графиками исходных данных (см. рис. 7). В левой части окна находится поле управления, с помощью которого можно задать климатическое воздействие, частоту опроса измерителя, а также время измерения. Расположенное ниже поле «Коэффициенты» предназначены для отображения конечные результатов всех вычислений. Кроме того, в главном окне присутствуют кнопки, с помощью которых осуществляется опрос и запись в файл выходных сигналов, полученных с ДНГ, с последующим отображением полученных сигналов на графике в дополнительном модуле, запуск расчета отклонений вариации Аллана и аппроксимации с последующим построением графика полученных результатов.

Результатом работы модуля является нахождение соответствующих коэффициенты и вывод дополнительного графика с учетом полученных коэффициентов (рис. 10).

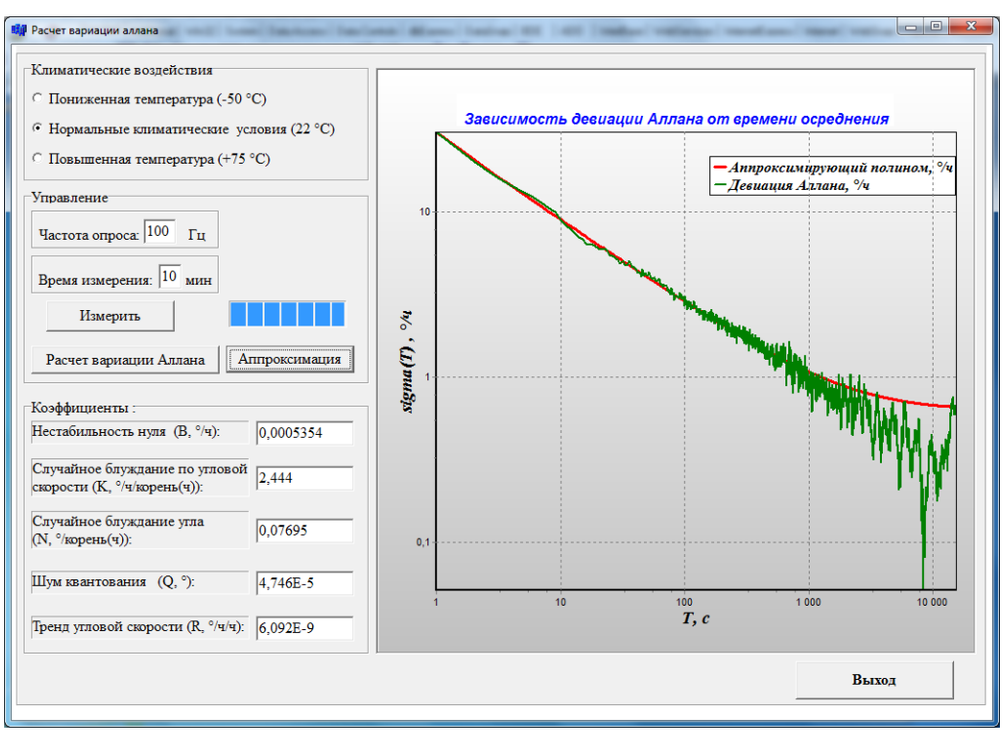


Рис. 10. Окно с графиком аппроксимирующей кривой

Заключение

В результате применения нового алгоритма для анализа аддитивной составляющей выходного сигнала ДНГ созданы алгоритм и программное обеспечение, позволяющие вычислить 4 основных шумовых составляющих: нестабильность нуля, случайное блуждание по угловой скорости, случайное блуждание угла и тренд угловой скорости, а также определить шум квантования, присутствующий в выходном сигнале ДНГ, который возникает вследствие преобразования аналогового сигнала в цифровой.

Практическое применение нового алгоритма, основанного на методе вариации Аллана, в серийном производстве на партии образцов ДНГ позволило выделить и проанализировать случайные составляющие погрешностей. Эти результаты можно использовать на стадии калибровки ГИБ.

Отметим, что полученные значения коэффициентов остаются стабильными и не меняют своих значений от запуска к запуску, что свидетельствует о достоверности полученных результатов и адекватности как алгоритма, так и разработанного ПО.

Разработанное ПО – первый и необходимый шаг для подготовки к внедрению в производство ГИБ, использующих в своем составе ДНГ, для БИНС перспективных изделий. В результате проведения апробирования, разработанного ПО в серийном производстве ДНГ на объеме выпуска двух месяцев случайная составляющая снижена с 30 до 50 % по сравнению с классическим методом оценки выходных сигналов датчика. Предполагается дальнейшее проведение апробирования метода в серийном производстве на стадии калибровки ГИБ.

Список литературы

1. *Матвеев В. В*, *Распопов В. Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб., 2009. 276 с.

2. *Stoclwell W.* Bias Stability Measurement: Allan Variance. Crossbow Technology, Inc. URL: https://www.yumpu.com/en/document/read/37462850/bias-stability-measurement-allan-variance-crossbow-technology (data accessed 15.03.2019).

3. *Шарова М. А.*, *Емельянова Т. В.*, *Аминов Л. А.* Анализ погрешностей динамически настраиваемых гироскопов методом вариации Аллана // Сб. «Актуальных проблем военно-научных исследований», СПб., 2019. № 2. 106–112 с.

4. *Greenhall C. A.* Spectral Ambiguity of Allan Variance // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. June 1998. Vol. 47. № 3.

5. *Esbensen K.* Multivariate Data Analysis in Practice. Oslo, Norway: CAMO Process AS, 2002.

6. IEEE Std 1554-2005 IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition and Analysis.

7. IEEE Std 952-1997. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.

8. *Maybeck P. S.* Stochastic models, Estimation and Control. Vol. 1. Academic Press, Inc., 1979.

9. *Titterton D. H.*, *Weston J. L.* Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Peregrinus Ltd., 1997.

10. *Эварт Т. Е.*, *Троицкий А. В.*, *Поздяев В. В.* Численные методы решения инженерных задач. Нижний Новгород: НГТУ, 2014. 74 с.

11. *Плотников П. К.* Элементы теории работы одной разновидности бесплатформенных инерциальных систем ориентации // Гироскопия и навигация. 1999. № 3. С. 23–35.

12. *Гольденберг Л. М.*, *Матюшкин Б. Д.* Цифровая обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.

13. *Haiying Hou*. Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance. Calgary, Alberta: University of Calgary, 2004. 147 p.

14. *Stockwell W.* Angle Random Walk. Crossbow Technology, Inc. URL: https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.210.1133&rep=rep1&type=pdf (data accessed 03.03.2019).

15. *Yuskel Y.*, *Kaygisiz H. B.* Notes on Stohastic Errors of Low Cost MEMS Inertial Units. 2011. 39 p. https://instk.org/web/static/bibliography/Introduction_to_Sensor_Errors.pdf (data accessed 03.03.2019).

16. Schmid H. Offset, flicker noise, and ways to deal with them. 2008. https://studylib.net/doc/18128956/offset--flicker-noise--and-ways-to-deal-with-them (data accessed 03.03.2019).

Поступила 09.09.19

Шарова Мария Андреевна – магистр, инженер-электроник Акционерного общества «Арзамасский приборостроительный завод им. П. И. Пландина», г. Арзамас.
Область научных интересов: гироскопические приборы и их применение в бесплатформенных инерциальных навигационных системах.

Дядин Сергей Серафимович – заместитель главного конструктора по динамически настраиваемым гироскопам и физическим платформам Акционерного общества «Арзамасский приборостроительный завод им. П. И. Пландина», г. Арзамас.
Область научных интересов: системы управления летательными аппаратами, гироскопические приборы в составе гироинерциального блока, гиростабилизирующие платформы, свободные гироскопы и системы на их основе.

Allan variance in dynamically tuned inertial-unit gyro error analysis

The purpose of the study was to consider an algorithm for obtaining the measurement information from a dynamically tuned gyroscope in the mode of an angular velocity sensor and output signal noise component estimate, the algorithm being based on the Allan variance method. The results obtained were evaluated.

Keywords: navigation system, Allan variance, dynamically tuned gyroscope, calculation of noise components.

Sharova Mariia Andreevna – Master's Degree student, electronic engineer, Arsamassky Priborostroitelny Zavod Imeni Plandina, Joint Stock Company, Arsamas.
Science research interests: gyroscopic devices and their use in strapdown inertial navigation systems.

Diadin Sergey Serafimovich – Deputy Chief Designer for dynamically tuned gyroscopes and physical platforms, Arsamassky Priborostroitelny Zavod Imeni Plandina, Joint Stock Company, Arsamas.
Science research interests: aircraft control systems, gyroscopic devices as part of a gyroinertial unit, gyrostabilizing platforms, free gyroscopes and free gyroscope systems.

УДК 629.7.351

А. Ю. Княжский, А. П. Плясовских

Повышение пропускной способности взлетно-посадочной полосы с использованием менеджера вылетов воздушных судов

Предложен принцип работы электронного менеджера вылетов воздушных судов *Departure Manager* (*DMAN*), формирующий рекомендации диспетчеру по упорядочиванию очереди задержанных воздушных судов, что позволяет минимизировать время занятости взлетно-посадочной полосы. Определены требования к менеджеру и возможность его интеграции в систему управления воздушным движением. Результаты моделирования показали целесообразность внедрения электронного менеджера в наиболее загруженные аэропорты и возможность возрастания пропускной способности взлетно-посадочной полосы более чем на 6 % при его использовании.

Ключевые слова: пропускная способность, взлетно-посадочная полоса, эффективность, воздушные суда, оптимизация, вылеты.

Введение

Важнейшими показателями эффективности работы взлетно-посадочной полосы (ВПП) являются ее пропускная способность и среднее время задержки рейсов, ожидающих своей очереди вылета и захода на посадку. Снижение времени задержки рейсов приводит к уменьшению расхода топлива и, как следствие, увеличению экономической прибыли от перевозок, снижению объема выбросов углекислого газа в атмосферу. Для увеличения пропускной способности ВПП и разгрузки диспетчера предлагается разработать менеджер вылетов – *Departure Manager* (*DMAN*), который оптимизирует очередь вылетающих воздушных судов (ВС) по критериям минимума времени занятости ВПП, минимума средней задержки рейсов (минимум расхода топлива и выброса вредных веществ в атмосферу). Актуальность решения данной задачи подтверждена рекомендациями глобального аэронавигационного плана [1], а также рядом исследований [2, 3].

Входные данные для *DMAN*: текущие параметры движения ВС; характеристики ВС; план полетов; информация о занятости и режиме работы ВПП. На выходе *DMAN* выдает рекомендации диспетчеру по управлению потоком вылетающих ВС. Конечное решение об управлении потоком принимает диспетчер. Таким образом *DMAN* разгружает внимание диспетчера, выполняя за него типовые операции и учитывая бóльшее количество влияющих на решение факторов, чем способен запомнить человек.

© Княжский А. Ю., Плясовских А. П., 2019

Из-за турбулентности в спутном следе вылетающие ВС должны соблюдать определенные в федеральных авиационных правилах интервалы между моментами вылета. Чем больше масса первого ВС и меньше масса второго ВС, тем длиннее интервал между моментами времени их вылетов. В зависимости от массы обоих ВС эти интервалы составляют 1…3 мин. Очередь оптимизируется выбором последовательности ВС, имеющей наибольшее/наименьшее значение критерия оптимизации. Например, при которой суммарная занятость ВПП занимает меньше времени.

Постановка задачи

Задача – определить зависимость времени снижения средней задержки вылета ВС от интенсивности потока вылетающих ВС за счет упорядочивания очереди из задержанных на вылете ВС. Упорядочивание проводится по критерию минимального времени занятия ВПП очередью. Также проведем расчет, на сколько можно повысить пропускную способность ВПП за счет упорядочивания очереди. Определим требования к *DMAN*, его источники и потребителей информации.

Требования к *DMAN*

Проект *DMAN* должен быть реализован в виде отдельного универсального программного модуля, легко встраиваемого в автоматизированную систему управления воздушным (АС УВД) движением без изменения сетевых интерфейсов других модулей и нарушения ее целостности. Исходя из этого, определим требования к нему:

• способность адаптироваться к любой архитектуре аэропорта;

• модульная архитектура, позволяющая изменять конфигурацию в зависимости от типов и количества источников и потребителей информации;

• достаточно высокая надежность работы и достоверность информации;

• выдача полной информации, потребляемой уже разработанными ЧМИ, обработка поступающих с них команд ядром вычислений *DMAN*;

• возможность работы в режиме обработки вылетов в порядке очереди («первый зарегистрировался – первый вылетел») и в режиме оптимизации очереди по критериям минимума занятия ВПП или минимума расхода топлива, с учетом ограничений на максимальное время задержки вылета и приоритетов ВС;

• возможность взаимодействовать с системой организации потоков прибывающих ВС *Arrival Manager* (*AMAN*) и системой управления аэродромным движением.

Схема взаимодействия *DMAN* с другими модулями АС УВД показана на рис. 1. Источниками информации для модуля маршрутизации являются РЛС, оптические камеры аэродромного наблюдения и системы автоматически зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В) ВС, для *AMAN* – районные РЛС и АЗН-В ВС.

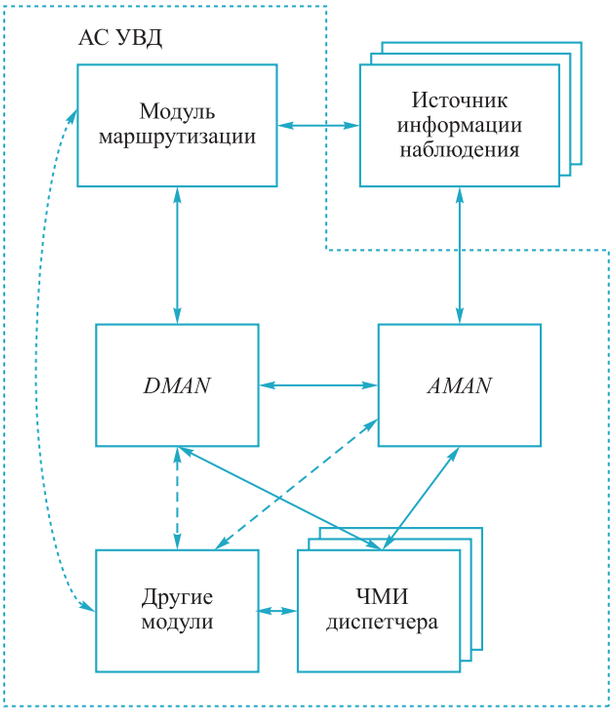


Рис. 1. Взаимодействие *DMAN* с другими модулями системы

DMAN принимает слоты вылета с *AMAN*. С *DMAN* на *AMAN* поступают временные интервалы занятости ВПП вылетающими ВС. На модуль маршрутизации *DMAN* отправляет начальную и конечную точки маршрутов ВС и плановое время предварительного старта. С модуля маршрутизации *DMAN* принимает маршрут руления в виде последовательности 4D-точек. Также *DMAN* принимает плановую информацию с модуля планирования и использования воздушного пространства, может принимать метеорологическую информацию с метеомодуля.

При упорядочивании очереди необходимо учитывать следующие параметры:

• интенсивность взлета и посадки на ВПП;

• пропускная способность ВПП;

• слоты вылетов на ВПП;

• маршруты ВС и техники при аэродромном движении;

• спутный след ВС, зависящий от их массы и типа;

• стандартные маршруты влета (*SID*) и скоростные характеристики ВС;

• приоритет и время задержки ВС;

Оптимизация очереди

Оптимизация заключается в минимизации средней задержки вылетов ВС

$$\Delta W = \sum_{i=1}^{N} \left(t_i^{\text{факт}} - t_i^{\text{план}} \right),$$

где N – количество вылетевших ВС;

$t_i^{\text{факт}}$ – фактическое время вылета ВС;

$t_i^{\text{план}}$ – плановое время вылета ВС.

Фактическое время вылета зависит от порядка впереди идущих ВС, классифицируемых по максимальной взлетной массе.

Основными параметрами, вызывающими задержку являются временны́е интервалы между взлетами ВС, которые установлены Федеральными авиационными правилами в зависимости от времени ожидания рассеяния спутного следа за ВС $t_i^{\text{ож}}$. $t_i^{\text{ож}}(m_i, m_{i-1})$ зависит от массы m_i текущего i-го и предыдущего m_{i-1} (i–1-го) вылетающих ВС [4]. Чем больше максимальная взлетная масса предыдущего ВС и меньше последующего, тем дольше время ожидания.

В соответствии с классификацией *ICAO Doc 8643* ВС по взлетной массе можно разделить на 3 типа: легкие, средние и тяжелые. В таком случае всего будет 9 значений времени задержки, соответствующих всем комбинациям пар из 3 типов. Значения времени задержки удобно хранить в виде матрицы $T_{ож}^{3\times3}$, диагональные элементы которой равны. Для гражданских воздушных судов на территории России элементы матрицы $T_{ож}^{3\times3}$ определяются Федеральными авиационными правилами Российской Федерации.

Интервал времени $t_i^{ож}$ минимизируется за счет изменения порядка ВС в очереди. При формировании порядка необходимо учитывать скорости ВС, чтобы исключить пересечение 4D-траекторий ВС.

Среднее время задержки ВС на l-й ВПП $\bar{\tau}_l$ определяется по формуле

$$\bar{\tau}_l = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} t_i^{ож},$$

где N – количество взлетевших с ВПП ВС.

При привязке мест стоянки ВС к нескольким ВПП нужно минимизировать суммарное среднее время задержки по всем ВПП:

$$\bar{\tau}_\Sigma = \sum_{l=1}^{N_{ВПП}} \bar{\tau}_l \to \min.$$

Здесь $N_{ВПП}$ – количество ВПП.

Эффективность упорядочивания вылетов определяется по формуле

$$\chi_\Sigma = \frac{\bar{\tau}_\Sigma}{\bar{\tau}_\Sigma^*},$$

где $\bar{\tau}_\Sigma$ – среднее время задержки вылетов с аэродрома без оптимизации очереди;

$\bar{\tau}_\Sigma^*$ – среднее время задержки вылетов с аэродрома при оптимизации очереди.

Потенциальные возможности увеличения пропускной способности ВПП

В соответствии с Федеральными авиационными правилами Российской Федерации определим минимальные временны́е интервалы (см. таблицу) между двумя соседними вылетающими ВС [5]. ВС подразделяются по массе на легкие (Л) – менее 7000 кг, средние (С) – более 7000 кг и менее 136 000 кг, тяжелые (Т) – более 136 000 кг.

Минимальные временны́е интервалы между ВС

Первый	Второй		
	Легкие	Средние	Тяжелые
Легкие	1	1	1
Средние	3	1	1
Тяжелые	3	2	2

На примере очереди на вылет, состоящей из 2 легких, 2 средних и 2 тяжелых ВС определим оптимальную и наихудшую последовательности вылетов. Наихудшая последовательность, при которой имеет место наибольшее время занятости ВПП, выглядит следующим образом: Т С Л Т С Л. Эта последовательность обеспечивает 2 + 3 + 1 + 2 + 3 + 1 = 12 минут занятости ВПП. Оптимальная последовательность, при которой обеспечивается наименьшее время занятости ВПП, выглядит так: Л Л Т С С Т. Эта последовательность обеспечивает 1 + 1 + 2 + 1 + 1 + 1 = 7 минут занятости ВПП. Оптимизация порядка вылета ВС в данном примере сокращает занятость ВПП более чем на 41 %.

Моделирование

DMAN представляет собой систему массового обслуживания *M*/*G*/1, на вход которой поступает пуассоновский поток заявленных по плану времени исполнительного старта ВС. Системы *M*/*G*/1 подробно рассмотрены в работе [6]. Поток учитывал 3 весовые категории судов (легкие, средние и тяжелые) в соотношении 0,3, 0,4, 0,3, соответственно.

На рис. 2 показаны полученные путем моделирования зависимости средней задержки вылета от интенсивности потока вылетающих ВС. Величина $\Delta\lambda$ показывает увеличение пропускной способности ВПП за счет минимизации времени занятия ВПП очередью задержанных ВС; ΔW – на сколько снизилась средняя задержка вылетов ВС относительно максимально допустимой задержки. При интенсивности потока вылетов, вызывающей максимально допустимую среднюю задержку вылета в 15 мин $\chi_\Sigma = 1{,}4$.

Заключение

Результаты моделирования показали возможность повышения пропускной способности ВПП на 6,3 % за счет упорядочивания очереди вылетающих ВС по интервалам вылета. Про-

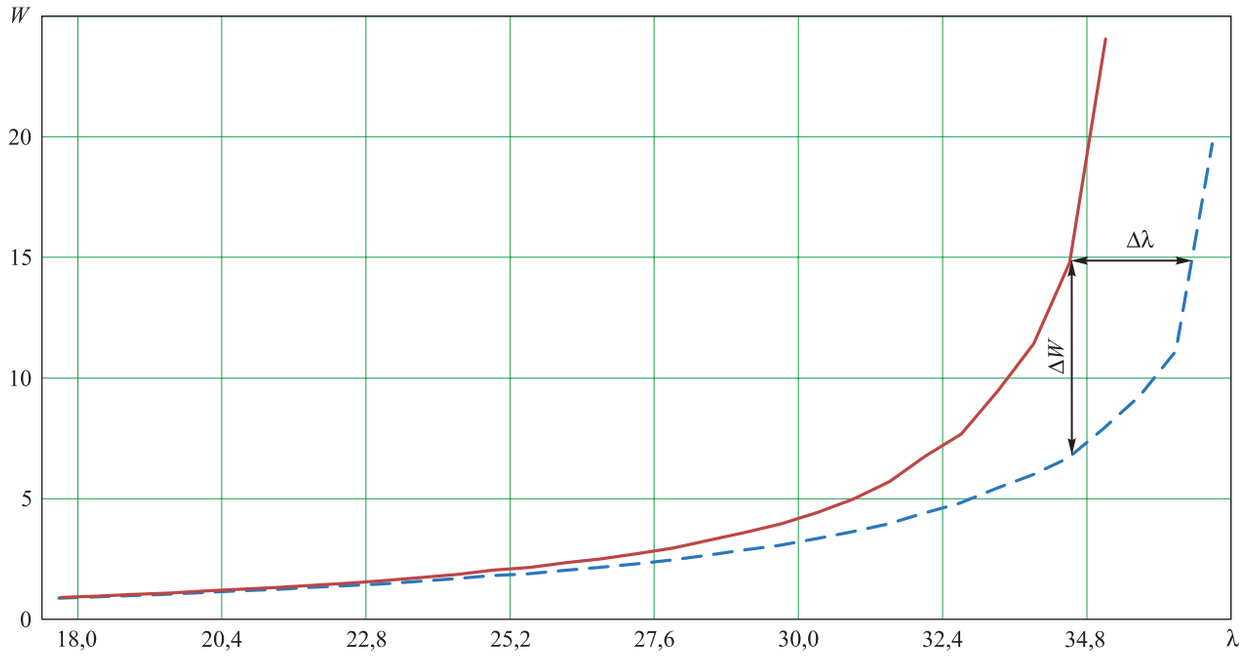


Рис. 2. Зависимость средних значений времени задержки вылета от интенсивности вылетов для оптимизированной (– – –) и неоптимизированной (———) очередей

веден функциональный анализ *DMAN*. Показана целесообразность применения *DMAN* в наиболее загруженных аэропортах России.

Список литературы

1. Глобальный аэронавигационный план на 2016–2030 гг.: 5-е изд. Канада, Монреаль: Международная организация гражданской авиации, 2016. Doc 9750-AN/963.

2. *Taylor A., Wilkinson T., Baseley D.* Operational Requirements Document for EATMP Automated Support to ATS. Vol. 8. Departure Manager / EUROCONTROL. ASA.02.DMAN.DEL03. ORD, 1999.

3. Magill: Departure Manager Feasibility Report / EUROCONTROL. ASA.02.DMAN.DEL05. FEA, 1999.

4. Автоматизированные системы управления воздушным движением / *А. Р. Бестугин*, *Ю. Г. Шатраков*, *М. А. Велькович* и др. СПб.: Политехника, 2013. 450 с.

5. Приказ Минтранса РФ от 31 июля 2009 г. № 128 «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями).

6. *Соколов А. Н.*, *Соколов Н. А.* Однолинейные системы массового обслуживания. СПб.: Изд-во «Теледом» ГОУВПО СПбГУТ, 2010. 112 с.

Поступила 29.01.19

Княжский Александр Юрьевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Акционерного общества «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (АО «ВНИИРА»), г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: обработка информации, управление воздушным движением.

Плясовских Александр Петрович – доктор технических наук, научный сотрудник Акционерного общества «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (АО «ВНИИРА»), г. Санкт-Петербург.
Область научных интересов: обработка информации, управление воздушным движением.

Increase of runway capacity using the Departure Manager

The study proposes the operating principle of the electronic Departure Manager (DMAN). The principle forms recommendations to the dispatcher on streamlining the queue of delayed aircraft, which minimizes the runway occupancy time. The requirements for the manager and the possibility of its integration into the air traffic control system are determined. The simulation results showed the feasibility of introducing an electronic manager in the busiest airports and the possibility of increasing the capacity of the runway by more than 6 %.

Keywords: capacity, runway, efficiency, aircraft, optimization, departure.

Knyazhskiy Aleksandr Yurevich – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow, Joint Stock Company "VNIIRA", Saint Petersburg.
Science research interests: information processing, air traffic control.

Plyasovskikh Aleksandr Petrovich – Doctor of Engineering Sciences, Research Fellow, Joint Stock Company "VNIIRA", Saint Petersburg.
Science research interests: information processing, air traffic control.

УДК [623.4.011+004.45] : 623.746.4-519

А. Г. Рыбалко, А. В. Ананьев,
А. В. Лазорак, Р. П. Клевцов

Программное обеспечение определения потребных нарядов ударных беспилотных летательных аппаратов малого класса для поражения наземных целей

Представлено специальное программное обеспечение, позволяющее повысить оперативность подготовки исходных данных и выполнения штурманских расчетов при планировании ударных действий беспилотных летательных аппаратов малого класса по наземным объектам. Разработаны способы измерения координат точек падения макетов средств поражений, в результате интеграции которых удалось сократить время определения параметров рассеивания габаритно-массовых макетов средств поражений беспилотных летательных аппаратов малого класса – свободнопадающих неуправляемых контейнеров в два раза, а также существенно повысить достоверность статистических данных. Приведены закономерности распределения и точностные характеристики ударного беспилотного авиационного комплекса, полученные с помощью указанного программного средства во время проведения заводских испытаний по оценке точности сброса габаритно-массовых макетов свободнопадающих неуправляемых контейнеров. Разработанное специальное программное обеспечение позволяет определять потребные наряды беспилотных летательных аппаратов и автоматизировать подготовку отчетной документации.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, специализированное программное обеспечение, статистическая оценка, рассеивание средств поражения, эффективность поражения целей, заводские испытания, свободнопадающий неуправляемый контейнер.

В последние годы появилось новое средство вооружения – ударные беспилотные летательные аппараты малого класса (БПЛА МК) [1–5], взлетная масса которых менее 30 кг. Преимуществами использования данных БПЛА являются низкие затраты на изготовление, невысокие требования к уровню подготовки операторов управления БПЛА, а также низкая уязвимость к средствам противовоздушной обороны противника вследствие малой заметности в различных диапазонах длин волн [6].

В то же время экспериментально доказана возможность высокоточного применения макетов средств поражения (СП) с БПЛА МК на расстоянии от места взлета до 300 км [7]. При этом СП для БПЛА МК являются свободнопадающие неуправляемые контейнеры (СНК), снаряжаемые боеприпасами ударного и дистанционного действия [8, 9], которые можно выделить в новый класс в общей номенклатуре авиационных средств поражения (АСП).

Учитывая дальность управления и точность сброса, БПЛА МК можно применять совместно с пилотируемой авиацией для решения ударных задач в оперативной и оперативно-тактической глубине [10]. Это позволяет обоснованно утверждать, что отечественные БПЛА МК являются ударным средством, способным наносить ущерб наземным объектам. Таким образом, возникает интерес определения необходимого количества БПЛА МК и СНК (потребных нарядов) при планировании нанесения удара по наземным объектам.

В пилотируемой авиации в основе математического аппарата [11] определения потребных нарядов самолетов и АСП лежит знание о закономерностях рассеивания АСП: известные значения среднего квадратического отклонения (СКО), вероятного отклонения (ВО) АСП, а также математического ожидания (центра рассеивания АСП) [12]. При этом численные значения СКО определяются в соответствующих научных и исследовательских организациях путем статистической обработки ежегодно поступающих из авиационных частей данных о результатах боевого применения АСП при выполнении учебно-тренировочных полетов. Очевидно, что и для ударной беспилотной авиации необходимо выполнять такие же мероприятия по определению закономерностей рассеивания и вычисления систематической ошибки сброса (ошибки бомбометания) и параметров рассеивания АСП. Однако высокая интенсивность полетов и большее количество, по сравнению с пилотируемой авиацией, удар-

© Рыбалко А. Г., Ананьев А.В., Лазорак А. В., Клевцов Р. П., 2019

ных БПЛА МК накладывает определенные ограничения при определении ошибки бомбометания БПЛА МК новых серий. В связи с этим для сокращения времени обработки результатов и определения параметров рассеивания СНК данные мероприятия актуально выполнять непосредственно в полевых условиях.

Для определения систематической ошибки сброса требуются анализ и обработка больших массивов полетных данных и результатов применения СНК, что приводит к существенным временны́м затратам и дополнительной нагрузке на должностных лиц и личный состав расчетов наземных пунктов управления формирований БПЛА. Повышение скорости обработки статистических данных применения СНК и определения потребных нарядов достигается за счет автоматизации данного процесса.

В пилотируемой авиации средствами автоматизации обработки полигонных данных и определения потребных нарядов является специальное программное обеспечение (СПО): СПО «Планшет полигона» [13]; наземный автоматизированный комплекс подготовки полетных заданий (НАК ППЗ) [14]; универсальный комплекс автоматизированной подготовки полетных данных (УКА ППД) [15]. По результатам анализа возможностей указанных СПО можно заключить, что данные средства автоматизации не могут быть использованы в полной мере для обработки статистических данных, определения закономерностей рассеивания СНК и систематической ошибки сброса БПЛА МК и оценки эффективности применения СНК при поражении наземных объектов.

Так, например, в основу расчетных алгоритмов СПО «Планшет полигона» заложен метод триангуляции (способ засечек) [16], который используется для определения координат точек падения АСП, что существенно облегчает работу группы руководства полетами на авиационном полигоне. В то же время обработать статистические данные и выполнить оценку эффективности применения СП (определить вероятность поражения наземной цели) с должной оптимизацией не представляется возможным.

В другом средстве автоматизации – НАК ППЗ – реализованы вычислительные алгоритмы зонной методики [17], которые позволяют оценить эффективность применения любого АСП, имеющегося в номенклатуре пилотируемой авиации, по различным группам наземных объектов, определяемыми руководящими документами. Недостатком данного комплекса является отсутствие возможности обработки статистических данных результатов боевого применения АСП для определения их закономерностей и параметров рассеивания.

Следующим средством автоматизации, поступающим на снабжение в авиационные части, является УКА ППД. По сути, это сложная информационная система, для управления которой требуются операторы-пользователи из состава должностных лиц штурманской службы высокого профессионального уровня подготовки. УКА ППД позволяет обрабатывать статистические данные результатов боевого применения и определять параметры рассеивания АСП. Кроме того, с помощью УКА ППД можно выполнить оценку эффективности применения АСП при поражении одиночных, групповых и площадных наземных объектов, определить необходимое количество АСП, а также выбрать рациональный состав боевой зарядки и тип АСП. Однако использование УКА ППД для оценки эффективности применения БПЛА МК и СНК не представляется возможным, так как в расчетных алгоритмах комплекса не интегрированы специальные способы обмера, а также не реализована возможность смещения точки прицеливания, тем самым не учитываются особенности средств поражения БПЛА МК, в частности, малый калибр и малая мощность.

Следовательно, возникает необходимость разработки нового средства автоматизации, обеспечивающего выявление закономерностей рассеивания СНК, вычисления точностных характеристик БПЛА и определения необходимого количества БПЛА и СНК при планировании мероприятий по поражению наземных объектов.

Цель работы – разработка специального программного обеспечения определения потребных нарядов ударных БПЛА МК для поражения наземных целей, учитывающего особенности применяемых авиационных средств поражения.

Для достижения поставленной цели разработано СПО «Система поддержки принятия решений ударных беспилотных летательных аппаратов (СППР УБПЛА) «Пересвет» [18], позволяющее решать следующие задачи:

• осуществление учета, обработки, хранения и графического отображения статистических полигонных данных результатов применения СНК с БПЛА МК в различных условиях сброса (параметров полета БПЛА), формирование базы данных результатов сброса;

• автоматизированное определение систематической ошибки сброса серийного БПЛА МК (параметров рассеивания СНК) методами математической статистики. Формирование базы данных точностных характеристик БПЛА МК;

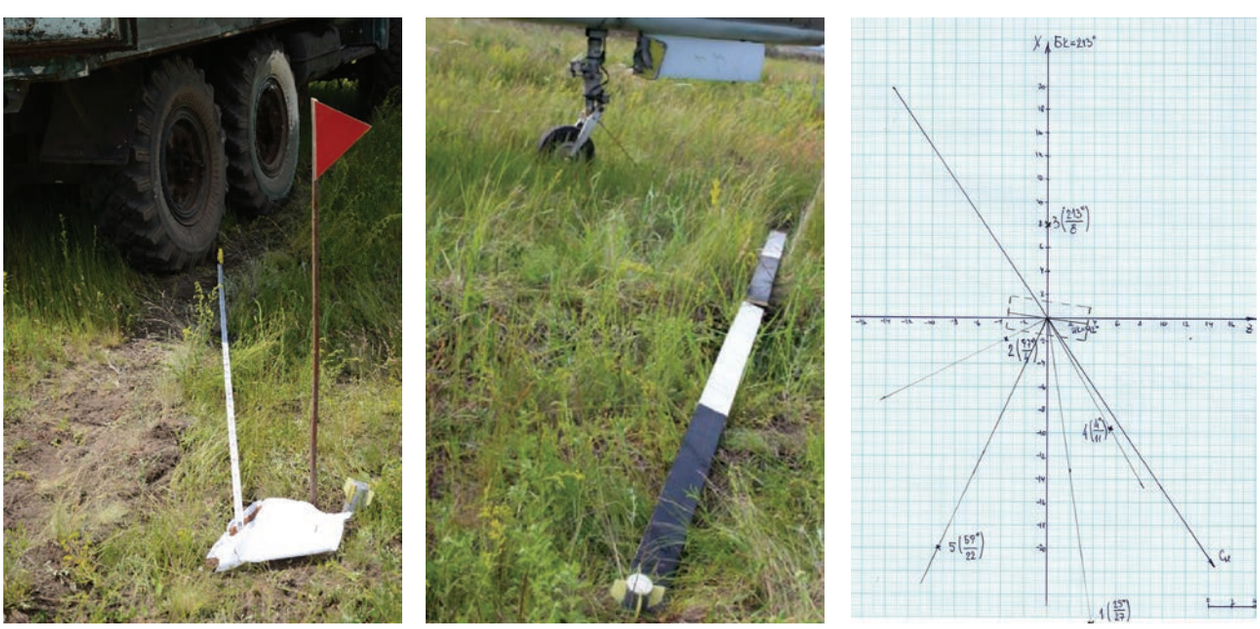
• определение рационального положения точки прицеливания БПЛА МК для повышения вероятности попадания СНК в различных условиях сброса в наземную цель, заложенную в базу данных СПО;

• автоматизированное определение необходимого количества ударных БПЛА МК и СНК для поражения наземной цели с заданной вероятностью на основе нового научно-методического аппарата;

• автоматизированное формирование формализованной документации учета результатов сброса СНК с БПЛА МК.

Стоит отметить, что идея разработки СПО «Пересвет» возникла во время проведения экспериментальных исследований по сбросу габаритно-массовых макетов (ГММ) СНК с БПЛА МК [7, 19]. На рис. 1 показан процесс определения радиального отклонения точки падения ГММ СНК во время проведения экспериментальных исследований способом обмера. Для определения координат точек падения ГММ СНК использованы способы обмера мерной лентой (см. рис. 1, а) и дальномерной рейкой (см. рис. 1, б) [16].

Однако в преддверии подготовки к заводским испытаниям ударных БПЛА МК по оценке точности, предполагавшим набор достаточного объема статистических данных о рассеивании макетов средств поражений, стало очевидно следующее. Во-первых, использование мерных лент приведет к неприемлемым временны́м затратам проводимых измерений в условиях высокой интенсивности полетов. Во-вторых, сильно растянутые по времени испытания неизбежно сопровождались бы существенными изменениями погодных условий,



а б в

Рис. 1. Варианты реализации способа обмера в ходе проведения эксперимента:
а – с использованием мерной ленты; б – с использованием дальномерной рейки; в – обработка результатов применения ГММ СНК

что привело бы к снижению достоверности экспериментально определяемых закономерностей и параметров рассеивания. Отметим, что все расчеты по преобразованию полярных координат точек падения ГММ СНК в прямоугольные выполнены вручную, результаты отображены на миллиметровой бумаге (см. рис. 1, в).

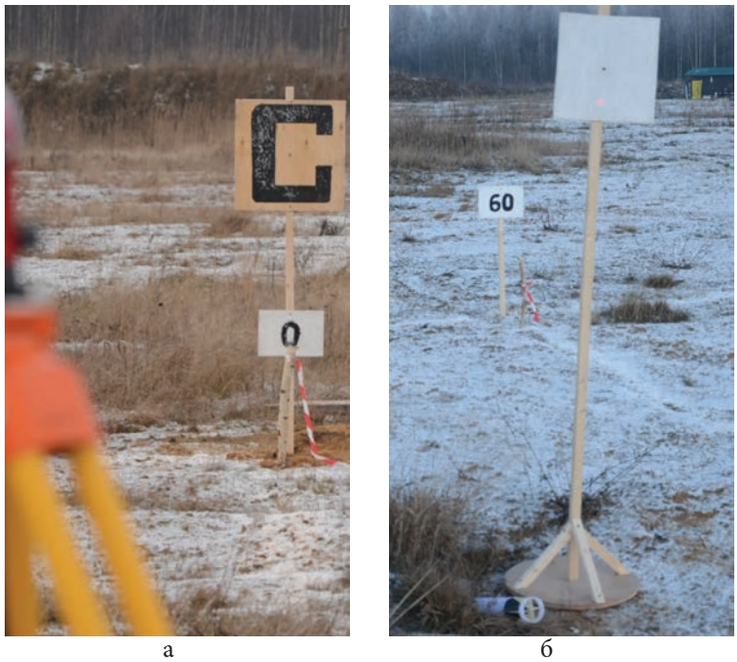
Данные факторы показали необходимость разработки новых способов определения координат точек падения ГММ СНК, сущность которых раскрыта в работе [20]. Оба разработанных способа основаны на методе прямых и косвенных измерений с использованием светодальномерных измерительных устройств с зондирующим лазерным сигналом [21]. Так, в способе № 1 в центре мишени устанавливается это устройство, а в точку падения ГММ СНК – светоотражатель. Определяется азимут ($А_{тп}$) и дальность ($Д_{тп}$) до точки падения ГММ СНК. На рис. 2 показана реализация предложенного способа измерения координат точки падения СНК в ходе практических испытаний ударных БПЛА МК.

Сущность способа № 2 заключается в установке измерительного устройства за пределами мишени. Измеряются азимут ($А_м$) и дальность ($Д_м$) до центра мишени. В каждую точку падения ГММ СНК устанавливается светоотражатель и измеряется азимут ($А_{тп}$) и дальность ($Д_{тп}$) точки падения ГММ СНК. Далее с помощью тригонометрических выражений происходит вычисление азимута и радиального отклонения точки падения ГММ СНК относительно центра мишени. Выбор способа зависит от интенсивности сброса СНК (малая или большая серия испытаний).

Предложенные новые способы определения координат точек падения СНК были интегрированы в СПО «Пересвет». Кроме того, для оценки эффективности применения БПЛА МК с учетом специфики СНК было необходимо разработать новый научно-методический аппарат [22], который и является основой работы расчетных модулей данного средства автоматизации. В частности, алгоритм работы СПО «Пересвет» (рис. 3) позволяет определить вероятность попадания СНК в цель (P_i) в зависимости от положения точки прицеливания (координаты x_i, z_i). При этом задается диапазон координат смещения точки прицеливания по осям:

$x_н \ldots x_к$ – начальное и конечное положение точки прицеливания по дальности;

$z_н \ldots z_к$ – начальное и конечное положение точки прицеливания по направлению.



а б

Рис. 2. Практическая апробация нового способа измерения отклонений ГММ СНК:
а – измерение координат центра мишени; б – измерение координат точки падения ГММ СНК

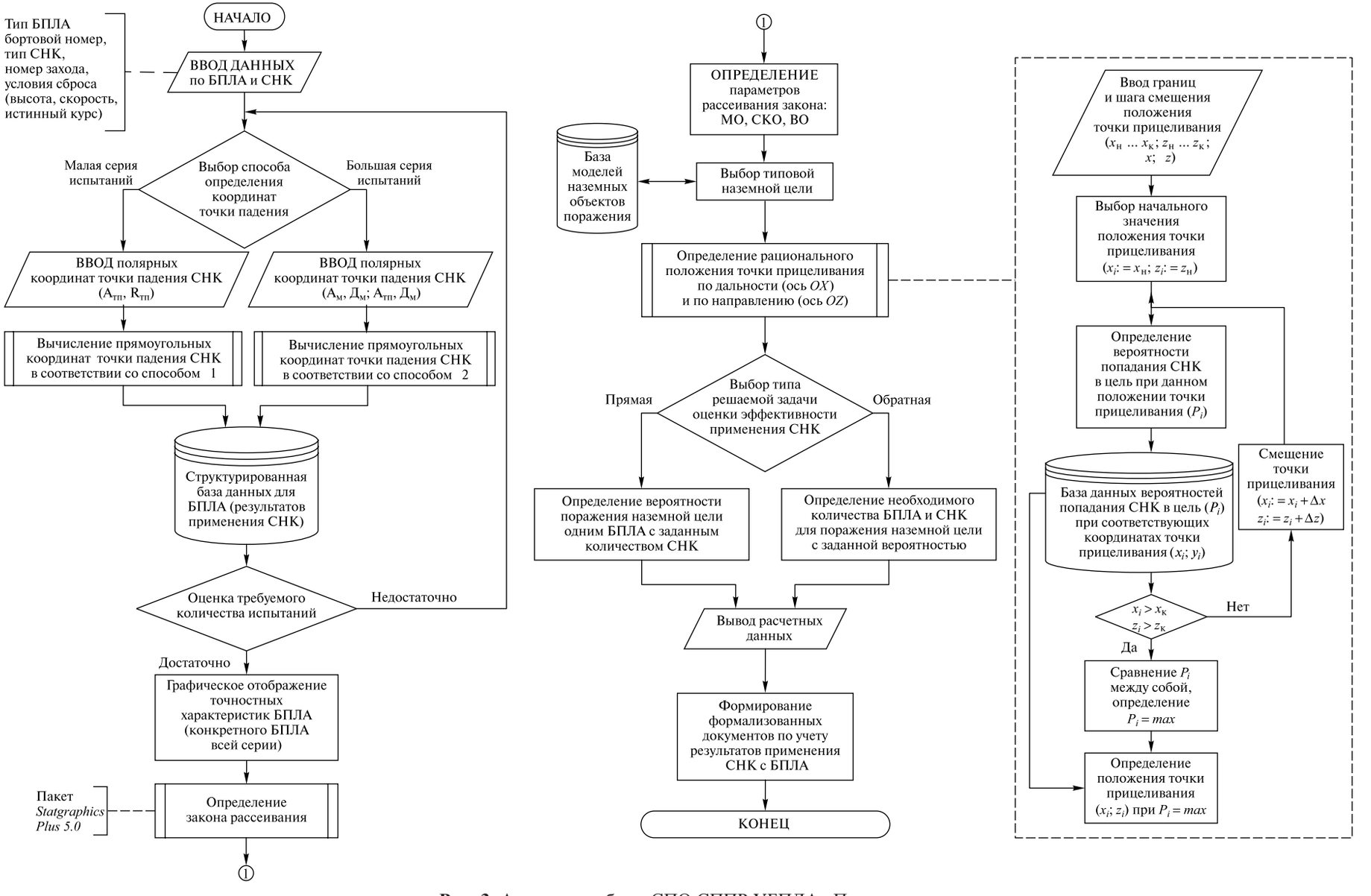


Рис. 3. Алгоритм работы СПО СППР УБПЛА «Пересвет»

Затем выбирается шаг смещения положения точки прицеливания по дальности и направлению (Δx, Δz), определяется начальное положение точки прицеливания и вычисляется вероятность попадания СНК в цель (P_i). Полученные результаты заносятся в базу данных СПО, в которой сохраняются все значения вероятности попадания при определенных координатах положения точки прицеливания (x_i, z_i).

Впоследствии положение точки прицеливания смещается по дальности и по направлению на значение выбранного шага смещения (Δx, Δz) и цикл повторяется. В итоге работы алгоритма выбирается рациональное положение точки прицеливания по дальности и по направлению, путем сравнения между собой всех вероятностей попадания СНК в цель (P_i) по максимальному числовому значению. Координаты точки прицеливания, которым соответствует максимальная вероятность попадания СНК в цель, и являются рациональными.

Структурно СПО СППР УБПЛА «Пересвет» включает в себя пять связанных между собой функциональных модулей: модуль ввода исходных данных; модуль обработки статистических данных сбросов СНК; модуль определения точки прицеливания БПЛА; модуль определения потребных нарядов БПЛА МК и СНК; модуль формирования отчетной документации. Функциональная схема СПО СППР УБПЛА «Пересвет» показана на рис. 4.

Модуль ввода исходных данных запускает начальную фазу работы СПО. Он предназначен для формирования БД и последующего ее заполнения исходными данными по БПЛА, СНК, характеристиками мишенного поля, ус-

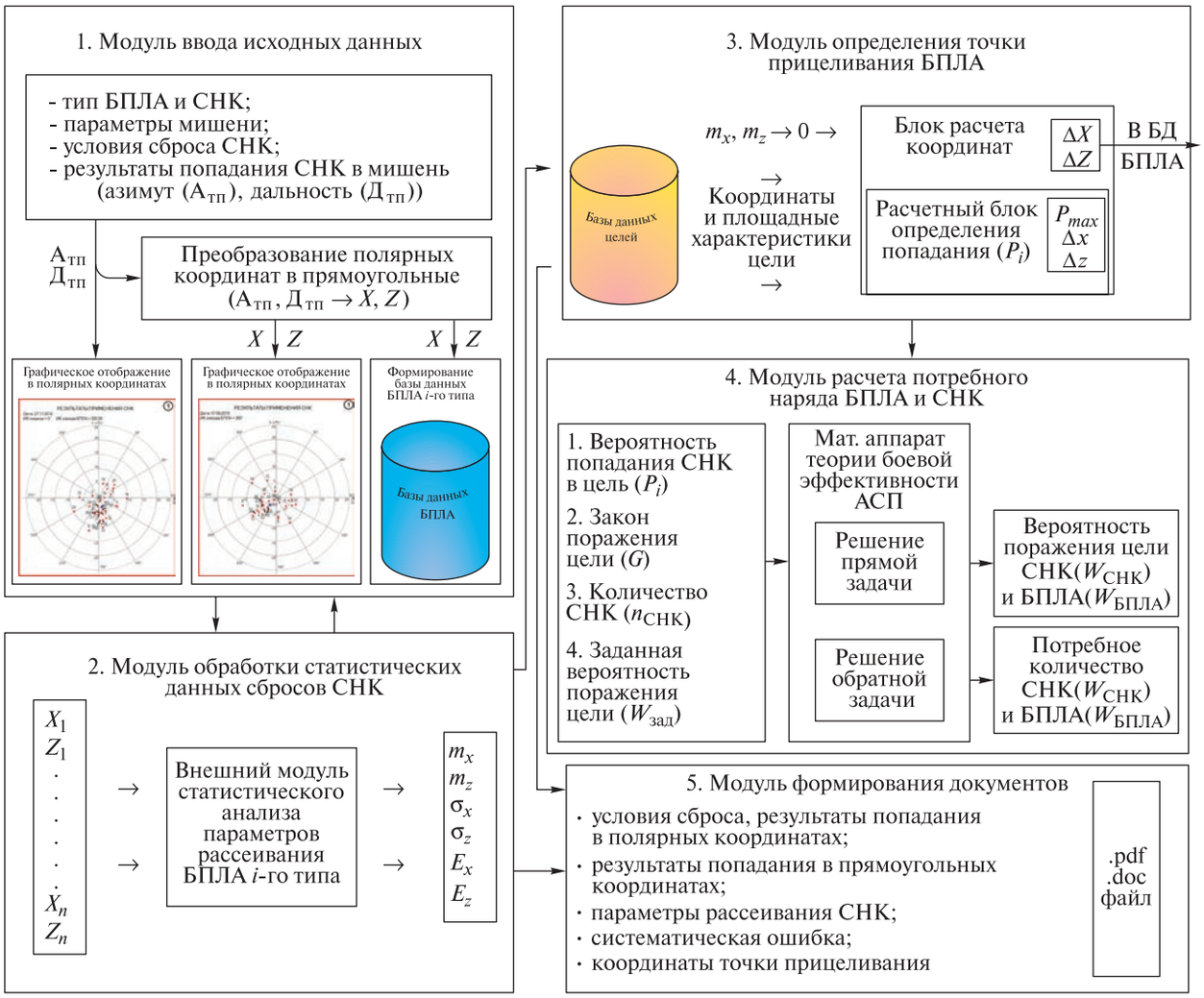


Рис. 4. Функциональная схема СПО СППР УБПЛА «Пересвет»:
БД – база данных

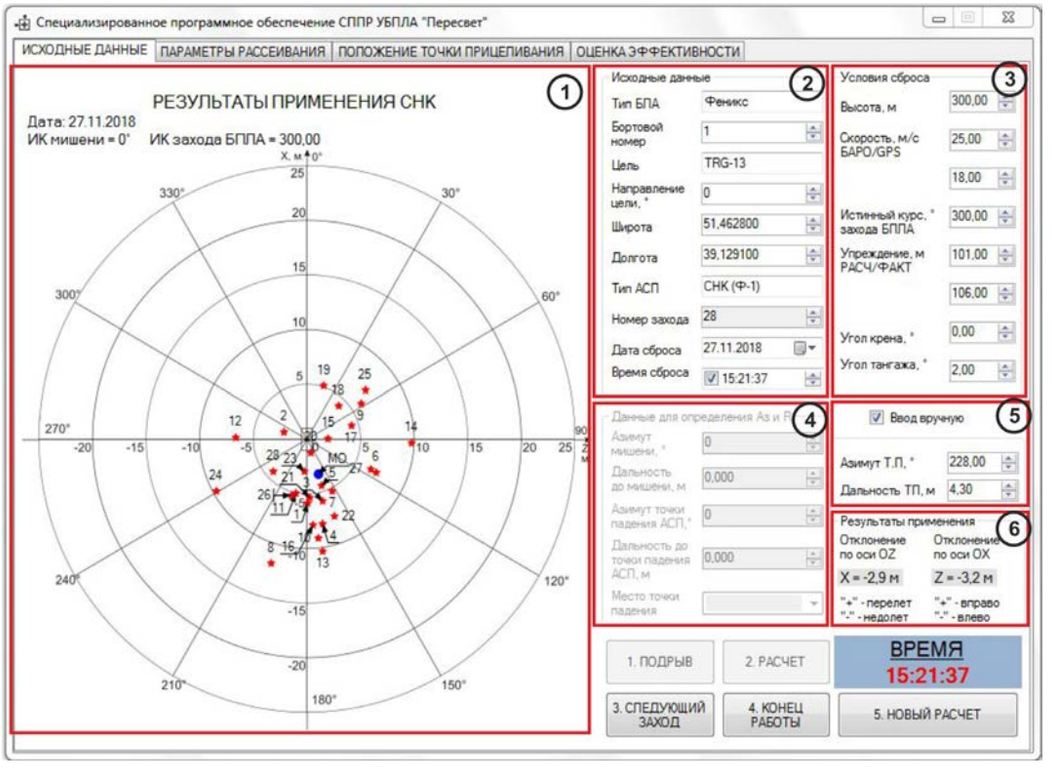


Рис. 5. Интерфейс модуля ввода исходных данных в СПО «Пересвет»:
1 – графическое поле отображения результатов применения СНК; 2 – блок ввода данных по БПЛА и СНК; 3 – блок ввода условий сброса СНК; 4, 5 – блоки ввода данных для определения отклонений точек падения СНК; 6 – блок отображения численного значения результата применения СНК

ловиям сброса СНК, а также результатами применения СНК. В данный модуль интегрирован математический аппарат вновь разработанных способов определения координат точек падения СНК. Графическая часть функционального модуля обеспечивает отображение результатов применения СНК на схеме мишенного поля, ориентированного относительно выбранного начала отсчета (магнитного, истинного меридиана). Графический интерфейс данного функционального модуля СПО «Пересвет» отображен на рис. 5.

Полученные экспериментальные статистические данные результатов применения СНК аккумулируются в БД СПО «Пересвет» и используются в *модуле обработки статистических данных* сбросов СНК для определения закономерностей и вычисления параметров рассеивания СНК. Вид закона распределения эмпирических данных о координатах точек падения СНК определяется посредством внешнего программного средства, в качестве которого в работе на текущем этапе разработки СПО применялся статистический пакет прикладных программ *Statgraphics Plus 5.0* [23, 24]. Результат обработки данных, полученных в ходе проведения экспериментальных исследований, с помощью программы *Statgraphics Plus 5.0* приведен ниже. В дальнейшем в СПО «Пересвет» планируется создать дополнительный функциональный модуль по определению вида распределения, чтобы исключить внешние программные средства. Графический интерфейс при работе с функциональным модулем обработки статистических данных в СПО «Пересвет» представлен на рис. 6.

Полученные значения параметров рассеивания СНК передаются в следующие функциональные модули: модуль исходных данных (в БД БПЛА); модуль определения положения точки прицеливания; модуль формирования формализованных документов учета результатов применения СНК.

В *модуле определения точки прицеливания БПЛА* СПО «Пересвет» по выбранной из БД наземной цели осуществляется автоматизи-

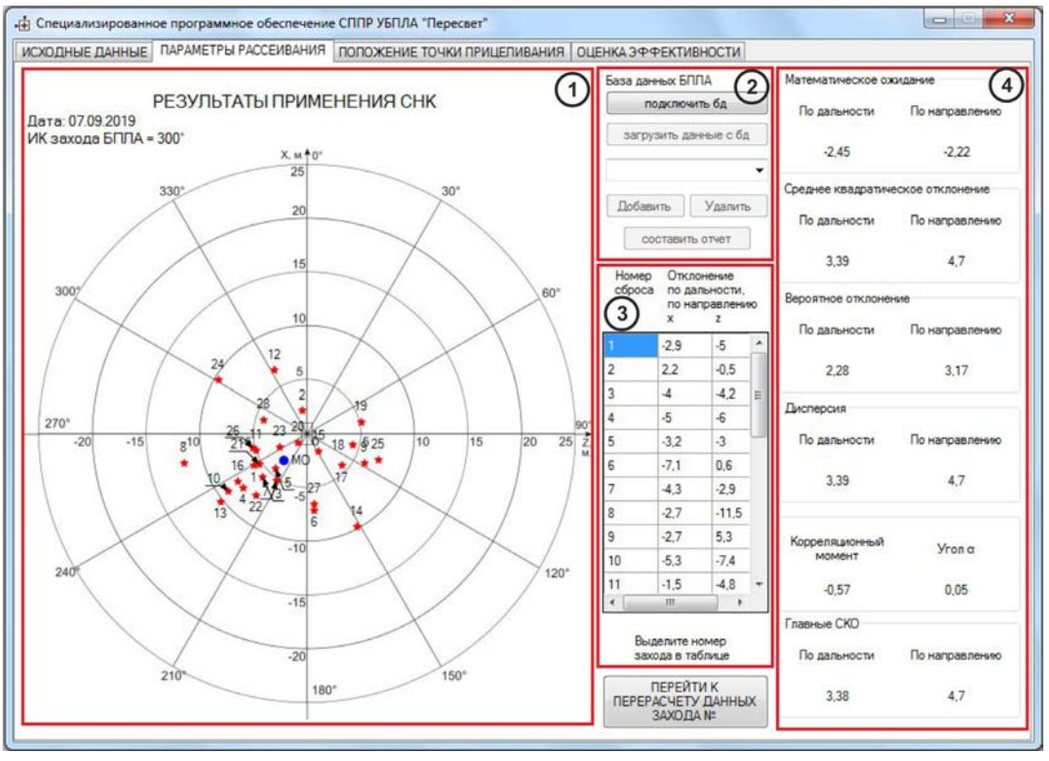


Рис. 6. Интерфейс модуля определения параметров рассеивания СНК:
1 – графическое поле отображения результатов применения СНК; 2 – блок отображения статистических данных точек падения СНК; 3 – блок отображения параметров рассеивания СНК

рованное определение положения точки прицеливания БПЛА по дальности и направлению с учетом рассчитанных значений параметров рассеивания – математического ожидания отклонений точек падения СНК (центра рассеивания) по дальности и направлению (m_x, m_z); среднего квадратического отклонения (СКО) точки падения СНК (σ_x, σ_z); вероятного отклонения точки падения СНК (E_x, E_z). В настоящее время БД наземных целей включают характеристики типовых легкоуязвимых наземных объектов: самолетов тактической авиации; десантно-транспортных вертолетов; радиолокационных станций (РЛС) наведения, целеуказания и подсвета цели зенитно-ракетного комплекса (ЗРК) средней дальности (СД); командно-штабных машин; автомобильных радиостанций; аппаратной связи. Алгоритм расчета (см. рис. 3, выноска «блока определения рационального положения точки прицеливания по дальности и по направлению» общего алгоритма работы СПО СППР УБПЛА «Пересвет») включает в себя следующие шаги.

1. Задаются границы смещения точки прицеливания по дальности и направлению ($x_н \ldots x_к$; $z_н \ldots z_к$).

2. Задается шаг смещения точки прицеливания (Δx; Δz).

3. Выбирается начальное положение точки прицеливания ($x_0 = x_н$; $z_0 = z_н$).

4. Вычисляется вероятность попадания СНК в каждую i-ю уязвимую зону цели ($P_i(x)$) с помощью выражения

$$P_i(x) = \left[\Phi\left(\frac{x_2 - m_x - x_i}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - m_x - x_i}{\sigma_x}\right)\right] \times \left[\Phi\left(\frac{z_2 - m_z - z_i}{\sigma_z}\right) - \Phi\left(\frac{z_1 - m_z - z_i}{\sigma_z}\right)\right]. \quad (1)$$

Здесь Ф – функция Лапласа;

x_1, x_2, z_1, z_2 – координаты сторон i-й уязвимой зоны;

m_x, m_z – центр рассеивания СНК (математическое ожидание);

σ_x, σ_z – СКО СНК по осям OX и OZ;

x_i, z_i – координаты точки прицеливания по дальности и по направлению, определяемые по формулам

$$x_i = x_0 + \Delta x, \quad z_i = z_0 + \Delta z. \quad (2)$$

где x_0, z_0 – начальное положение точки прицеливания;

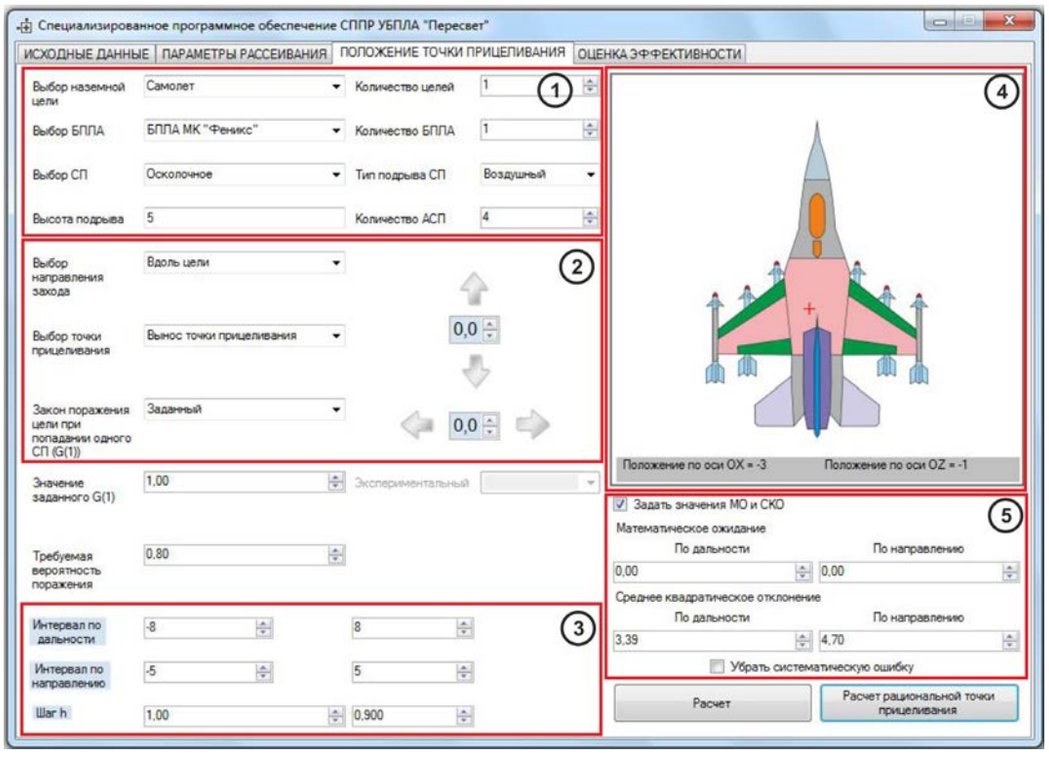


Рис. 7. Интерфейс модуля определения положения точки прицеливания БПЛА: 1 – блок ввода данных по оценке эффективности применения СНК; 2 – блок ввода данных для выбора точки прицеливания; 3 – блок ввода данных для автоматизации выбора точки прицеливания; 4 – графическое поле отображения положения точки прицеливания; 5 – блок ручного ввода параметров рассеивания СНК

Δx; Δz – величина шага смещения точки прицеливания по дальности и по направлению.

5. Определяется вероятность попадания СНК в цель $P(x)$ как суммарное значение вероятностей попадания СНК во все уязвимые зоны.

6. Значение вероятности из шага 5 заносится в БД функционального модуля.

7. Изменяется положение точки прицеливания на заданный шаг смещения, затем повторяются шаги 1–6.

8. После просчета всех вариантов положения точек прицеливания в функциональном блоке выполняется сравнение вероятностей попадания СНК между собой и определяется максимальное ее значение.

9. Из БД функционального блока выбираются координаты точки прицеливания, соответствующие значению максимальной вероятности попадания СНК в цель, т. е. определяется рациональное положение точки прицеливания БПЛА.

На рис. 7 показан графический интерфейс СПО «Пересвет» по определению рационального положения точки прицеливания БПЛА.

Рациональное положение точки прицеливания используется в СПО «Пересвет» в *модуле определения потребного наряда БПЛА и СНК* при решении прямой и обратной задачи оценки эффективности применения СНК с БПЛА, с учетом специфики СНК. То есть определения вероятности поражения наземной цели одним СНК, одним БПЛА с полным боекомплектом (прямая задачи) и необходимого количества БПЛА и СНК для поражения наземной цели с заданной (гарантированной) вероятностью.

Для учета особенностей СП БПЛА, в частности, малой мощности и малого калибра СНК, в вычислительную часть функционального модуля СПО помимо известного вероятностного подхода [25, 26] заложен альтернативный вариант определения наносимого ущерба на основе теории рисков [22]. Реализация нового подхода достигается путем выбора значения «экспериментальный» в поле «закон поражения цели при попадании одного СП» (см. рис. 7, блок 1). При этом в расчетную

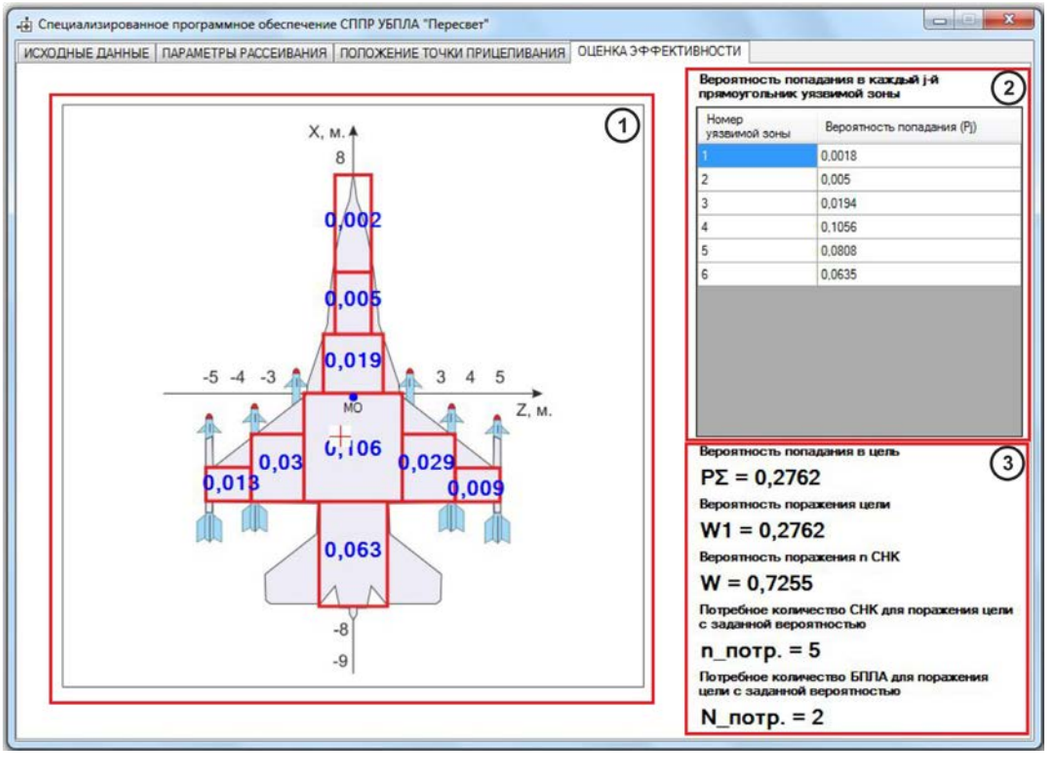


Рис. 8. Интерфейс модуля по определению потребных нарядов БПЛА:
1 – графическое поле вероятности попадания СНК в цель; 2 – информационный блок вероятности попадания СНК в уязвимые зоны; 3 – блок результатов оценки эффективности применения СНК с БПЛА

часть СПО автоматически вводятся обобщающие коэффициенты для определения наносимого ущерба наземной цели. Результаты решения прямой и обратной задачи оценки эффективности применения СНК отображаются в данном модуле СПО на информационно-графическом поле (рис. 8, блок 1).

Заключительный этап работы СПО СППР УБПЛА «Пересвет» реализуется с помощью *модуля формирования документов*. С помощью этого модуля можно формировать формализованную отчетную документацию учета результатов применения СНК с ударных БПЛА МК в различных текстовых форматах (файлы с расширениями **.pdf*, **.docx*) в форме таблицы. Кроме результатов применения СНК в таблице также указываются точностные характеристики БПЛА: систематическая ошибка сброса БПЛА и параметры рассеивания СНК. В качестве примера ниже приведена табл. 1, содержащая результаты экспериментальных сбросов ГММ СНК в ходе заводских испытаний ударного БПЛА МК.

С помощью анализа и обработки полученных экспериментальных данных методами математической статистики [27, 28] в программе *Statgraphics Plus 5.0* определяется вид закона распределения точек падения ГММ СНК. В качестве возможных законов распределений использованы распределения Коши, Лапласа, логистическое, нормальное, равномерное распределения. Эмпирические данные статистического ряда были проверены по критерию согласия χ^2 Пирсона и критерию Колмогорова – Смирнова при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$. Результаты проверки представлены в табл. 2, 3.

На рис. 9 приведены гистограмма частот и графики кумулятивных кривых эмпирических распределений с наложением на них графиков плотностей и функций проверяемых видов распределений.

В результате исследований определено, что вид распределения координат точек падения СНК наилучшим образом соответствует нормальному закону распределения, поэтому именно он лежит в основе расчетных алгоритмов функционального модуля обработки статистических данных сбросов СНК. Это позволило экспериментально определить законо-

Таблица 1

Результаты применения СНК с экспериментального БПЛА МК «Феникс» 27.11.2018 г.

№ п/п	Дата	Тип БПЛА	Борт. номер	Цель (коорд.)	Тип АСП	№ вылета	№ захода	Время фактич.	Высота применения, м	Скорость применения, м/с БАРО/ *GPS*	Истинный курс	Угол крена/ тангажа	Азимут точки падения	Удаление точки падения, м	Отклонение по оси *OX*, м перелет/ недолет	Отклонение по оси *OZ*, м вправо/ влево	Математическое ожидание точек падения СНК (МО)		Среднее квадратическое отклонение точек падения СНК (СКО)		Вероятное отклонение точек падения СНК (ВО)	
																	по дальности	по направлению	по дальности	по направлению	по дальности	по направлению
1	27.11.2018	Феникс	976	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)	1	1	09:15	300	17,9 16,0	300	0,7 2,6	180	5,8	–2,93	–5,03	–1,16	–3,06	5,2	1,9	3,5	1,2
2	27.11.2018	Феникс	976	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)		2	09:21	300	22,8 20,0	300	–0,3 1,6	286	2,3	2,27	–0,57						
3	27.11.2018	Феникс	976	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)		3	9:27	300	17,9 16,0	300	0,2 1,1	166	5,8	–4,06	–4,21						
4	27.11.2018	Феникс	976	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)		4	9:33	300	22,8 20,0	300	0,2 1,1	170	7,9	–5,12	–6,05						
5	27.11.2018	Феникс	978	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)	2	1	10:05	300	24,0 22,0	300	0,2 1,1	192	5,0	–1,52	–4,80						
6	27.11.2018	Феникс	978	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)		2	10:12	300	17,9 16,0	300	0,2 1,1	271	6,8	5,95	–3,24						
7	27.11.2018	Феникс	978	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)		3	10:18	300	20,0 18,0	300	0,7 2,6	130	8,7	–8,51	–1,56						
8	27.11.2018	Феникс	978	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)		4	10:24	300	24,0 22,0	300	–0,3 1,6	187	4,3	–1,67	–3,95						
9	27.11.2018	Феникс	976	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)	3	1	10:48	300	22,9 21,0	300	0,2 1,1	198	2,1	–0,43	–2,03						
10	27.11.2018	Феникс	976	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)		2	10:54	300	17,4 16,0	300	0,5 2,5	237	7,5	3,44	–6,66						
11	27.11.2018	Феникс	976	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)		3	10:59	300	20,0 18,0	300	–0,2 2,5	138	1,9	–1,82	–0,59						
12	27.11.2018	Феникс	976	*TRG*-1 60,07512 30,53031	СНК (РГО)		4	11:06	300	20,5 8,60	300	–0,6 –0,4	180	5,8	–4,59	–2,20						

Таблица 2

Результаты проверки распределения точек падения СНК по оси *OX*

Параметр	Законы распределения случайных величин				
	Коши	Лапласа	Логистический	Нормальный	Равномерный
Результаты проверки по критерию согласия χ^2 Пирсона					
Статистика χ^2	17,80	15,25	13,55	9,30	22,90
Число степеней свободы	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Уровень значимости	0,216	0,361	0,483	0,811	0,061
Результаты проверки по критерию согласия Колмогорова – Смирнова					
Статистика D_n^+	0,088	0,121	0,095	0,088	0,128
Статистика D_n^-	0,102	0,065	0,057	0,05	0,162
Статистика D_n	0,102	0,121	0,095	0,088	0,162
Уровень значимости	0,799	0,602	0,863	0,916	0,243

Таблица 3

Результаты проверки распределения точек падения СНК по оси *OZ*

Параметр	Законы распределения случайных величин				
	Коши	Лапласа	Логистический	Нормальный	Равномерный
Результаты проверки по критерию согласия χ^2 Пирсона					
Статистика χ^2	17,80	16,95	11,00	8,450	16,95
Число степеней свободы	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Уровень значимости	0,216	0,259	0,686	0,864	0,259
Результаты проверки по критерию согласия Колмогорова – Смирнова					
Статистика D_n^+	0,115	0,128	0,093	0,077	0,070
Статистика D_n^-	0,094	0,096	0,078	0,073	0,231
Статистика D_n	0,115	0,128	0,093	0,077	0,231
Уровень значимости	0,660	0,537	0,873	0,971	0,027

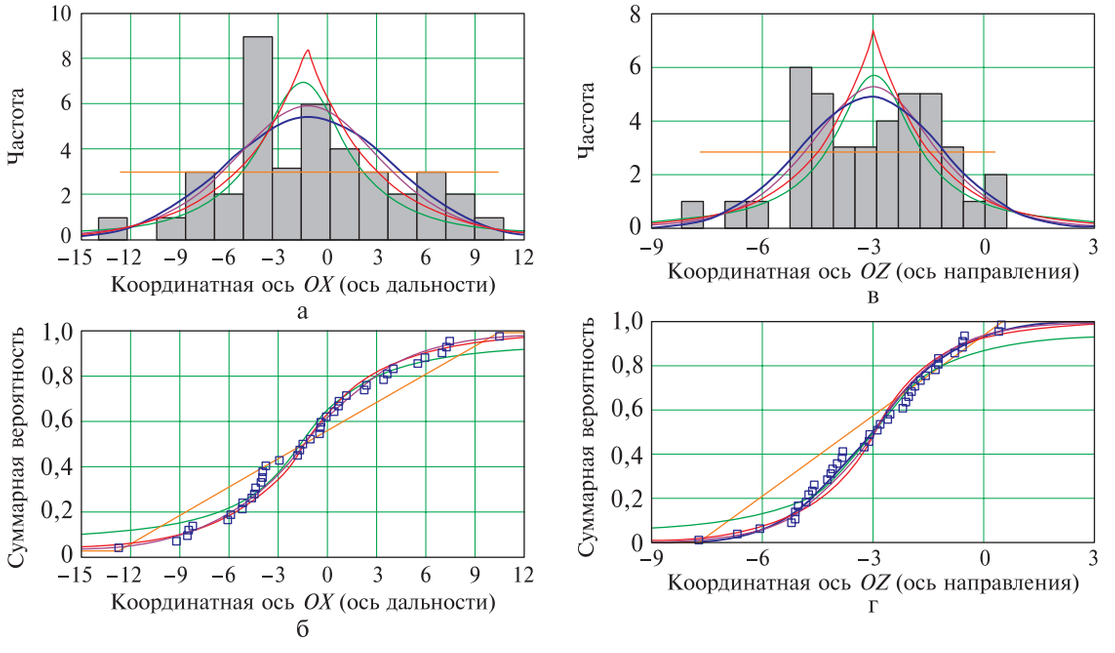


Рис. 9. Точки падения СНК, полученные согласно законам распределения Коши (—), Лапласа (—), логистическому (—), нормальному (—) и равномерному (—):
а – гистограмма распределения координат точек падения по оси *OX*; б – кумулятивная кривая распределения координат точек падения по оси *OX*; в – гистограмма распределения координат точек падения по оси *OZ*; г – кумулятивная кривая распределения координат точек падения по оси *OZ*

мерности рассеивания ГММ СНК при сбросе с разной высоты. В качестве примера на рис. 10 в виде поверхности плотности распределения приведена закономерность распределения ГММ СНК при сбросе с высоты 300 м.

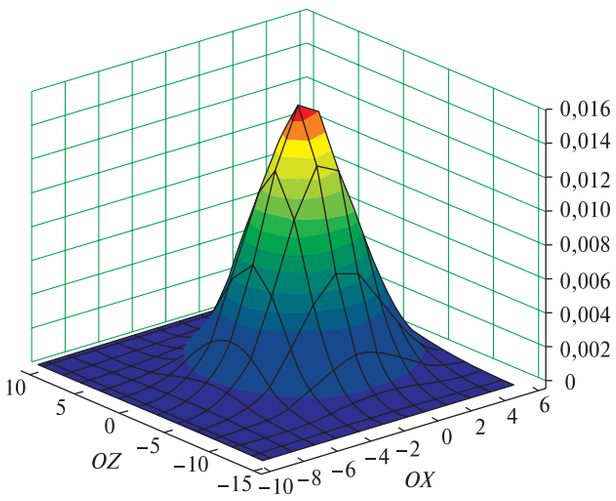


Рис. 10. Графическое отображение закономерности распределения ГММ СНК с высоты 300 м

В аналитическом виде закономерность распределения ГММ СНК выражается функцией плотности вероятности двумерной случайной величины:

$$f(x,z)=\frac{1}{19{,}76\pi}\exp\left[-\frac{(x+1{,}16)^2}{27{,}04}-\frac{(z+3{,}06)^2}{3{,}61}\right]. \quad (3)$$

Заключение

Таким образом, использование разработанного СПО «Система поддержки принятия решения ударных беспилотных летательных аппаратов «Пересвет» позволило определить точностные характеристики ударных БПЛА МК, закономерности и параметры рассеивания средств поражения за счет интегрирования адаптированных способов обмера. Закономерности распределения СНК позволяют планировать мероприятия по поражению наземных объектов при расчете потребных нарядов. В результате автоматизации измерений за счет СПО удалось сократить время определения закономерностей на 30–40 % по отношению к предыдущим полевым испытаниям. Использование личным составом расчетов наземных пунктов управления БПЛА МК, разработанного СППР, обеспечит выполнение штурманских расчетов при подготовке и планировании боевого применения данных комплексов.

Список литературы

1. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2 кн.: кн. 1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА / под ред. *В. С. Вербы*, *Б. Г. Татарского*. М.: Радиотехника, 2016. 512 с.

2. *Новак К. В.*, *Горохова Е. А.*, *Тофоров М. С.* Оценка боевых возможностей беспилотных летательных аппаратов гражданского назначения, применяемых в террористических целях / Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации: сб. трудов II Военно-научной конференции. Москва, 2017. С. 187–195.

3. *Фрезе В. Р.* Опыт применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами в вооруженных конфликтах // Гуманитарные проблемы военного дела. 2018. № 1 (14). С. 106–112.

4. Атаковавшие базу в Хмеймим беспилотники, технический разбор // LiveJournal. Дата публ.: 09.01.2018. 21:02. URL: https://ilipin.livejournal.com/162716.html (дата обращения: 22.03.2018).

5. Начальник Управления строительства и развития системы применения БПЛА Генштаба ВС РФ генерал-майор Александр Новиков провел брифинг для представителей российских и зарубежных СМИ // Министерство обороны Российской Федерации (Минобороны России). Дата публ.: 11.01.2018. 17:00. URL: https://function.mil.ru/news_page/country/more.htm?id=12157872@egNews (дата обращения 22.03.2018).

6. *Зубов В. Н.* Современные террористические и ассиметричные угрозы // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 5–6 (119–120). С. 47–57.

7. *Ананьев А. В.*, *Филатов С. В.*, *Рыбалко А. Г.* Статистическая оценка ударных возможностей беспилотных летательных аппаратов малой дальности при решении задач пилотируемой авиации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. № 12. С. 455–460.

8. Средства поражения и боеприпасы / *А. В. Бабкин*, *В. А. Велданов*, *Е. Ф. Грязнов* и др.; под

общ. ред. В. В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
9. Авиационные боеприпасы: учебник для слушателей и курсантов высших инженерных военно-учебных заведений ВВС / *Ф. П. Миропольский*, *Е. В. Пырьев*, *В. В. Головенкин*, *С. В. Хрулин*; под ред. Ф. П. Миропольского. М.: Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», 2010. 407 с.
10. Ананьев А. В., Филатов С. В., Рыбалко А. Г. Совместное применение пилотируемой авиации и разведывательно-ударных беспилотных летательных аппаратов малой дальности // Военная мысль. 2019. № 4. С. 26–31.
11. *Вентцель Е. С.* Введение в исследование операций. М.: Изд-во «Советское радио», 1964. 391 с.
12. *Монсик В. Б.* Статистические основы авиационного вооружения. М.: Из-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2003. 484 с.
13. *Коклюгин В. В.* Программный комплекс подготовки экипажей воздушных судов к полетам «Флагман Авиа». Специализированное программное обеспечение «Планшет полигона» вер. 3.3. URL: http://koklugin.narod.ru/ (дата обращения: 18.11.2018).
14. Приказ министра обороны Российской Федерации от 30 апреля 2007 года № 150 «Об утверждении Федеральных авиационных правил по штурманской службе государственной авиации». М.: ФГУП «12 центральная типография МО РФ». 88 с.
15. Производство и сопровождение эксплуатации средств автоматизированного планирования и подготовки полетных данных (заглавие с экрана) // НПО «Мобильные информационные системы». URL: https://www.npomis.ru/flight_data_systems_development (дата обращения 20.08.2019).
16. Приказ министра обороны Российской Федерации от 25 октября 2001 года № 431 «Об утверждении Федеральных авиационных правил по организации полигонной службы в государственной авиации».
17. *Мильграм Ю. Г.*, *Попов И. С.* Боевая эффективность авиационной техники и исследование операций. М.: Издание ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1970. 500 с.
18. *Рыбалко А. Г.*, *Ананьев А. В.*, *Клевцов Р. П.*, *Карбышева К. М.* Специальное программное обеспечение «Система поддержки принятия решения ударных беспилотных летательных аппаратов «Пересвет». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619663 от 22.07.2019 г.
19. *Ананьев А. В.*, *Филатов С. В.*, *Петренко С. П.*, *Рыбалко А. Г.* Экспериментальная апробация применения свободнопадающих неуправляемых контейнеров с использованием беспилотных летательных аппаратов ближнего действия // Вестник МАИ. 2019. № 1. С. 102–109.
20. *Ананьев А. В.*, *Рыбалко А. Г.*, *Гончаренко В. И.*, *Клевцов Р. П.* Оперативная оценка ошибок попадания в цель свободнопадающих неуправляемых контейнеров беспилотных летательных аппаратов малого класса // Труды МАИ. 2019. № 107. URL: http://www.trudy.mai.ru/upload/iblock/7b5/Ananev_Rybalko_Goncharenko_Klevtsov_rus.pdf?lang=en&issue=107 (дата обращения 05.09.2019).
21. *Подшивалов В. П.*, *Нестеренок М. С.* Инженерная геодезия. Минск: Высшая школа, 2011. 464 с.
22. *Ананьев А. В.*, *Рыбалко А. Г.*, *Гончаренко В. И.* Рациональное распределение огневого воздействия свободнопадающих неуправляемых контейнеров беспилотных летательных аппаратов малого класса на основе теории рисков // Известия Института инженерной физики. 2019. № 3 (53). С. 66–72.
23. *Тюрин Ю. Н.*, *Макаров А. А.* Статистический анализ данных на компьютере / под ред. В. Э. Фигурнова. М: ИНФРА-М, 1998. 528 с.
24. *Шевелина И. В.* Автоматизированная обработка и анализ данных с использованием статистико-графической системы Statgraphics Plus for Windows. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. 58 с.
25. Боевые авиационные комплексы и их эффективность / *И. В. Арбузов*, *О. В. Болховитинов*, *О. В. Волочаев* и др.: под ред. *О. В. Болховитинова*. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2008. 226 с.
26. *Кириллов В. И.* Теория боевой эффективности и исследование операций. Ч. 2. Общие математические методы и основные задачи оценки эффективности боевых действий. Монино, 1969. 276 с.
27. *Горлач Б. А.* Теория вероятностей и математическая статистика. СПб.: Лань, 2013. 320 с.
28. *Хрущева И. В.*, *Щербаков В. И.*, *Леванова Д. С.* Основы математической статистики

и теории случайных процессов. СПб.: Лань, 2009. 336 с.
29. ГОСТ 19.701–90 ЕСПД. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения. М.: Стандартинформ, 2010. 23 с.

Поступила 04.04.19

Рыбалко Андрей Григорьевич – научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиации военно-воздушных сил) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж.
Область научных интересов: теория боевой эффективности авиационных средств поражения и применение ударных беспилотных летательных аппаратов, разработка систем поддержки принятия решений.

Ананьев Александр Владиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж; старший научный сотрудник АО НПП «Полет», г. Нижний Новгород.
Область научных интересов: теоретические и практические исследования в областях межвидового применения авиации, системы и устройства информационного обмена беспилотных летательных аппаратов малого класса.

Лазорак Александр Викторович – начальник кафедры Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж.
Область научных интересов: организация боевого применения авиационных средств поражений авиационными комплексами оперативно-тактической и армейской авиации.

Клевцов Роман Петрович – преподаватель кафедры Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж.
Область научных интересов: боевая (штурманская) подготовка летного состава, воздушная навигация летательных аппаратов военного назначения.

Small-class UCAV required release determination software for ground target destruction

The study introduces special software which enables the increase in the efficiency of preparing source data and performing navigational calculations when planning the ground target impact effect of small-class unmanned air vehicles. We developed methods for measuring the coordinates of the impact points of the mock-up destruction means. As a result of integrating these methods, we managed to halve the time for determining the parameters of distribution of the overall mass mock-up destruction means of small class UCAV – free-falling uncontrolled containers, and also significantly increase the reliability of statistical data. The paper shows the unmanned combat air complex distribution patterns and accuracy characteristics obtained using the specified software during the factory tests which aimed at evaluating the accuracy of dumping the overall mass mock-up free-falling uncontrolled containers. The special software developed makes it possible to determine the required release of unmanned air vehicles and automate the preparation of reporting documentation.

Keywords: unmanned combat air vehicle, specialized software, statistical evaluation, distribution of weapons, target destruction efficiency, factory tests, free-falling uncontrolled container.

Rybalko Andrey Grigorievich – Researcher Fellow, the Research Center for the Application, Support and Control of Air Force Aviation, Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education "Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh.
Science research interests: theory of combat effectiveness of aviation weapons and use of unmanned combat air vehicles, development of decision support systems.

Ananiev Aleksandr Vladislavovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of a Department, Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education "Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh; Senior Research Fellow, Scientific and Production Enterprise "Polet", Joint Stock Company, Nizhny Novgorod.
Science research interests: theoretical and practical research in the fields of joint-force application of aviation, small-class UCAV information exchange systems and devices.

Lazorak Aleksandr Viktorovich – Head of the Department, Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education "Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh.
Science research interests: management of combat use of air means of destruction by aviation complexes of operational-tactical and army aviation.

Klevtsov Roman Petrovich – Lecturer of a Department, Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education "Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh.
Science research interests: combat navigational training of flight personnel, air navigation of military aircraft.

О. Д. Грачев, С. М. Коган,
Е. А. Маврычев, И. А. Рунова

К юбилею А. А. Зачепицкого

21 ноября 2019 г. исполняется 90 лет со дня рождения Александра Ароновича Зачепицкого – главного конструктора радиолокационных станций (РЛС), одного из основоположников радиолокации метрового диапазона волн. Идет уже седьмое десятилетие, с тех пор как Александр Аронович начал заниматься радиолокацией. Его имя известно среди военных, конструкторов радиолокационной техники, ученых. Он разработал действительно уникальные изделия с выдающимися характеристиками и, самое главное, востребованные в войсках противовоздушной обороны (ПВО).

А. А. Зачепицкий (рис. 1) получил блестящее образование на радиофизическом факультете Горьковского государственного университета (ГГУ). Время его обучения можно назвать самым представительным по лекторскому составу профессоров-основоположников радиофака. Декан факультета Мария Тихоновна Грехова – выдающийся организатор науки. Лекции читали будущий лауреат Нобелевской премии, академик Виталий Лазаревич Гинзбург, а также академик Александр Александрович Андронов, профессор Габриэль Семенович Горелик.



Рис. 1. А. А. Зачепицкий

После окончания университета Александр Аронович получил назначение в ОКБ п/я 416 Министерства авиационной промышленности в г. Казань, где стал одним из авторитетных специалистов-разработчиков новой техники. На заводе-изготовителе он дважды завоевывал первые места в конкурсах по решению задач внедрения новой техники. В Казани Александр Аронович накопил значительный научно-технический опыт и почувствовал уверенность в своих силах.

В авиационной отрасли от любого устройства, кроме удовлетворения функциональным параметрам, требовалась предельная экономичность по габаритам, энергопотреблению и другим характеристикам, и это стремление к решению любой инженерной задачи наилучшим, наиболее рациональным способом сохранилось на всю его жизнь.

Весной 1956 г. А. А. Зачепицкий начал работать в СКБ-197 завода им. Ленина (ныне ННИИРТ), в котором он проработал 50 лет, пройдя путь от инженера-разработчика до генерального конструктора – заместителя директора на научной работе. Возглавлял СКБ Г. К. Киселев. По словам Александра Ароновича, под его руководством он проработал 25 лучших лет своей жизни. Главный инженер – Е. В. Бухвалов.

Александру Ароновичу довелось сотрудничать с известными главными конструкторами – В. И. Овсяниковым (РЛС П-14, РЛС П-70) и Ю. Н. Соколовым (РЛС СТ-67). Последний одновременно возглавлял 1-ю лабораторию, где была создана творческая атмосфера и выросли многие известные специалисты. Впоследствии А. А. Зачепицкий стал начальником 8-го отдела, в котором были продолжены лучшие традиции 1-й лаборатории. Так, каждый специалист был занят не только разработкой составных частей РЛС, но и связанной с этим теоретической задачей. Проводились научно-технические семинары, которые стали школой для молодых специалистов и кузницей ведущих кадров предприятия. Семинары по-

© Грачев О. Д., Коган С. М.,
Маврычев Е. А., Рунова И. А., 2019

сещали специалисты из других предприятий. Несколько раз в работе семинара принял участие выдающийся деятель радиолокации Яков Давидович Ширман.

В начале 1960-х гг. Александр Аронович был назначен заместителем главного конструктора по РЛС П-70 («Лена-М») – уникальному для своего времени изделию, в котором были реализованы новые принципы и подходы в радиолокации. Под руководством А. А. Зачепицкого реализована идея сжатия радиолокационных сигналов. Это новое направление потребовало полного пересмотра способов построения приемо-передающих устройств РЛС. Обоснованию этих задач посвящено значительное количество научных работ и изобретений А. А. Зачепицкого и его сотрудников. РЛС П-70 стала первым в мире промышленным образцом со сжатием сигналов. За совокупность новых научно-технических достижений Александру Ароновичу присвоено звание лауреата Государственной премии в области науки в коллективе, возглавляемом Я. Д. Ширманом.

В 1975 г. Александр Аронович поставил задачу, которая казалась в то время неразрешимой, – создание в метровом диапазоне волн помехозащищенной трехкоординатной станции с высокой точностью определения координат. Поиском решения этой задачи занялся коллектив НИР «Угол» и ОКР «Небо» (55Ж6), научным руководителем и главным конструктором которых был А. А. Зачепицкий. Важность этой работы и том, какое значение она имела для страны, подтверждает факт, что эта работа контролировалась ЦК КПСС и ВПК Президиума СМ СССР. РЛС 55Ж6 – одна из первых станций с фазированной антенной решеткой, в которой реализована аналоговая обработка сигналов. Стоит отметить, что РЛС 55Ж6 не имела ни зарубежных, ни отечественных аналогов. Многие технические решения уникальны, что отразилось в большом числе публикаций и патентов. Среди них можно отметить схему обработки сложного сигнала (код Баркера), в которой реализована полосовая фильтрация, жесткое ограничение с последующим сжатием. Такой подход позволял избавиться от многочисленных эфирных помех и боковых лепестков сжатого сигнала и стабилизировать уровень ложных тревог. Также стоит отметить реализацию измерения угла места, которая была выполнена на основе анализатора спектра. Эта станция стала базовой моделью для последующих разработок – двух- и трехкоординатных станций метрового диапазона волн.

Продолжение и развитие идеи трехкоординатных РЛС в метровом диапазоне получили в ОКР «Небо-У». В результате была создана РЛС с цифровой антенной решеткой с высокими точностями измерения угловых координат, которые были достижимы ранее только в РЛС дециметрового и сантиметрового диапазонов. Этого удалось достичь с помощью цифровой обработки за счет подавления сигнала, отраженного от земной поверхности, который искажает измерения на малых углах места. Обе работы отмечены Государственными премиями.

Разработка и проведение Государственных испытаний изделия 55Ж6У выпало на 1990-е гг., в которые всем пришлось столкнуться с известными трудностями. Директором ННИИРТ стал В. В. Москаленко, в назначении которого Александр Аронович сыграл решающую роль. В 1994 г. А. А. Зачепицкий был назначен генеральным конструктором ННИИРТ, а впоследствии – заместителем директора по науке. В результате совместной работы с В. В. Москаленко институт стал образцовым преуспевающим предприятием.

Следующей работой А. А. Зачепицкого стал не имеющий аналогов мобильный многодиапазонный комплекс, сочетающий в себе преимущества радиолокаторов различных диапазонов – РЛК «Небо-М». Эта ОКР была поставлена по инициативе Александра Ароновича, ставшего первым главным конструктором этой работы. Под его руководством был защищен эскизно-технический проект РЛК. В дальнейшем, после ухода Александра Ароновича из ННИИРТ, эту работу возглавил его ученик – Александр Давидович Бомштейн, который проявил огромную инициативу, настойчивость, изобретательность, трудолюбие в создании опытного образца, внедрении его в серийное производство и оснащении войск.

Помимо перечисленных ранее изделий, разработанных под его непосредственным ру-

ководством, А. А. Зачепицкий принимал творческое участие практически во всех разработках ННИИРТ. Внес большой вклад в развитие радиолокационной техники, в том числе в изучение и применение сложных сигналов, методов автокомпенсации активных шумовых помех и селекции движущихся целей.

Однако славу А. А. Зачепицкому принесли не только прорывные идеи, воплотившиеся в разработки, за которые были получены высокие государственные награды. Все разработанные изделия были приняты на вооружение и пошли в серийное производство. Ими по сей день оснащаются радиотехнические войска, в которых они находятся на боевом дежурстве, являясь надежным средством контроля воздушного пространства страны. Основным предприятием-изготовителем РЛС, разработанных А. А. Зачепицким, является ПАО «НИТЕЛ», на котором изготовлено 119 изделий 55Ж6 и 90 изделий 55Ж6У.

В 2005 г. А. А. Зачепицкий ушел из ННИИРТ, в котором проработал полвека, и принял новый вызов – работа в КБ «Лира», которое в результате преобразований и слияний вошло в ПАО «НПО «Алмаз», где и работает Александр Аронович в настоящее время. Здесь под его руководством был выполнен ряд ОКР, среди которых ОКР «Пример» по модернизации сразу четырех изделий 19Ж6, ПРВ-16, 57У6, ПРВ-13. Авторитет А. А. Зачепицкого сыграл важную объединяющую роль для всех предприятий-разработчиков, участвующих в данной ОКР, и обеспечил принятие всеми предприятиями унифицированных технических решений. Под руководством А. А. Зачепицкого проведена модернизация РЛС 55Ж6, в результате которой были улучшены технические и эксплуатационные характеристики изделия.

В настоящее время А. А. Зачепицкий принимает активное участие в разработке перспективных путей развития радиолокационной техники, ведет работу с заказывающими управлениями и Военным институтом Министерства обороны Российской Федерации по формированию предложений для государственных оборонных заказов и государственной программы вооружений.

Значимость проводимых работ Александра Ароновича иллюстрирует фотография, которой он особенно дорожит. На ней Александр Аронович среди выдающихся главных конструкторов, начиная от А. А. Расплетина, П. Д. Грушина, С. А. Лавочкина и др. Эта памятная доска установлена в центре 10-й площадки (в настоящее время – в г. Знаменске), напротив главного штаба войсковой части (рис. 2).

А. А. Зачепицкий – один из основателей научной школы, из которой вышли многие ученые, главные конструкторы и руководители предприятий. Автор 25 авторских свидетельств и патентов на изобретения и более 80 научных работ. Несколько лет он преподавал на радиофизическом факультете Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского; участвуя в подготовке молодых кадров, он прочитал два спецкурса по статистической радиофизике и поставил несколько лабораторных работ. Семинар, которым руководил А. А. Зачепицкий, стал основой для роста и становления четырех докторов наук: Ю. И. Пахомова, М. А. Лейких, А. Б. Бляхмана, М. А. Островского; а также ведущих специалистов: лауреата Государственной премии СССР, главного инженера НИИИРТ



Рис. 2. Главные конструкторы ПВО

В. М. Марескина; главного конструктора РЛС, кандидата технических наук Н. Н. Махровой; лауреата Государственной премии Российской Федерации, главного конструктора РЛС А. Д. Бомштейна; лауреата Государственной премии Российской Федерации, директора НПЦ Альтаир («Алмаз») В. В. Башева; главного инженера НПЦ (ЛЭМЗ), главного конструктора РЛС О. Д. Грачева; главного конструктора РЛС, идеолога значительной части разработок ННИИРТ В. Н. Таланова. Значительно повысился инаучно-технический уровень всех разработчиков.

И хотя работа занимала большое место в жизни А. А. Зачепицкого, ему всегда удавалось найти время для занятий спортом, творчества. Спортивные увлечения Александра Ароновича, благодаря которым он и сейчас находится в отличной физической форме и сохраняет работоспособность, вызывают восторг. Любимый вид спорта А. А. Зачепицкого – горные лыжи. Путешествуя однажды на горнолыжный курорт, на таможне Александр Аронович на вопрос о цели поездки ответил просто: «Еду кататься на горных лыжах». Таможенник подумал, что перед ним сумасшедший, ведь Александру Ароновичу было уже 85 лет!

Среди других увлечений Александра Ароновича стоит отметить волейбол и управление катером. В настоящее время он продолжает поддерживать спортивную форму: в любую погоду обязательно совершает пешую прогулку и проходит не менее 8 тысяч шагов в день.

Александр Аронович – творческий человек в самом широком смысле слова, всем известно его увлечение поэзией. Его серьезные, шуточные и лирические стихи, веселые новогодние лекции, юмористические эссе приносят радость близким, друзьям и коллегам. Сейчас готовится к выпуску уже третье издание стихов и мемуаров А. А. Зачепицкого «И в шутку, и всерьез».

Грачев Олег Дмитриевич – главный инженер НПЦ-НН ПАО «НПО «Алмаз», г. Нижний Новгород.

Коган Семен Михайлович – директор НПЦ-НН ПАО «НПО «Алмаз», г. Нижний Новгород.

Маврычев Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора НПЦ-НН по науке ПАО «НПО «Алмаз», г. Нижний Новгород.

Рунова Ирина Александровна – ведущий инженер НПЦ-НН ПАО «НПО «Алмаз», г. Нижний Новгород.