

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет «Военмех»
Российская академия ракетных и артиллерийских наук (РАРАН)
Российская академия космонавтики им. К. Э. Циолковского (РАКЦ)
Санкт-Петербургское отделение**



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Труды двенадцатой общероссийской
научно-практической конференции**

Том 2

**Санкт-Петербург, Россия
20 – 22 ноября 2019 года**

Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», №63

**Санкт-Петербург
2020**

УДК 351.862.224 : 623.445

И66

И66

Иновационные технологии и технические средства специального назначения: труды двенадцатой общерос. науч.-практ. конф. В 3 т. Т. 2. / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2020. – 228 с. (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 63).

ISBN 978-5-94652-656-2

Публикуются статьи и доклады, представленные на XII научно-практической конференции «Иновационные технологии и технические средства специального назначения», прошедшей в рамках «Недели науки в Военмехе» и посвященной 85-ой годовщине создания «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» и 60-ой годовщине создания кафедры «Радиоэлектронные системы управления». В третий том сборника вошли материалы секций «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением» и «Радиотехнические системы».

Для инженерных и научных специалистов, работающих в указанных направлениях, а также для студентов старших курсов и аспирантов профильных вузов.

Отзывы направлять по адресу: Россия, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1. Редакция журнала «Военмех. Вестник БГТУ».

УДК 351.862.224 : 623.445

Редакционный совет: д-р техн. наук, проф. *К. М. Иванов* (председатель), д-р техн. наук, проф. *В. А. Бородавкин*, канд. техн. наук, проф. *М. Н. Григорьев*, канд. техн. наук, доц. *С. А. Матвеев*, канд. техн. наук, доц. *С. В. Москвин*, доц. *М. Н. Охочинский*, канд. техн. наук, доц. *В. А. Симицын*, д-р техн. наук, доц. *А. Е. Шашурин*, д-р экон. наук, проф. *А. Д. Шматко*, ст. преп. *К. А. Афанасьев*, ст. преп. *С. А. Чириков*

Ответственный редактор серии
«Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»
М. Н. Охочинский

Тексты статей публикуются в авторской редакции

ISBN 978-5-94652-656-2

© БГТУ «Военмех», 2020

© Авторы, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	6
Д. В. Васильков, А. С. Александров, В. В. Голикова, Е. А. Таянович ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗИСТИВНОГО ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	6
Д. В. Васильков, В. С. Чердакова РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТОЧЕНИЕМ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ	11
Г. А. Воробьева, М. Ю. Силаев, Е. Ю. Ремшев, Е. А. Еськова ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ (АТАО) НА СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ БРОНЗЫ БРНХК	15
К. С. Голубев, А. В. Титов ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	21
А. В. Евсеев, В. В. Прейс РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТОВ СМЕШЕНИЯ ТРУБЧАТОЙ ДЛИННОМЕРНОЙ ПРОДУКЦИИ	26
Д. А. Елесин, М. А. Петров ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ	31
Е. В. Затеруха, М. В. Денисова ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ВЕЛИЧИНУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИЛЫ ПРИ ВЫТЯЖКЕ С УТОНЕНИЕМ	34
Е. В. Затеруха, В. А. Лобов, Е. Ю. Ремшев ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ПОДШТАМПОВКИ ГИЛЬЗ	40
И. В. Зверев, Н. Е. Проскураков КАЛИБРОВКА КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКОЙ	44
С. И. Каратушин, Д. А. Храмова УПРОЧНЕНИЕ ПОСЛЕ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	47
А. В. Кулешова, Н. И. Нестеров ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВЫДАВЛИВАНИЕМ РАДИАЛЬНЫМ ОБЖАТИЕМ МАТРИЦ ДЛЯ ШТАМПОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ ПАТРОНА	51
А. С. Ларкин, Н. Ф. Шпунькин ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ПОЛОЙ ДЕТАЛИ	55
В. С. Мамутов, В. В. Блажевич ФОРМУЕМОСТЬ ТОНКОЛИСТОВЫХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ	59
В. А. Мелешко ДИСКРЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО РАСЧЕТА ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ	63

Ю. О. Михайлов, Н. В. Тепин, В. А. Храбров, С. Н. Князев РЕКОНСТРУКЦИЯ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА АО «КОНЦЕРН «КАЛАШНИКОВ»	69
А. И. Олехвер, Е. Ю. Ремшев МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МЕМБРАН ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	74
Е. В. Пантюхина, В. В. Прейс МЕХАНИЧЕСКИЕ БУНКЕРНЫЕ ЗАГРУЗОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПАТРОНОВ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ С НЕЯВНОЙ АСИММЕТРИЕЙ	79
З. Н. Расулов РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА ВЫТЯЖКИ С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛИ «ЭКРАН» ИЗ НИОБИЯ НБПЛ-1	86
Е. Н. Сосенушкин, В. А. Кадымов, Е. А. Яновская, В. В. Оштук ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ РЕБЕР СТАБИЛИЗАТОРОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	91
С. А. Стебунов, Ю. А. Гладков QFORM 9 – ПРОГРАММА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	98
Ю. П. Удовенко, Я. А. Ерисов ВЛИЯНИЕ ИДЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОРИЕНТИРОВОК НА КОЭФФИЦИЕНТ ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	99
Д. С. Филин, С. В. Трусъ РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНОЙ СИЛЫ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОГО ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С ИСТЕЧЕНИЕМ .	102
Д. С. Филин ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ГЛУХИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУХСТОРОННИМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ	107
Е. О. Фролова, В. А. Лобов РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТУРБИНОЙ ЛОПАТКИ	113
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	115
В. В. Акапьев ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ В СТРУКТУРЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ШИРОКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	115
Е. А. Антохин, Н. В. Апанасенко, П. С. Иваненко, Д. Л. Мурсалов, В. А. Сеницын, А. А. Топилин, В. Т. Яковлев РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПРИЕМНОГО СИГНАЛА В СИСТЕМЕ «БОРТ-БОРТ» С УЧЕТОМ СФЕРИЧНОСТИ ЗЕМЛИ	116
Г. А. Ершов, Ю. Т. Криворучко, Е. А. Сеницын, В. А. Сеницын, А. А. Марингос АНАЛИЗ ПОМЕХ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА СИСТЕМУ НАВИГАЦИИ И ПОСАДКИ РСБН/ПРМГ, С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСНОГО СТЕНДА ИСПЫТАНИЙ	121

В. А. Завьялов, В. Г. Котельников, В. А. Сеницын, Е. А. Цыбра, В. Т. Яковлев АЛГОРИТМЫ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТНОЙ ИНФОРМАЦИИ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ВТОРИЧНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ	128
С. И. Исляев, А. А. Козлов, А. Г. Отцовский 160 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ А. С. ПОПОВА	130
В. Г. Котельников, В. А. Сеницын, А. А. Топилин, Е. А. Цыбра, В. Т. Яковлев МОДЕЛЬ СИГНАЛА НА ВЫХОДЕ МОНОИМПУЛЬСНОЙ АНТЕННЫ ВРЛ «АВРОРА»	138
Л. Б. Кочин, С. Ю. Страхов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ	140
Е. Е. Кривоносов, Ф. П. Крылов, И. Д. Потоцкий, В. А. Сеницын, Е. С. Щербаков, В. Т. Яковлев РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ В СИСТЕМУ АЗН-В ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ИНТЕРЕСАХ ГОСУДАРСТВЕННОЙ АВИАЦИИ	144
Ю. Т. Криворучко, Ю. Н. Музелин, Е. А. Сеницын, В. А. Сеницын КОГНИТИВНЫЕ БОРТОВЫЕ МАГИСТРАЛЬНО-МОДУЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ	148
Ф. П. Крылов, А. В. Митрофанов, В. А. Сеницын, А. А. Топилин, Е. С. Щербаков, В. Т. Яковлев ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА ВОЗДУШНОЙ СВЯЗИ ИСТРЕБИТЕЛЕЙ 4-ГО ПОКОЛЕНИЯ ВВС США	154
А. В. Нестерович, В. А. Сеницын, Е. А. Сеницын, А. Ю. Яблоков ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ АКТИВНО-ПАССИВНЫХ ПЕРВИЧНЫХ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТАМИ И ПОСАДКИ ПИЛОТИРУЕМЫХ И БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	160
А. В. Нестерович, В. А. Сеницын, А.Ю. Яблоков МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДУШНОЙ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ УГРОЗ СТОЛКНОВЕНИЙ DAIDALUS .	164
А. В. Нестерович, В. А. Сеницын, А.Ю. Яблоков ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФУНКЦИИ ШЕПОТ-КРИК В БСПС ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗОНОЙ ЗАПРОСА И УМЕНЬШЕНИЯ СИНХРОННЫХ ПОМЕХ	167
А. В. Нестерович, В. А. Сеницын, А.Ю. Яблоков ФАЗИРОВАНИЕ ПРИЕМНО-ПЕРЕДАЮЩИХ ТРАКТОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ	172
Д. О. Перминов КОМПАКТНЫЙ МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ X-ДИАПАЗОНА	176
Д. О. Притчин АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЛЕТНОГО КОНТРОЛЯ	179
А. А. Ким, А. С. Разуваева ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКОНТУРНОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА БЕЗ ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В НИЗКОЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ	181

В. А. Сеницын, Я. Л. Ву Хан, Л. Б. Фридман АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ПОДОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ	187
В. А. Сеницын, Я. Л. Ву Хан, Л. Б. Фридман ПОДОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ	193
В. А. Сеницын, Е. А. Сеницын, Л. Б. Фридман КОМПЕНСАЦИЯ АКТИВНЫХ ПОМЕХ В ПРИЕМНЫХ ТРАКТАХ ПЕРВИЧНЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ	196
В. А. Сеницын, Е. А. Сеницын, Л. Б. Фридман ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ АКТИВНЫХ ПОМЕХ В ПРИЕМНОМ ТРАКТЕ РЕТРАНСЛЯТОРА ДАЛЬНОМЕРА ПОСАДОЧНОЙ РАДИОМАЯЧНОЙ ГРУППЫ	203
С. Ю. Страхов, А. Н. Флёров, А. А. Флёрова РАБОТЫ КАФЕДРЫ И4 (№7) БГТУ «ВОЕНМЕХ» ИМ. Д. Ф. УСТИНОВА ПО ПОВЫШЕНИЮ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИМПУЛЬСНО ФАЗОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛИННОВОЛНОВОГО И СРЕДНЕВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНОВ	206
А. А. Черанёв ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БУКСИРУЕМОЙ ЛОВУШКИ ДЛЯ МАСКИРОВАНИЯ КРЫЛАТОЙ РАКЕТЫ ОТ СРЕДСТВ ПВО ПРОТИВНИКА	219
АВТОРЫ СБОРНИКА	226

ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ



УДК 620.179.18

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗИСТИВНОГО ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Д. В. Васильков, А. С. Александров, В. В. Голикова, Е. А. Таянович

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Последовательность изготовления ответственных деталей предусматривает направленное формирование свойств поверхностного слоя, что обеспечивает наилучшие эксплуатационные характеристики [1-4]. Опыт эксплуатации показал, что наибольшее число отказов происходит по причине несоответствия напряженно-деформированного состояния эксплуатационным требованиям в заданных зонах ответственных узлов, где доминирующим фактором являются остаточные напряжения (ОН). Действительно, дефекты в поверхностном слое присутствуют всегда. Но в одних случаях они активно развиваются, а в других – консервируются и практически не проявляются.

Анализ существующих методов определения ОН показал, что высокую актуальность имеет проблема разработки новых методов, которые бы сочетали преимущества разрушающих методов (высокую надежность, гарантированную погрешность определения ОН, возможность определения распределения ОН по глубине от поверхности) с неразрушающим принципом действия, имели достаточно высокую универсальность и высокие эксплуатационные качества. В качестве одного из таких методов в данной работе предлагается резистивный электроконтактный метод [5, 6], имеющий высокую универсальность в отношении формы и размеров изделий из различных металлов и сплавов, как ферромагнитных, так и немагнитных с высокой и низкой электрической проводимостью.

Резистивный электроконтактный метод неразрушающего контроля ОН основан на корреляции между интегральными электрическими и механическими характеристиками проводящих материалов – удельным электрическим сопротивлением (ρ) в слое металла h и деформирующей способностью q ОН σ . В результате измерения электрических параметров, можно определять механические напряжения в изделиях. При этом необходимо получать зна-

чения электрических параметров и механических напряжений в виде графика распределения этих значений по глубине материала изделия.

Для измерения распределения УЭС по глубине используем известное явление скин-эффекта, при котором высокочастотные токи сосредотачиваются у той поверхности проводника, которая является ближайшей к источнику поля, вызывающим появление токов. На основании решения системы уравнений Максвелла для проводящего полупространства глубина скин-слоя h определяется выражением

$$h = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}, \quad (1)$$

где f – частота тока; μ – магнитная проницаемость материала.

Использование явления скин-эффекта позволяет послойно исследовать изделия путем возбуждения электромагнитного поля различной частоты и измерения сигнала-отклика, параметры которого связаны с изменением напряженного состояния изделия. В соответствии с выражением (1) уменьшение частоты посылаемого в изделие переменного тока позволяет увеличивать толщину исследуемого слоя. Выбор значений рабочих частот определяется диапазоном глубин, на которых наблюдаются экстремумы остаточных механических напряжений.

УЭС зависит от частоты тока и свойств материала изделия, и его можно измерять при различных частотах f_i , в том числе, на постоянном токе:

$$\rho_i = \frac{U_i h_i}{I_i}, \quad (2)$$

где индекс i означает, что измерения тока I_i и напряжения U_i произведены на i -ой частоте ($i = 1, 2, \dots, m$), а значения h_i вычислены по формуле (1) для частоты f_i .

Важно отметить, что в формуле (2) под измеренным напряжением U_i следует понимать синфазную поданному току I_i составляющую электрического напряжения сигнала-отклика, что легко реализовать, например, путем фазового детектирования указанного сигнала. Таким образом, задавая последовательность токов различных частот f_i , измеряя ток I_i и напряжение U_i , а также вычисляя распределение ρ_i по глубине материала изделия, появляется возможность определения механических напряжений σ_i .

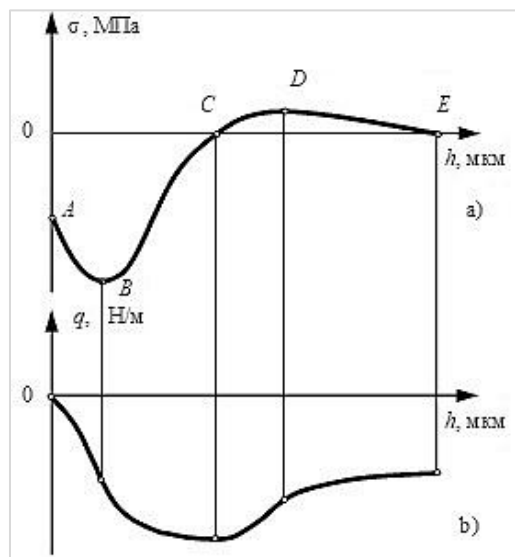


Рис.1. Характер распределения ОН (а) и деформирующей способности ОН (б) при обработке резанием

ОН возникают практически при всех видах технологических воздействий [4]. Однако, существует проблема выбора количественных характеристик для оценки их значений. В авиационном машиностроении сложилась практика задания технологических ОН (ТОН), в соответствии с которой на эпюре ОН отмечаются особые точки A, B, C, D, E (рис.1,а), которые характеризуют: $A(0, \sigma_n)$ – поверхностные ТОН; $B(h_{\text{пн1}}, \sigma_{\text{пн1}})$ – первые максимальные подповерхностные ТОН; $C(h_0, 0)$ – точка перехода через ноль эпюры ТОН; $D(h_{\text{пн2}}, \sigma_{\text{пн2}})$ – вторые максимальные подповерхностные ТОН; $E(h_{\text{max}}, 0)$ – стремление к асимптоте эпюры ТОН.

Из обозначенных характеристик в конструкторско-технологических документах регламентируются следующие параметры: σ_n – поверхностные ТОН; h_0 – глубина перехода через ноль эпюры ТОН; $\sigma_{\text{пн}}$ – максимальные подповерхностные ТОН, $\sigma_{\text{пн}} = \max(\sigma_{\text{пн1}}, \sigma_{\text{пн2}})$.

Помимо параметрической оценки ОН может быть сформулирован непараметрический критерий, интегрально оценивающий действие остаточных напряжений – их деформирующая способность q [3], которая определяется выражением

$$q = \int_0^{h_M} \sigma dh, \quad (3)$$

где h_M – максимальная глубина залегания ТОН.

График зависимости деформирующей способности q от глубины h представлен на рис.1,б. Она имеет важное значение для инженерных расчетов, так как представляет собой меру действия технологических ОН.

Средние напряжения в слое глубиной h_i определяются на основе корреляционной зависимости между интегральными электрическими и механическими характеристиками

$$\sigma_{\text{cp}}(h_i) h_i = q(h_i) = k_\sigma \rho_i, \quad (4)$$

где k_σ – экспериментальный коэффициент, получаемый в результате процедуры калибровки измерительной системы (рис.2).

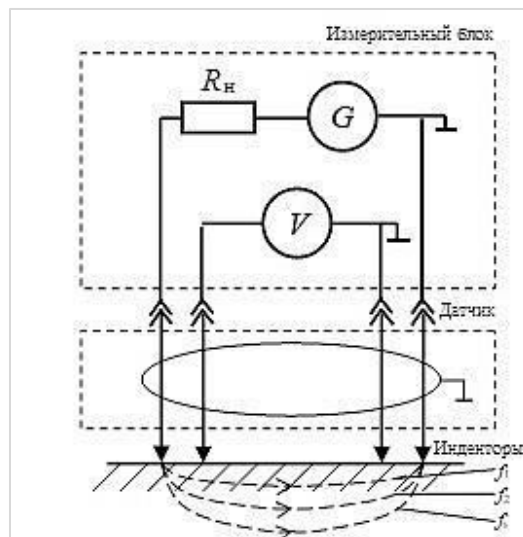


Рис.2. Схема измерений:

G – генератор, формирующий задающий сигнал переменной частоты; V – вольтметр, определяющий сигнал-отклик электрического напряжения; f_i – частота сигнала, определяющая i -ю глубину прохождения тока

Схема реализации резистивного электроконтактного метода представлена на рис. 2. Принцип работы заключается в послойном измерении электрических величин в материале образца путем возбуждения в нем электромагнитного поля различной амплитуды и частоты с дальнейшим измерением сигнала-отклика, параметры которого связаны с изменением напряженно-деформированного состояния материала образца. Глубина исследования связана с частотой выражением (1). Внешняя пара электродов датчика является источником электромагнитного поля, а внутренняя пара электродов принимает сигнал-отклик [6].

Измерительная система функционирует по следующему алгоритму:

- в поверхностный слой исследуемого образца через внешние электроды поступает ток различной частоты;
- проводится измерение силы поданного тока на каждой из заданных частот;
- проводится измерение напряжения сигнала-отклика на каждой из заданных частот;
- вычисляется распределение УЭС по глубине в материале образца;
- рассчитывается калибровочная зависимость между УЭС и механическими напряжениями в материале тестового образца на глубинах, соответствующих глубинам проникновения тока на заданных частотах;
- на основании снятой зависимости вычисленное распределение УЭС преобразуется в распределение механических напряжений по глубине исследуемого материала образца.

Измерение силы поданного тока позволяет вычислять непосредственно УЭС и его распределение по глубине поверхностного слоя образца и, кроме того, повышает стабильность измерений. Это связано с тем, что внешнее воздействие не только задается и измеряется непосредственно в изделии, но и является нормирующим фактором.

При исследовании деталей можно выбирать необходимые глубины исследований. Для выбранного частотного ряда применительно к различным материалам можно вычислить ряды глубин, которые будут различаться ввиду различия электромагнитных свойств. На основе данного метода был проведен комплекс экспериментальных исследований по определению технологических режимов, обеспечивающих минимум упругого последствия деформирующей способности технологических ОН при обработке точением, фрезерованием и шлифованием. В качестве объектов исследования были выбраны прецизионные детали насосных агрегатов систем терморегулирования космических аппаратов, тонкостенные покрывные диски и лабиринтные уплотнения авиационных двигателей, рабочие лопатки паровых и газовых турбин, детали корпуса и шасси летательных аппаратов, детали силовых гидроцилиндров горного оборудования и др.

Обеспечение точности при многопереходной механической обработке в значительной степени определяется технологической наследственностью по остаточным напряжениям. Это особенно актуально при обработке деталей с тонкостенными элементами. Каждая из последующих друг за другом обработок функциональной поверхности детали – черновая, получистовая, чистовая, тонкая – должны сохранять форму детали, т.е. исключать упругое последствие (коробление) деформирующей способности ТОН. Указанное достигается перераспределением эпюры ОН путем варьирования технологических режимов.

Библиографический список

1. Овсенко А. Н., Серебряков В. И., Гаек М. М. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения. М.: Янус-К, 2003. 296 с.
2. Суслов А. Г., Безъязычный В. Ф., Панфилов Ю. В. [и др.]. Инженерия поверхности деталей: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
3. Васильков Д. В., Кочина Т. Б. Упругое последствие в деталях при высокоскоростной обработке резанием // Металлообработка. 2014. №2(80). С. 2 – 10.

4. Безъязычный В. Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин // Справочник. Инженерный журнал (Приложение). 2001. №4. С. 9 – 16.

5. Васильков С. Д., Улыбин А. В. Оценка напряженно-деформированного состояния и ресурса стальных балок с помощью резистивного электроконтактного метода // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций: материалы XIII НМК ВИТУ. СПб: Изд-во ВИТУ, 2009. С 39 – 43.

6. Васильков Д. В., Васильков С. Д., Никитин А. В. Измерение остаточных напряжений резистивным электроконтактным методом // Металлообработка, №6(102), 2017. С.30 – 34.

УДК 620.179.18

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТОЧЕНИЕМ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

Д. В. Васильков, В. С. Чердакова

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

В качестве образца выбран сплав на никелевой основе как один из самых проблемных материалов. Уникальной особенностью данных сплавов являются сохранение постоянства предела текучести до высоких температур $700^{\circ} - 750^{\circ}\text{C}$ (рис. 1), при превышении которых происходит резкое падение пластичности.

Другой важной особенностью данных сплавов является высокая вязкость. Отмечается повышенная адгезионная способность никелевых сплавов во всем диапазоне изменения скорости резания [1, 2].

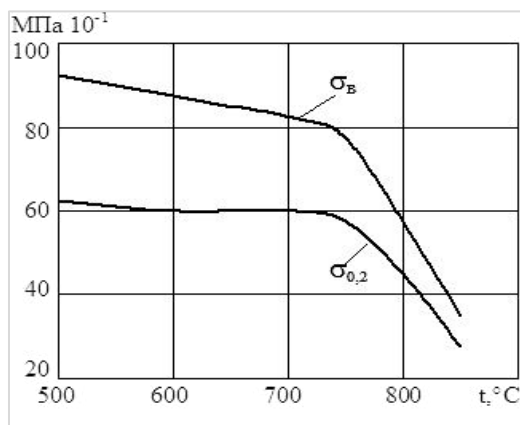


Рис 1. Зависимость изменения характеристик механических свойств жаропрочного сплава ХН77ТЮР от температуры

Для увеличенных скоростей резания при обработке точением сплава на никелевой основе ХН65МВТЮ использовался сборный инструмент с минералокерамической пластиной М101S фирмы «Tungaloy», Япония.

Известно, что с увеличением скорости резания сила резания уменьшается до некоторого минимума, характерного для данного обрабатываемого материала. За пределом этой характерной скорости сила резания начинает медленно возрастать [3, 4].

Определение силы резания со стороны передней поверхности инструмента.

Расчет сил резания на передней поверхности осуществляется по расчетной схеме стружкообразования с единственной плоской поверхностью сдвига [5].

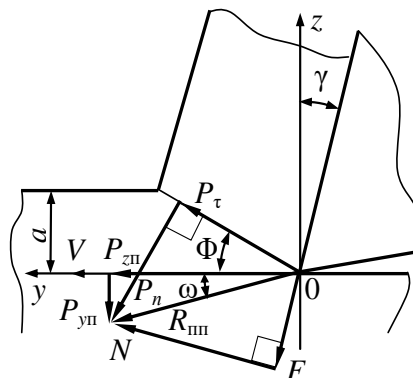


Рис. 2. Система сил, действующая со стороны передней поверхности инструмента:

γ – передний угол резца; P_τ – сила сдвига; a – толщина среза; Φ – угол сдвига; P_n – сила, действующая по нормали к плоскости сдвига; ω – угол резания; $P_{пп}$ – сила резания, действующая со стороны поверхности инструмента; N – нормальная сила на передней поверхности инструмента; F – сила трения между передней поверхностью инструмента и стружкой

Определение проекций сил резания действующих со стороны передней поверхности инструмента (ПШИ) определяются по формулам (1) и (2) [6].

$$P_{зп} = P_\tau \frac{\cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma)} + F \frac{\sin \Phi}{\cos(\Phi - \gamma)}, \quad (1)$$

$$P_{уп} = -P_\tau \frac{\sin \gamma}{\cos(\Phi - \gamma)} + F \frac{\cos \Phi}{\cos(\Phi - \gamma)}, \quad (2)$$

где P_τ – сила сдвига; F – сила трения между передней поверхностью инструмента и стружкой; γ – передний угол резца; Φ – угол сдвига.

Параметры, входящие в формулы (1) – (2), являются температурозависимыми. Угол сдвига Φ определяется по методике Райта (3), которая основана на справочных данных и хорошо апробирована в расчетно-экспериментальных исследованиях.

Определение угла сдвига [7] производится по формуле (3).

$$\Phi = \frac{1}{2} \left(\arcsin \left[k_2 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_b} - \sin(\gamma) \right] + (\gamma) \right), \quad (3)$$

где $\sigma_{0.2}$ – предел текучести, соответствующий пластической деформации, равной 0,2%; σ_b – предел прочности обрабатываемого материала, k_2 – поправочный коэффициент.

Сила сдвига определяется по формуле (4).

$$P_\tau = \tau_p ab / \sin \Phi, \quad (4)$$

где τ_p – касательное напряжение в плоскости сдвига, $\tau_p = k_\tau S_b$; k_τ – поправочный коэффициент; S_b – действительный предел прочности при растяжении, $S_b = \sigma_b (1 + \delta)$; δ – относительное удлинение при растяжении.

Касательное напряжение в плоскости сдвига τ_p [4, 8]:

$$\tau_p = k_\tau S_b, \quad (5)$$

Сила трения на передней поверхности инструмента определяется выражением (6).

$$F = \bar{g}_F c b_1, \quad (6)$$

где \bar{g}_F - средняя величина касательного напряжения на передней поверхности инструмента, $\bar{g}_F = k_g \tau_p$, [6]; k_g - поправочный коэффициент, $k_g = 0,6875$ [8, 9]; c - длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента [10], $c = a \xi^{0,1} [\xi(1 - 2 \operatorname{tg} \gamma) + 2 / \cos \gamma]$; b_1 - ширина стружки, $b_1 = b \xi$; ξ - коэффициент усадки стружки; $\xi = \xi_0 \exp[(v + k_\xi)^m] + k_c$, k_{ξ_0} , k_ξ , k_c , m - поправочные коэффициенты.

Определение сил резания со стороны задней поверхности инструмента. Контактная площадка по задней поверхности состоит из трех участков (рис. 3): радиусного износа AD , плоской поверхности фаски износа $h_3 = DE$ и плоского участка задней поверхности под заточенным задним углом α на длине EL , определенной высотой Δ_3 .

Проекция силы резания, действующие со стороны задней поверхности инструмента (ЗПИ) определяются по формулам (7) и (8).

$$P_{z3} = 0,5 \tau_p \left[\rho \cdot \Phi + h_3 + \frac{\rho(1 - \cos \Phi)}{\xi \cdot \sin \alpha} \right], \quad (7)$$

$$P_{y3} = - \frac{0,5 \tau_p}{\mu} \left[\rho \cdot \Phi + h_3 + \frac{\rho(1 - \cos \Phi)}{\xi \cdot \sin \alpha} \right], \quad (8)$$

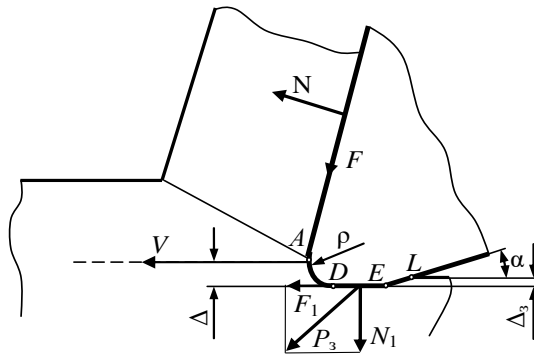


Рис. 3. Система сил, действующая со стороны задней поверхности инструмента: $ADEL$ - линия контакта по задней поверхности инструмента; ρ - радиус скругления режущей кромки; α - задний угол; F_1 - сила трения между задней поверхностью инструмента и поверхностью детали; P_3 - сила резания, действующая со стороны задней поверхности; N_1 - нормальная сила на задней поверхности инструмента; Δ_3 - величина упругого поднятия металла после прохождения скругленной режущей кромки

Определение системы сил, действующих со стороны передней и задней поверхностей инструмента. Проекция равнодействующей силы резания будут определяться выражениями (9) и (10).

$$P_z = P_{zп} + P_{z3}, \quad (9)$$

$$P_y = P_{yп} + P_{y3}, \quad (10)$$

Проекция силы резания на оси XYZ (рис. 4) определяем совместным рассмотрением сил со стороны передней и задней поверхностей инструмента.

$$P_x = \left\{ k_\tau \sigma_B (1 + \delta) \left[k_g \xi^{0,1} (\xi(1 - 2\text{tg}\gamma) + 1/\cos\gamma) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\cos\Phi \cos\varphi}{\cos(\Phi - \gamma)} - \frac{\sin\gamma \cos\varphi}{\cos(\Phi - \gamma)\sin\Phi} + \frac{k_f h_3}{S\mu_2 \tan\varphi} \right] \right\} ab;$$

$$P_y = \left\{ k_\tau \sigma_B (1 + \delta) \left[k_g \xi^{0,1} (\xi(1 - 2\text{tg}\gamma) + 1/\cos\gamma) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\cos\Phi \sin\varphi}{\cos(\Phi - \gamma)} - \frac{\sin\gamma \sin\varphi}{\cos(\Phi - \gamma)\sin\Phi} + \frac{k_f h_3}{S\mu_1} \right] \right\} ab;$$

$$P_z = \left\{ k_\tau \sigma_B (1 + \delta) \left[k_g \xi^{0,1} (\xi(1 - 2\text{tg}\gamma) + 1/\cos\gamma) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\sin\Phi}{\cos(\Phi - \gamma)} + \frac{\cos\gamma}{\cos(\Phi - \gamma)\sin\Phi} + \frac{k_f h_3}{S \sin\varphi} \right] \right\} ab.$$

где μ_1 – коэффициент трения по задней поверхности, при обработке ювенильной поверхности $\mu_1 = 0,6 \dots 0,8$; h_3 – износ инструмента по задней поверхности, $h_3 = 0,3$ мм.

На рис. 4 представлены результаты расчета проекций силы резания P_x , P_y , P_z для следующих условий обработки точением: обрабатываемый материал – сплав ХН65ВМТЮ; инструментальный материал – минералокерамическая пластина М101S фирмы «Tungaloy», Япония; глубина резания $t = 2$ мм; подача $S = 0,2$ мм/об; передний угол $\gamma = 0^\circ$; задний угол $\alpha = 7^\circ$; главный угол в плане $\varphi = 60^\circ$; фаска износа по задней поверхности $h_3 = 0,3$ мм (острозаточенный инструмент).

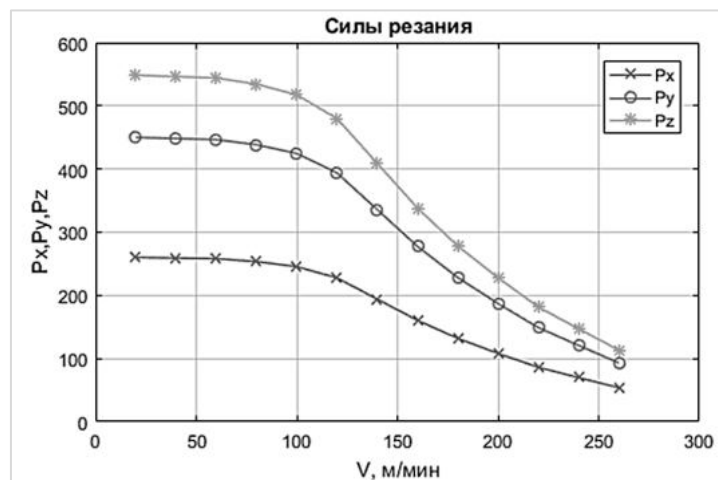


Рис. 4. График зависимости проекций силы резания P_x , P_y , P_z от скорости резания

Библиографический список

1. Петрашина Л. Н. Житник (Кочина) Т. Б. Влияние характера стружкообразования на износ режущего инструмента // Разработка и внедрение новых ресурсо-сберегающих технологий в области машиностроения. Орел: 1991. С. 27 – 32.
2. Кочина Т. Б., Файзиматов Б. Н., Александров А. С. Влияние скоростного резания на изнашивание инструмента из минералокерамики при обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе // Качество машин: межвузовский сборник науч. трудов. СПб: БГТУ «Военмех», 2011. С. 155 – 166.

3. *Проскураков С. Л.* Повышение эффективности обработки деталей из жаропрочных сплавов путем оптимизации режима резания инструментом из СТМ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. (05.03.01 - Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки). Рыбинск: Рыбинский авиационно-технологический ин-т, 1989. 19 с.
4. *Командури Р., Флом Д. Ж., Ли М.* Обзор программы исследования перспективных процессов механической обработки управления перспективного планирования НИР военного применения // Труды Американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. 1985. №4. С. 159 – 180.
5. *Розенберг Ю. А., Тахман С. И.* Силы резания и методы их определения. Часть 1. Общие положения : учеб. пособие. Курган: КМИ, 1995. 128 с.
6. *Корн Г. А., Корн Т. М.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
7. *Райт Р. К.* Расчет угла сдвига при резании на основании характеристик деформационного упрочнения // Конструирование и технология машиностроения. 1982. Т. 104. № 3. С. 177 – 186.
7. *Зорев Н. Н.* Вопросы механики процесса резания. М., Машгиз, 1956. 375 с.
8. *Силин С. С.* Исследование процессов резания методами теории подобия. Расчет оптимальных режимов на основе изучения процессов резания методами теории подобия // Труды Рыбинского авиационного технологического ин-та, №1. Ярославль: изд-во Верхняя Волга, 1966. С. 3 – 85.
9. *Розенберг Ю. А.* Задачи исследований процесса резания металлов // Совершенствование процесса резания и средств автоматизации для повышения производительности гибких станочных систем. Курган: Курган. машиностр. ин-т, 1990. С. 4 – 6.
10. *Рыжкин А. А., Висторопская Ф. А., Журек Я.* К вопросу оценки напряжений в контактной зоне при резании // Вестник ДГТУ. 2013. №7/8(75). С. 117 – 131.
11. *Полетика М. Ф.* Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. М.: Машиностроение, 1969. 114 с.

УДК 621.74669.35

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ (АТАО) НА СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ БРОНЗЫ БРНХК

Г. А. Воробьева, М. Ю. Силаев, Е. Ю. Ремшев, Е. А. Еськова

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Введение. В ряде работ [1, 2] отмечено, что сплав БрНХК может заменить кобальт – и никель-бериллиевые бронзы, гораздо более дорогостоящие и дефицитные при достижении оптимального сочетания прочностных и пластических свойств, жаропрочности, тепло- и электропроводности, и является одним из самых перспективных материалов широкого назначения, что позволяет использовать его в электротехнике, электронике, приборостроении и других наукоемких отраслях промышленности, в том числе в качестве сплава для пружин. В авиационной и космической технике применяется большое количество электромеханических систем. Одним из элементов, которых является упругий элемент из бронзы, например, в токосъемных устройствах космического аппарата, в электрошаговых двигателях космических и авиационных систем. Изделия из бронзы применяются для гашения трения, продления срока эксплуатации оборудования, облегчения работы механизмов, элементов токосъемных устройств. Из характеристик: устойчивость к температуре и трению, и антикоррозийные свойства.

Основное свойство, которым должны обладать материалы для пружин – высокое сопротивление малым пластическим деформациям в условиях кратковременного (предел упругости) и длительного (релаксационная стойкость) нагружения. Эти свойства зависят от состава и структуры материалов и могут быть получены как за счет применения холодной пластической деформации, так и дисперсионного твердения сплавов. Рост сопротивления малым пластическим деформациям сплавов связан в первом случае с увеличением плотности дислокаций, во втором с изменением субструктуры матрицы и с блокирующим действием частиц избыточной фазы. Дополнительное упрочнение может быть достигнуто в результате холодной пластической деформации после закалки с последующим старением. Пластическая деформация после закалки с последующим старением при температуре 440°C в течении 2 – 3 часов используется для повышения механических свойств БрНХК. Однако, при этом максимальное значение предела прочности не превышает 860МПа и имеется существенный разброс значений пластичности $\delta=2 - 5\%$ [2, 3]. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможности применения аэротермоакустической обработки для повышения прочности сплава [3].

Материал и методика исследования. Материалом исследования была выбрана бронза БрНХК 2,5-0,7-0,6 в виде прутка диаметром 3,5мм, полученного с применением термической обработки с последующей холодной пластической деформацией. Бронза подвергалась аэротермоакустической обработке (АТАО) по нескольким режимам [3]. Режим АТАО 1 – нагрев до температуры 150 – 170°C, выдержка 10мин., охлаждение части образцов проводилось в резонаторе газоструйного генератора звука при одновременном воздействии потока газа и акустического поля звукового диапазона частот с уровнем звукового давления 140 дБ в течении 10– 12 мин., а других образцов на воздухе. Режим АТАО 2, отличался от предыдущего тем, что акустическая обработка АТАО1 проводилась 2 раза, а режим АТАО3 от АТАО1 тем, обработка проводилась при комнатной температуре и при других акустических параметрах.

Образцы после указанных обработок испытывались на статическое растяжение на машине модели AGX-100 kN, SHIMADZU. Исследование микроструктуры проводилось на металлографическом микроскопе Leica DM2500, Германия, пористость сплава определялась с помощью компьютерной программы микроскопа; а также на растровом сканирующем электронном микроскопе(СЭМ) VEGA3 SBH, Чехия.

Результаты исследования и их обсуждение. С целью повышения механических свойств (предела упругости, условного предела текучести и временного сопротивления) заготовки образцов из деформированного сплава БрНХК подвергались аэротермоакустической обработке (АТАО) по 3 режимам (табл.1), различающимся по акустическим и температурным параметрам. После акустической обработки образцы из БрНХК испытывались на статическое растяжение, их механические свойства приведены в таблице 1.

Таблица 1
Механические свойства БрНХК в исходном состоянии и после аэротермоакустической обработки (АТАО)

№ режима	Вид предварительной обработки	Дополнительная обработка	Механические свойства			
			σ_b МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{0,005}$ МПа	δ %
1	Состояние поставки	–	681	460	383	3,2
2	Состояние поставки	АТАО1	690	602	478	2,8
3		АТАО 2	693	535	425	3,2
4		АТАО 3	1100	340	–	5,3

Как видно из представленных результатов применение АТАО позволяет повысить механические свойства Бр НХК по сравнению со свойствами в состоянии поставки при проведе-

нии акустической обработки по всем 3 режимам. Наиболее высокие свойства $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{0,005}$ были получены при обработке по режиму № АТАО1, а σ_b при обработке по режиму №3.

Анализ диаграмм статического растяжения образцов позволяет выделить на ней 2 участка: 1 включает зону упругой деформации (линейная часть) и часть диаграммы до величины нагрузки соответствующей $R_{0,2}$, характеризующие сопротивление материала малым пластическим деформациям, на величину которых влияет исходная (до механических испытаний) дислокационная структура, мало изменяющаяся в процессе испытания; 2 участок диаграммы, соответствующий нагрузкам превышающим $R_{0,2}$, характеризует сопротивление материала большим пластическим деформациям. При этом исходная дислокационная структура сильно изменяется в процессе механических испытаний, растет плотность дислокаций, они перераспределяются и создается новая дислокационная структура [3].

Свойства, сформированные при проведении АТАО1 и 2, обеспечивают повышение сопротивления малым пластическим деформациям за счет блокировки дислокаций. При проведении АТАО 3 формируется дислокационная структура, снижающая упругие характеристики бронзы. Микроструктура БрНХК исследовалась в исходном состоянии и после дополнительных АТАО (рис.1).

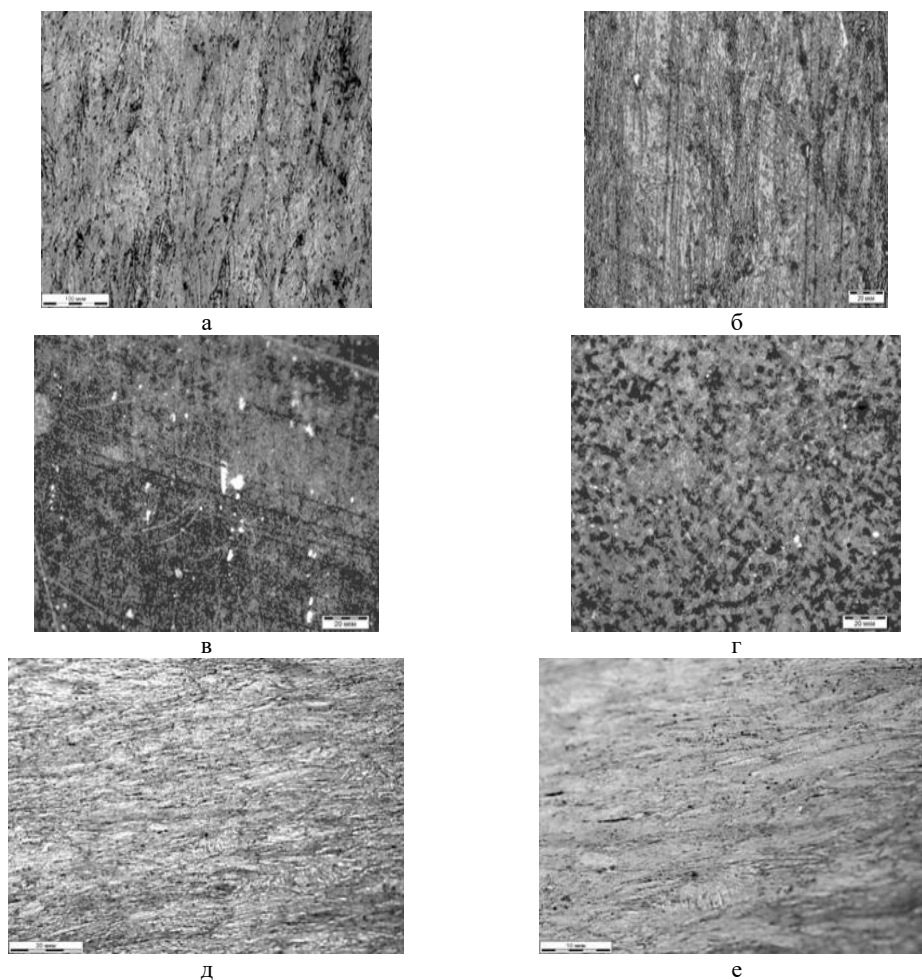


Рис.1. Микроструктура БрНХК

а, в – исходное состояние; б, г – исходное состояние +АТАО1; д, е – исходное состояние+АТАО3

При пластической деформации часть энергии затраченной работы поглощается металлом в виде энергии кристаллической решетки, в том числе энергии дефектов упаковки (ЭДУ), и энергии упругой деформации при возникновении остаточных напряжений. В процессе пластической деформации возрастает плотность дислокаций и концентрация вакансий, появляются участки с локальной разориентировкой кристаллической решетки. В зернах сплава, которые вытягиваются в направлении главной деформации растяжения образуются деформационные полосы (ДП) развернутые на большие углы по отношению к соседним участкам, также вытянутые в направлении деформации, но внутри которых ориентировка меняется незначительно. Границей между соседними ДП является переходная полоса (ПП), в которой ориентировка меняется от одной ДП до соседней. При анализе микроструктуры ПП видны либо в виде тонких линий или в виде границ областей разного контраста, при этом она может не отличаться от границ вытянутых зерен. На рис.1 наблюдаются оба вида ПП, а также наблюдаются полосы сдвига (ПС), расположенные в виде елочки или взаимно пересекающиеся (рис.1д, е; рис.2).

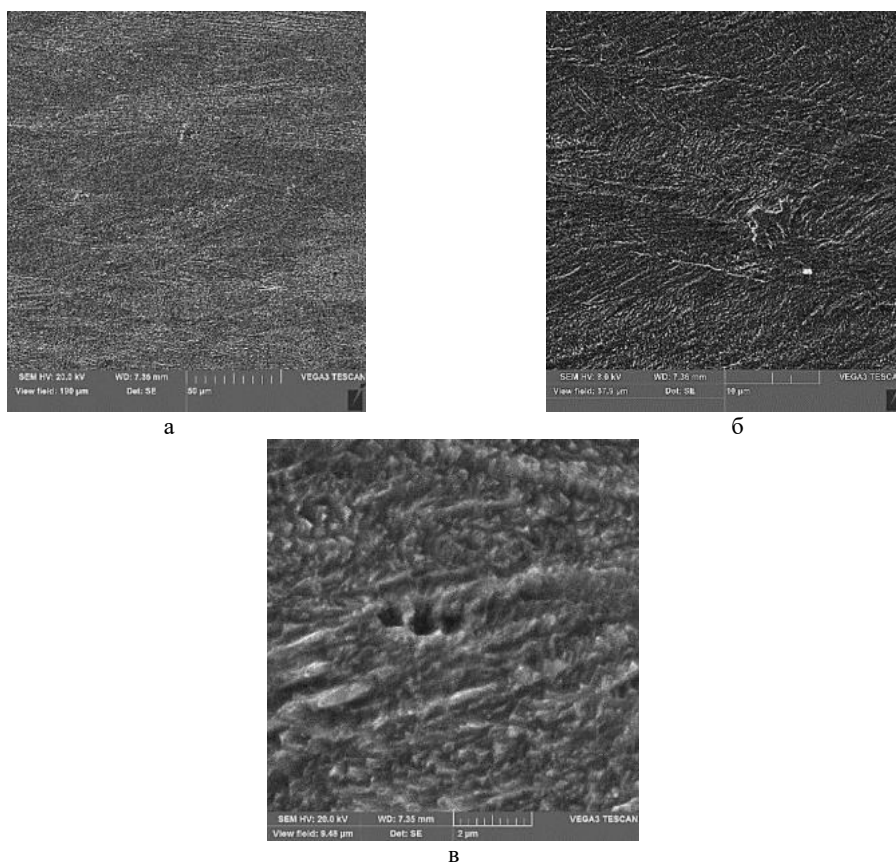


Рис. 2.Микроструктура сплава БрНХК(СЭМ)

После АТАО, реализованной по всем режимам происходит измельчение структурных составляющих: как избыточной фазы - силицида хрома Cr_3Si , выделяющейся на стадии кристаллизации сплава так и уменьшения расстояния между полосами сдвига (рис.2а), что свидетельствует о большей степени локализации пластической деформации в этих областях.

В процессе проведения АТАО1,2 и 3 происходит формирование разной дислокационной структуры: при АТАО1,2, реализуемой при нагреве до 150 – 170°C (рис.1б, г) причиной упрочнения является закрепление подвижных дислокаций в исходном холоднодеформиро-

ванном материале атомами примесей или легирующих элементов, а также возникновение областей с ближним порядком расположения атомов [5]. Это подтверждается результатами механических испытаний, приведенными в таблице 1: максимальное увеличение таких свойств как $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{0,05}$, величина которых определяется сформированной исходной дислокационной структурой, при существенно меньшем увеличении σ_b .

При использовании режима АТАОЗ, реализуемой при температуре 20°C и других акустических параметрах обработки, происходит уменьшение значений $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{0,05}$ при существенном росте σ_b . При пластической деформации внутри деформационных полос может образоваться ячеистая структура т.е. протекает процесс полигонизации. В процессе полигонизации происходит образование блоков, разделенных стенками дислокаций в результате релаксационных процессов перераспределения дислокаций в объеме кристаллита. Сплетения дислокаций образуют размытые стенки (границы), окружающие области с меньшей плотностью дислокаций. Этот процесс является энергетически выгодным, так как стенка из дислокаций не имеет дальнедействующего поля напряжений [5]. При обработке по этому режиму дислокации разного знака, имеющиеся в сплаве в исходном состоянии, вероятно, встречаясь частично аннигилируют, и общая плотность дислокаций несколько уменьшается, что приводит к снижению упругих свойств сплава.

В процессе испытания образцов в области нагрузок, вызывающих значительную пластическую деформацию, формируется структура, обеспечивающая повышение значений σ_b . В процессе пластической деформации образуются ячейки и субзерна, границы которых служат барьерами для скользящих дислокаций. При этом АТАО способствует образованию ячеек с уменьшенным размером, что является причиной упрочнения сплава при проведении этой обработки.

Микроструктура БрНХК после обработки АТАОЗ изучалась на растровом электронном микроскопе (рис. 2).

Дисперсные включения фазы Cr_3Si преимущественно находятся вне зоны полос сдвига, которые являются участками сильной локализации сдвиговой деформации (рис.2а). Так как для этого сплава характерен средний уровень ЭДУ, то в процессе деформации образуются ячеистая структура и микрополосы. Местом зарождения центров рекристаллизации являются полосы сдвига, вытянутые зерна образуются в переходных полосах на начальной стадии рекристаллизации (рис.2б, в) [5]. Как ранее было установлено, при проведении АТАО протекает микропластическая деформация, позволяющая значительно увеличить скорость диффузионных процессов и, следовательно, снизить температуру начала процессов возврата и рекристаллизации [4].

Анализ диаграммы статического растяжения бронзы, значений ее механических свойств (величины относительного удлинения) после АТАОЗ позволяют предположить возможность проведения после этой обработки холодной пластической деформации со степенью около 30-40 %, что позволит повысить упругие свойства при сохранении других параметров сплава на уровне значений $\sigma_b = 1000 \text{ МПа}$, $\delta = 5\%$. Такой уровень механических свойств позволит применять БрНХК в качестве как конструкционного материала так и материала для упругих элементов (пружин) без дополнительного старения.

В сплаве присутствуют поры (рис.2в), определение количества и характера распределения которых по размерам, осуществлялось с помощью компьютерной программы металлографического микроскопа Leica (рис.3). Коэффициент заполнения равен 0,2%. Наличие пор, очевидно, связано с перераспределением вакансий и их объединением в сплаве в процессе обработок (последовательное проведение циклов: закалка-холодная пластическая деформация), проводимых в исходном материале.

Наличие значительного количества пор негативно влияет на прочностные свойства сплава. В холоднодеформированной бронзе БрНХК имеются ограниченное количество пор небольшого размера (большинство пор имеет размер, не превышающий 10 мкм), что не оказывает существенного влияния на прочность сплава.

Исходя из выше изложенного, технология АТАОЗ может быть использована как предварительная обработка, позволяющая увеличить способность БрНХК в исходном состоянии к

дополнительной пластической деформации, – следовательно, улучшить ее технологические свойства, что обеспечит возможность сформировать требуемый комплекс свойств БрНХК для использования ее в качестве материала для упругих элементов без применения последующего старения. Реализация предлагаемого технологического процесса позволит не только снизить стоимость изготовления пружин без снижения механических свойств за счет отказа от операции старения, но, можно предположить, и возможность их роста.

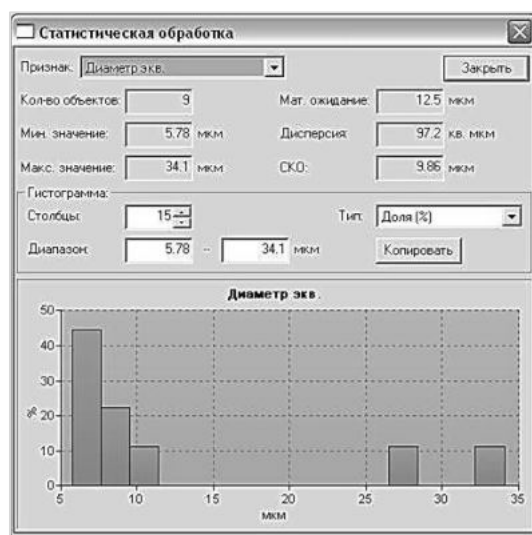


Рис. 3. Гистограмма распределения количества пор по размерам в БрНХК.

Заключение. Установлено влияние АТАО на формирование структуры и свойств бронзы БрНХК. Применение АТАО, реализуемой при разных температурах и акустических параметрах позволяет увеличить как сопротивление малым (АТАО1, 2) так и большим пластическим деформациям (АТАО3) сплава БрНХК.

Технология АТАО3 может быть использована как предварительная обработка, позволяющая увеличить способность БрНХК в исходном состоянии к дополнительной пластической деформации, т.е. улучшить ее технологические свойства, что обеспечит возможность сформировать требуемый комплекс свойств БрНХК для использования ее в качестве материала для упругих элементов без применения последующего старения.

Библиографический список

1. Пастухова Ж. П., Рахитад А. Г. Пружинные сплавы цветных металлов. М.: Металлургия, 1983. 364 с.
2. Карева Н. Т., Корягин Ю. Д., Медведева Г. И. Влияние различных режимов старения на свойства сплава БрНХК // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 1985. № 6. С. 64 – 68.
3. Данилин Г. А., Ремиев Е. Ю., Воробьева Г. А., Силаев М. Ю. и др. Обеспечение эксплуатационной надежности упругих элементов акустическими методами // Металлург. 2015. №3. С. 48 – 52.
4. Воробьева Г. А., Усков В. Н. Аэротермоакустическая обработка сталей и сплавов. СПб: БГТУ «Военмех», 2012. 131 с.
5. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия. 1986. 479 с.

**ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТКИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

К. С. Голубев, А. В. Титов

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

При изготовлении машиностроительных деталей широко применяют операции объемной штамповки: выдавливание, прошивка, высадка и др. (рис.1).

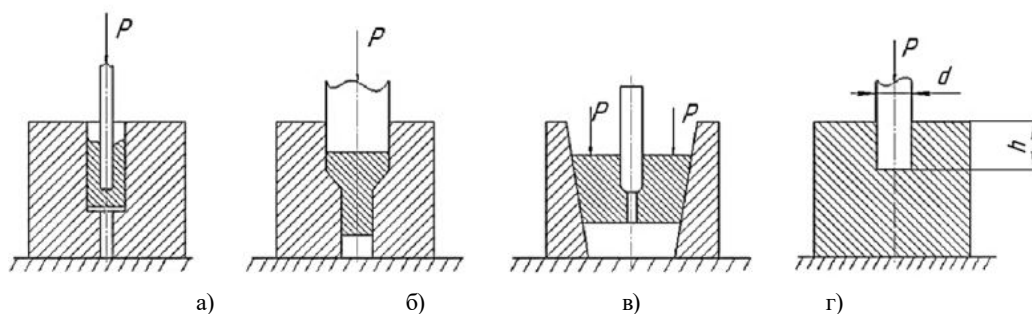


Рис. 1. Схемы операций объемной штамповки:
продольное обратное выдавливание (а), продольное прямое выдавливание (б),
выдавливание радиальным обжатием (в), прошивка (г);
h – глубина полости; d – диаметр полости

В процессах объемной штамповки происходит перераспределение материала по толщине заготовки. Очаг пластической деформации распространяется на весь объем заготовки или на ее отдельную часть. В очаге пластической деформации, происходит искажение кристаллической решетки. В каждой точке очага возникают деформации и напряжения, оказывающие влияние на размеры изготавливаемого полуфабриката, стойкость рабочего инструмента и ресурс пластичности материала заготовки [1]. В процессе проектирования технологических операций объемной штамповки научный интерес представляет исследование закономерностей формоизменения материала и распределения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС). В настоящее время для исследования напряженно-деформированного состояния широко применяют экспериментально-аналитические методы: делительной сетки, твердости, муаровых полос, микроструктурных измерений и др. [2]. Наиболее распространенным является метод делительной сетки. Он предполагает нанесение на боковую поверхность или плоскость разреза составной заготовки делительной сетки, измерение координат узлов исходной и искаженной сетки, деформирование заготовки, расчет параметров НДС. Процесс нанесения делительной сетки и измерения координат узлов характеризуется повышенной трудоемкостью, а также погрешностью измерений, которая влияет на точность параметров НДС. В статье предложено решение, позволяющее снизить трудоемкость метода делительных сеток, за счет построения расчетной делительной сетки.

Решение получено при использовании 2-х уравнений: первое уравнение представляет собой математическое условие ортогональности линий исходной сетки (1), второе уравнение – математическое условие сохранения объема элементарных ячеек сетки (2) в процессе пластической деформации [3] (рис. 2):

$$\frac{\partial r}{\partial R} \frac{\partial z}{\partial Z} + \frac{\partial z}{\partial R} \frac{\partial z}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial r}{\partial R} \frac{\partial z}{\partial Z} - \frac{\partial z}{\partial R} \frac{\partial r}{\partial Z} = \frac{R}{r} \quad (2)$$

где z и r – текущие координаты точек твердого тела; Z и R – начальные координаты (рис. 2); Каждое уравнение содержит 2 неизвестных переменных z и r

На рис. 2 представлена графическая интерпретация непрерывной и дискретной сеточных моделей.

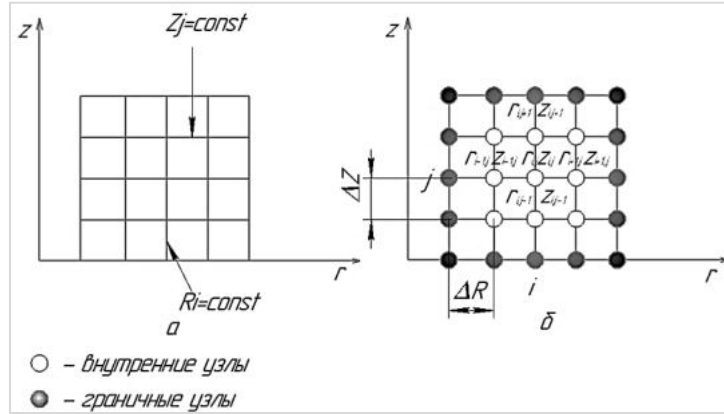


Рис. 2. Непрерывная (а) и дискретная (б) модели сеток:
 ΔR и ΔZ – размеры ячеек исходной сетки; i, j – индексы, характеризующие номер строки и столбца расчетной сетки соответственно

Непрерывная сеточная модель представляет собой совокупность большого числа ортогональных, в исходном состоянии линий делительной сетки, расстояние между которыми стремится к нулю. Дискретная сеточная модель состоит из ортогональных в исходном состоянии линий, расстояние между которыми не равно нулю.

Решение уравнений (1) и (2) выполнено по следующему алгоритму: 1- преобразование дифференциальных нелинейных уравнений в алгебраические; 2- решение системы нелинейных алгебраических уравнений.

Преобразование дифференциальных уравнений в алгебраические выполнено методом конечных разностей по формулам:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial r}{\partial R}\right)_{ij} &\approx \frac{r_{i+1,j} - r_{i-1,j}}{2 * \Delta R}, \\ \left(\frac{\partial r}{\partial Z}\right)_{ij} &\approx \frac{r_{i,j+1} - r_{i,j-1}}{2 * \Delta Z}, \\ \left(\frac{\partial z}{\partial R}\right)_{ij} &\approx \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2 * \Delta R}, \\ \left(\frac{\partial z}{\partial Z}\right)_{ij} &\approx \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2 * \Delta Z}, \end{aligned}$$

где r и z – текущие координаты узлов делительной сетки; R и Z – начальные координаты узлов делительной сетки; i, j – текущие индексы.

Решение системы нелинейных алгебраических уравнений осуществлено методом простых итераций при заданных начальных и граничных условиях. Начальными условиями яв-

ляются размеры ячеек исходной ортогональной сетки $\Delta R, \Delta Z$. Граничными условиями – текущие координаты граничных узлов искаженной делительной сетки (рис.2б). Для решения системы нелинейных алгебраических уравнений методом простых итераций выполнено их преобразование к такому виду, при котором уравнения сходятся к точному решению при любых исходных значениях текущих координат внутренних узлов сетки на первом шаге итерации. На языке Фортран 6.1 написана программа «Сетка», осуществляющая расчет текущих координат внутренних узлов искаженной делительной сетки и программа «График», выполняющая ее графическое построение.

На рис. 3 представлена увеличенная фотография искаженной делительной сетки после выдавливания полости в заготовке. Материал Сталь 15; диаметр полости $d=8$ мм, относительная глубина полости $\frac{h}{d} = 0,31$.

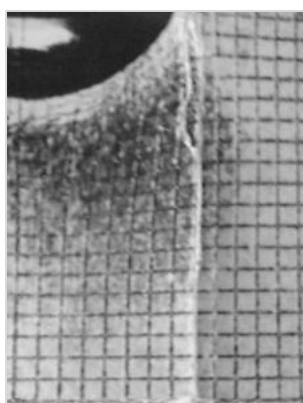


Рис. 3. Фотография искаженной сетки после выдавливания полости заготовки из Стали 15

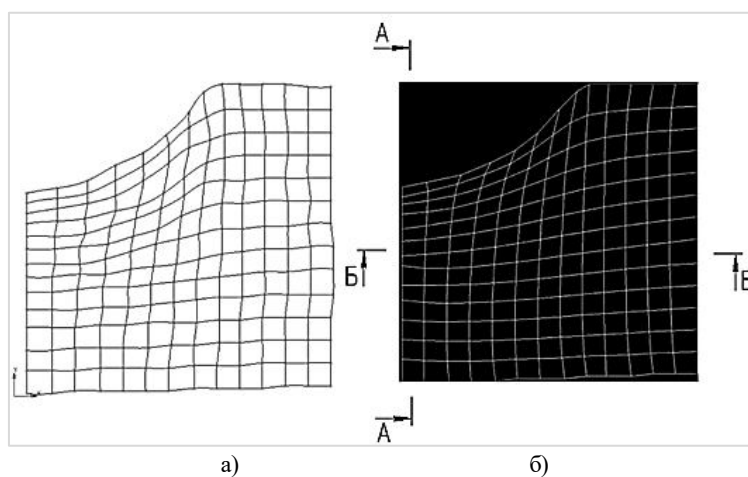


Рис. 4. Экспериментальная (а) и расчетная (б) делительные сетки для заготовки из Стали 15:
А–А – продольное расчетное сечение; Б–Б – поперечное расчетное сечение

На увеличенной фотографии измерены координаты узлов делительной сетки и в программе «Компас 3D». Построено ее изображение (рис. 4а). В программе «Сетка» вычислены координаты внутренних узлов делительной сетки при заданных текущих координатах (r и z) граничных узлов и размеров ячеек сетки до деформации. Изображена расчетная делительная сетка на рис. 4б.

Анализ представленных сеток показал высокую степень их совпадения. При этом замечено, что на точность совпадения экспериментальной и расчетной делительных сеток оказывает влияние точность измерения координат граничных узлов экспериментальной делительной сетки.

Используя начальные и текущие координаты узлов экспериментальной и расчетной делительных сеток вычислены параметры деформированного состояния заготовки в расчетных сечениях А–А; Б–Б (рис. 4).

На рис. 5 изображены графики распределения параметров деформированного состояния заготовки в продольном сечении А–А.

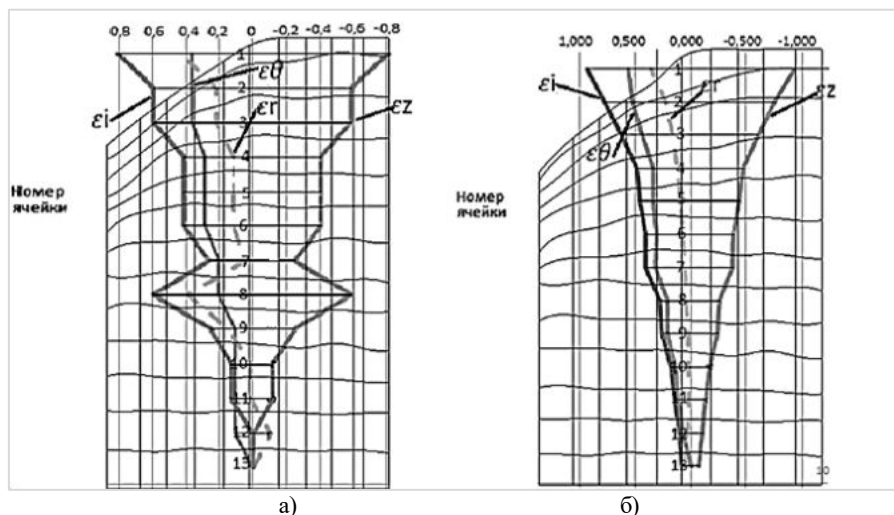


Рис. 5. Распределение параметров деформации в сечении А–А:
а) экспериментальная и б) расчетная делительные сетки

Из приведенных графиков видно, что результаты расчетов параметров деформации для экспериментальной и расчетной делительных сеток в продольном сечении заготовки идентичны. На рисунках видно, что наибольшая деформация ячеек сетки произошла в верхней части заготовки, примыкающей к полости. Параметр интенсивности деформации ϵ_i изменяется в сечении А–А по высоте в интервале от 0,81 до 0, у экспериментальной сетки и в интервале от 0,97 до 0,06, у расчетной сетки. По мере удаления от зоны внедрения инструмента деформация уменьшается, постепенно приближаясь к нулю.

Компонент радиальной деформации ϵ_r в большинстве расчетных точек принимает положительные значения (деформация удлинение), изменяясь в диапазоне от 0,4 до -0,1 у экспериментальной сетки и в интервале от 0,22 до -0,055 у расчетной сетки.

Компонент окружной деформации ϵ_θ во всех расчетных точках принимает положительные значения (деформация удлинение), и изменяется от 0,37 до 0, у экспериментальной сетки и в интервале 0,52 до 0, у расчетной сетки.

Компонент осевой деформации ϵ_z во всех точках принимает отрицательные значения (деформация укорочения), и изменяется от -0,81 до 0, у экспериментальной сетки и в интервале от -0,91 до -0,04, у расчетной сетки.

На рис.6 изображены графики распределения параметров деформированного состояния заготовки в поперечном сечении заготовки Б–Б.

Анализ графиков представленных на рис. 6, показал, что экспериментальная (а) и расчетная (б) делительные сетки идентичны. Наибольшая деформация ячеек сетки происходит в

центре заготовки. Параметр интенсивности деформации ε_i изменяется в интервале от 0,41 до 0, у экспериментальной сетки и в интервале от 0,43 до 0,07, у расчетной сетки. По мере удаления от центра, где происходит внедрение инструмента, значения компонентов деформации приближаются к нулю.

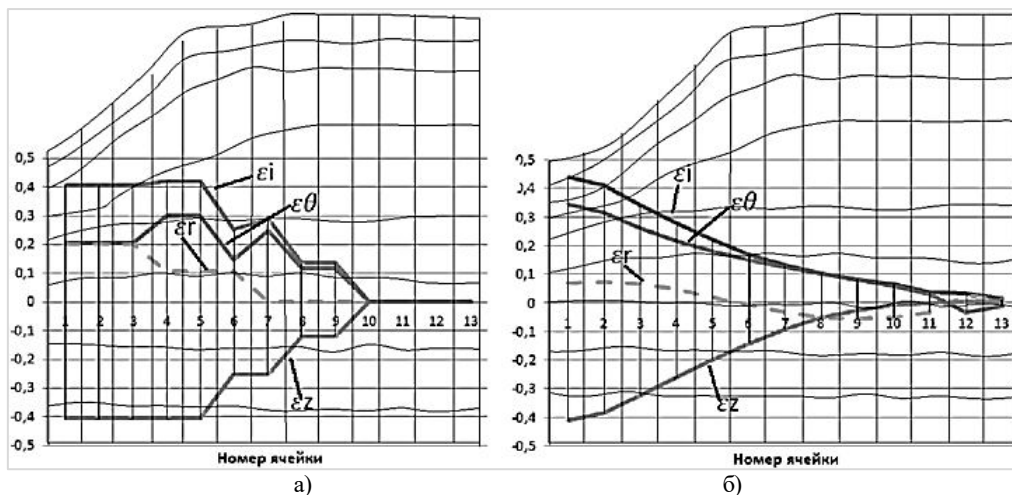


Рис. 6. Распределение параметров деформированного состояния в расчетном сечении Б–Б:
а) экспериментальная и б) расчетная делительные сетки

Компонент радиальной деформации ε_r в большинстве расчетных точек принимает положительные значения (деформация удлинение), изменяясь в интервале от 0,2 до 0, у экспериментальной сетки и в интервале от 0,08 до $-0,057$, у расчетной сетки.

Компонент окружной деформации ε_θ во всех расчетных точках принимает положительные значения (деформация удлинение), изменяясь в интервале от 0,3 до 0, у экспериментальной сетки и в интервале от 0,34 до 0,037, у расчетной сетки.

Компонент осевой деформации ε_z во всех расчетных точках принимает отрицательные значения (деформация укорочения), изменяясь в интервале от $-0,4$ до 0, у экспериментальной сетки и в интервале от $-0,41$ до 0, у расчетной сетки.

Таким образом, получено решение, позволяющее значительно снизить трудоемкость метода делительных сеток при определении параметров НДС, а также уменьшить погрешность, связанную с измерением текущих координат внутренних узлов делительной сетки.

Биографический список

1. Овчинников А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. М.: Машиностроение, 1983. 201 с.
2. Смирнов-Аляев Г. С., Чикидовский В. П. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. Л: Машиностроение, 1972. 360 с.
3. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные расчеты процессов конечного формоизменения материала. Л: Машиностроение, 1978. 368 с.

РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТОВ СМЕШЕНИЯ ТРУБЧАТОЙ ДЛИННОМЕРНОЙ ПРОДУКЦИИ

А. В. Евсеев, В. В. Прейс

Тульский государственный университет

Методика проектирования аппаратов смешения длинномерной продукции. Программы выпуска трубчатой продукции различных типоразмеров очень сильно различаются: в одном случае она измеряется десятками тонн в смену, в другом – лишь сотнями килограммов. В связи с этим предприятию необходимо иметь как специальные аппараты, предназначенные для выпуска одного типоразмера массовой продукции, так и универсальные, на которых можно смешивать различные номенклатуры трубчатого продукта. При этом принципы проектирования специальных и универсальных аппаратов существенно отличаются друг от друга [1 – 3].

Вместе с тем процессу проектирования как универсальных, так и специальных аппаратов смешения присущи общие принципы, которыми руководствуются при проектировании любой технической системы. Проектирование технической системы складывается из трех этапов: разработки принципиальной схемы машины; расчета и определения размеров, масс и т.п.; выбора оптимальных схем конструкций. Однако такой подход делает очень продолжительные сроки создания новой техники [4 – 6].

На наш взгляд, более целесообразно использовать агрегатно-модульный принцип, заключающийся в том, что система (машина, аппарат и т.п.) комплектуется из имеющихся узлов и механизмов и задача конструктора заключается в таком подборе этих составляющих элементов, чтобы они были функционально совместимы и в совокупности реализовывали бы процесс получения продукции заданной номенклатуры [7 – 10].

Роторно-конвейерный аппарат непрерывного дозирования смешения трубок включает в себя четыре типа модулей (см. рис. 1).

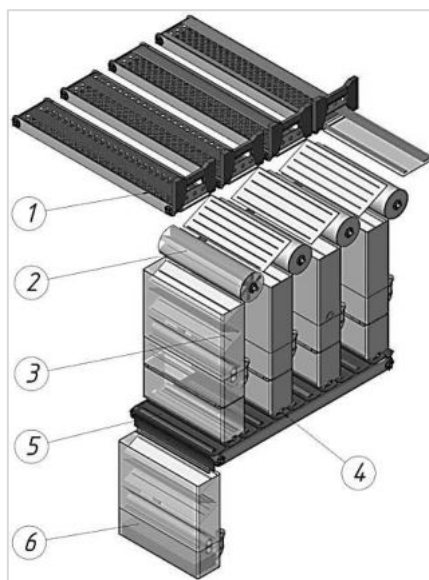


Рис. 1. Аппарат смешения трубчатой продукции: 1 – конвейеры подачи трубок с сушкой и ножами, 2 – механизмы выгрузки, 3 – кассеты, 4 – дозирующие устройства, 5 – транспортер выгрузки сформированных доз, 6 – емкость для смеси

- Модуль загрузки, состоящий из кассеты и роторного дозирующего устройства;
- основной (технологический) модуль, представляющий собой транспортер, где суммируются потоки малых партий, и смешивается продукция;
 - модуль выгрузки смешанной продукции;
 - модуль контроля и управления процессом и аппаратом, т.е. система управления.

Имеющийся типаж каждой модульной группы для всей номенклатуры трубок позволяет исключить при проектировании второй этап и от принципиальной схемы перейти непосредственно к третьему этапу – выбору оптимальных схем конструкции аппарата, т.е. к компоновке аппарата для смешения конкретной продукции.

Изложим отдельные элементы проектирования специального и универсального аппаратов смешения.

Проектирование специального аппарата смешения. Исходными данными при проектировании аппарата являются:

- характеристика продукта (диаметр, длина и масса трубки, их диапазон, прогиб трубки, прочностные данные и др.);
- требования по качеству смешения (коэффициент вариации или другой критерий);
- производительность аппарата (массовая или штучная);
- максимально возможное число смешиваемых партий;
- диапазон возможного соотношения смешиваемых партий.

Аппараты смешения, как и любые технологические машины, проектируются либо на заданную, либо на максимальную производительность. Специальные аппараты предназначены для смешения одного конкретного типоразмера продукции, программа выпуска которого очень велика и поэтому следует проектировать аппарат, исходя из предельно возможных значений производительности составляющих модулей [11 – 15].

Модули загрузки могут обеспечить практически любую производительность, так как их можно поставить сколь угодно много. Модуль загрузки может иметь различные конструктивные реализации и также может обеспечить очень большую пропускную способность. Система управления позволяет, учитывая наличие быстродействующих ЭВМ, управлять большим количеством продукции в единицу времени. Поэтому ограничивающим звеном в аппарате является технологический модуль, так как однорядное расположение трубок диктует конкретную транспортную скорость, максимум которой ограничен динамикой работы узлов транспортера, условиями приема трубок на транспортер, условиями безопасной работы и т.п. Поэтому вначале следует определить или назначить максимально возможную транспортную скорость транспортера, а затем определить максимальную производительность аппарата.

При проектировании аппарата на заданную производительность необходимо вначале определить, не превышает ли заданная производительность максимальную. В случае превышения заданная производительность приравнивается к максимальной, а заданный объем выпуска обеспечивается созданием нескольких образцов аппарата.

На первом этапе подбирается необходимый модуль загрузки. Исходя из типоразмера трубки выбираются из соответствующего типажа кассета и роторное дозирующее устройство.

Одним из основных вопросов при компоновке аппаратов смешения является определение числа модулей загрузки и частоты вращения роторов дозаторов.

В случае невысоких требований к качеству смешения нет необходимости устанавливать подпитывающие дозирующие устройства и минимально необходимое число модулей загрузки аппарата с массовой производительностью для конкретного типоразмера трубки определяется в следующей последовательности.

1. Определяется j -ая доля производительности аппарата, соответствующая массе j -ой малой партии, подаваемой в единицу времени

$$P_j = P_{j_{\text{мас}}} P,$$

где $P_{j_{\text{мас}}}$ – массовая доля j -ой малой партии.

2. Определяется число роторных дозирующих устройств, необходимое для подачи трубок j -ой малой партии

$$W_j = \frac{1000 \cdot P_j}{\omega_{0j} \cdot P_\delta},$$

где ω_{0j} – средняя масса трубки j -ой малой партии, г; P_δ – штучная производительность роторного дозирующего устройства, предназначенного для подачи трубок данного типоразмера.

В случае дробного значения W_j необходимо округлить его до ближайшего большего целого числа.

Очевидно, минимально необходимое число модулей загрузки для аппарата смешения шести партий, как максимально возможного количества партий, при любом их соотношении определится по формуле

$$W = \frac{P_{\text{ум}}}{P_\delta} + 6,$$

где $P_{\text{ум}}$ – штучная производительность аппарата, шт/ч;

$$P_{\text{ум}} = \sum_{j=1}^j \frac{P_\delta}{\omega_{0j}}.$$

После этого определяется принятая штучная производительность $P_{\delta_j}^{np}$ дозирующего устройства, подающего j -ую малую партию

$$P_{\delta_j}^{np} = \frac{1000 \cdot P_j}{\omega_{0j} \cdot W_j^{np}},$$

где W_j^{np} – принятое число дозирующих устройств, подающих j -ую малую партию. Затем определяется частота вращения ротора каждого j -го дозирующего устройства

$$n_{p_j} = \frac{P_{\delta_j}^{np}}{Z_j \cdot \eta_1 \cdot \eta_2},$$

где Z_j – число пазов (позиций) ротора j -го дозирующего устройства; η_1 – коэффициент выдачи трубок на транспортер смешения, учитывающий незападание трубок в пазы (позиции) ротора, проскальзывание ротора и т.п. Экспериментами установлено, что $\eta_1 \approx 0,8 \dots 0,85$, η_2 – коэффициент использования аппарата; для аппаратов данного типа можно принять $\eta_2 \approx 0,9$.

Необходимая частота вращения обеспечивается кинематической цепью.

В случае снятия ограничения однорядного расположения трубок на транспортере аппарат рассчитывается на заданную производительность, при этом определяется минимально необходимое число дозирующих устройств для лимитирующего варианта смешения малых партий и проверяется механизм выгрузки на пропускную способность.

При повышенных требованиях к качеству смешения аппарат должен включать также дозирующие устройства, число которых должно быть не менее наибольшего числа смешиваемых партий и которые могут работать в двух режимах: как подпитывающие, получающие команду на выдачу недостающих трубок соответствующих малых партий, и как основного в случае невысоких требований к качеству смешения или в случае отказа основных дозирующих устройств, или же в случае небольшого числа смешиваемых партий.

На следующем этапе в зависимости от длины трубки, точности ее изготовления и производительности выбирается тип транспортно-ориентирующего устройства (технологический модуль) и устройства выгрузки (модуль выгрузки) из имеющегося типажа соответствующих механизмов.

Как известно, для обеспечения однородности продукта могут смешиваться от двух до шести малых партий. При этом в соответствии с техническими условиями масса каждой малой партии должна быть не менее 1 т, а разница между массами малых партий не должна превышать 6 т, т.е. соотношение между партиями колеблется от 1:1 до 1:7.

С целью наиболее полного использования аппарата необходимо, чтобы при любом соотношении и любом количестве смешиваемых партий дозирующие устройства по возможности работали с наибольшей производительностью. В этом случае возникает задача оптимального распределения имеющихся в аппарате дозирующих устройств, подающих малые партии продукта. Следует отметить, что оптимальное распределение целесообразно находить с помощью специальных номограмм или ЭВМ.

При проектировании универсального или специализированного аппарата смешения трубчатого продукта в качестве исходных данных, помимо тех, которые указаны для специальных аппаратов, необходимо иметь также номенклатуру трубок, подлежащих смешению, а также минимально допустимую производительность аппарата для каждого типоразмера трубки.

Остановимся на некоторых этапах проектирования аппарата на максимальную производительность, предназначенного для смешения тонкосводной продукции. Исходя из номенклатуры трубок, необходимо выбрать из типажа кассет четыре комплекта, каждый из которых обеспечит загрузку, транспортирование, выгрузку и хранение продукции длиной соответственно: первый комплект – от 79 до 94 мм; второй – от 102 до 130 мм; третий – от 127 до 151 мм и четвертый – от 179 до 190 мм.

С учетом диаметра и длины трубки выбирается универсальное дозирующее устройство, в котором регулируемые боковые станки обеспечивают загрузку трубки длиной от 79 до 190 мм, а четыре комплекта съемных роторов (барабанов) позволяют поштучно выдавать трубки диаметром от 2,7 до 6,8 мм.

Перейдем к определению минимального числа дозирующих устройств необходимого для получения максимальной, исходя из однорядного расположения трубок на транспортере, производительности аппарата для каждого типоразмера трубок при любом варианте смешения (смешение от двух до шести партий с соотношением от 1:1 до 1:7). Для этого вначале установим тот i -ый типоразмер трубки, который потребует наибольшего числа дозирующих устройств. Очевидно, наибольшее число дозирующих устройств будет для типоразмера трубок, имеющего наименьший коэффициент относительной производительности, представляющий собой отношение производительности одного дозирующего устройства Π_{∂_i} к максимальной цикловой производительности аппарата

$$K_{\Pi_i} = \frac{\Pi_{\partial_i}}{\Pi_{a_{\max_i}}} = \frac{n_i \cdot Z_i \cdot \Delta l'_i}{\Pi_{a_{\max_i}}},$$

где $\Delta l'_i$ – погонная длина транспортера, необходимая для расположения одной трубки. Так как частота вращения барабанов и транспортная скорость транспортера изменяются незначительно, а высота падения трубки на транспортер имеет небольшую величину, то $\Delta l'_i$ можно принять пропорциональной длине трубки.

Тогда уравнение можно записать так

$$K_{\Pi_i} \cong C_K \cdot Z_i \cdot \Delta l_i,$$

где C_K – постоянный коэффициент; Δl_i – длина трубки i -го типоразмера.

Таким образом, лимитирующим является типоразмер трубки, имеющий наименьшее произведение числа пазов ротора, определяющего диаметр трубки, на длину трубки.

Порядок нахождения числа дозирующих устройств для лимитирующего варианта аналогичен порядку, описанному при проектировании специальных аппаратов. В дальнейшем из имеющегося типажа выбираются четыре комплекта механизма выгрузки. Аппараты должны изготавливаться в специализированном перенастраиваемом варианте для смешения трубчатой продукции нескольких типоразмеров.

В зависимости от ширины полотна рабочего органа транспортера аппарата должны изготавливаться трех типоразмеров:

- 1.0.0. – с шириной полотна 200 мм;
- 2.0.0. – с шириной полотна 300 мм;
- 3.0.0. – с шириной полотна 400 мм.

В зависимости от количества установленных дозаторов аппараты должны изготавливаться трех типов:

- 0.0.1. – с числом дозаторов 6;
- 0.0.2. – с числом дозаторов 9;
- 0.0.3. – с числом дозаторов 12.

В зависимости от выполняемых функций системы управления аппараты могут быть без подпитывающих дозирующих устройств и с подпитывающими дозирующими устройствами, в обозначении которых в конце нумерации ставится буква П.

Основные параметры аппаратов смешения. Основными показателями технико-экономической эффективности работы аппарата при обязательном условии обеспечения качества в соответствии с техническими условиями на смешение трубчатой продукции являются цикловая производительность и время смешения продукции определенной массы.

В качестве цикловой производительности принимается величина смешанной в заданный интервал времени массы продукции при равном соотношении составляющих партий. При этом приведены данные для двух предельных типоразмеров продукции.

В качестве более общего критерия эффективности принято время T , в течение которого получена смесь массой, равной массе аппарата

$$T = \tau_{см} = \frac{1000G}{\Pi_{ан}^e},$$

где G – масса общей партии.

Библиографический список

1. Лукаш А. Н., Евсеев А. В., Чувпило А. В. Развитие технологий и оборудования для приготовления смесей сыпучих материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2000. Вып. 5. С. 218 – 224.
2. Патент 2129911 РФ. Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации / А. Н. Лукаш, И. А. Клусов, А. В. Евсеев. Оpubл. 10.05.99.
3. Патент 2271243 РФ. Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации / А. Н. Лукаш, А. В. Евсеев, Т. А. Овчинникова, К. В. Власов, О. В. Карпухина. Оpubл. 10.03.06.
4. Макаров Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
5. Чувпило А. В. Новое в теории и технике приготовления порошковых смесей. ВНИИЭМ. 1964.
6. Чувпило А. В. Расчет, конструирование и исследование оборудования производства источников тока. М.: Энергия, 1968.
7. Сокольчик П. Ю., Сташков С. И., Малимон М. В. Прогноз и управление качеством гетерогенных сыпучих смесей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология, Пермь, 2013. С.64 – 83.

8. Баранцева Е. А., Пономарев Д. А., Мизонов В. Е., Berthiaux H. Нелинейные модели процессов непрерывного смешения сыпучих материалов // Труды XVI Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-16». Т.10. СПб: 2003. С. 116 – 117.
9. Arratia P. E., Duong Nhat-hang, Muzzio F. J., Godbole P., Reynolds S. A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations; Powder Technology, Vol. 164 (2006), pp 50 – 57.
10. Podgornyy Yu. I., Martynova T. G., Skeebe V. Yu., Kosilov A. S., Chernysheva A. A., Skeebe P. Yu. Experimental determination of useful resistance value during pasta dough kneading // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, issue 87 (2017) 082039 - doi: 10.1088/1755-1315/87/8/082039.
11. Evseev A. V., Paramonova M. S. and Preis V. V. A Quantitative Criterion for Quality Mixing Assessment for the Effective Unit of Mixed Products // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1050 (2018) 012025 doi:10.1088/1742-6596/1050/1/012025.
12. Евсеев А. В., Парамонова М. С., Преис В. В., Лобанов А. В. Экспериментальная проверка математической модели детерминированного формирования однородности смеси для алмазного инструмента // Цветные металлы. 2019. №1(913). С. 78 – 87. Doi:10.17580/tsm.2019.01.12
13. Evseev A. V., Preis V. V. and Kasatkin G. V. Algorithm to optimize the accuracy of the metering devices for obtaining loose material mixture of a given quality // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1260 (2019) 032016 doi:10.1088/1742-6596/1260/3/032016.
14. Evseev A. V. Accuracy of discrete metering devices in relation with the criterion of formed mixture quality assessment // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1260 (2019) 032014 doi:10.1088/1742-6596/1260/3/032014.
15. Evseev A. V. Automatic mixers for the synthesis of functional mixtures with desired properties from small batches // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1260 (2019) 032015doi:10.1088/1742-6596/1260/3/032015.

УДК 621.7

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Д. А. Елесин, М. А. Петров

Московский политехнический университет

Стойкость инструмента – это его способность сохранять свое служебное назначение при работе до критического износа. Измеряется эта величина количеством деталей, отштампованных до полного износа рабочих частей. Характеризуется невозможностью восстановления рабочей части инструмента и получением размерного брака штампуемых деталей.

Введение. Значительно раньше размерного вида брака возникает брак по низкому качеству поверхности штампуемых деталей (заусенцы, задиры, риски и царапины). Этот вид брака сравнительно легко устранить путем перешлифовки или зачистки рабочей поверхности инструмента. Исходя из этого следует различать: полную (размерную) стойкость инструмента и промежуточную (качественную) стойкость инструмента.

Полная стойкость инструмента в большинстве случаев находится в прямой зависимости от качественной стойкости, так как количество допустимых доработок поверхности инструмента ограничено выходом полуфабриката из заданных размеров и получением размерного

брака. Стойкость инструмента является условным понятием, так как интенсивность износа формообразующих частей штампа зависит от совокупности параметров конкретной операции.

Справочная информация и приблизительные значения по стойкости формообразующих частей инструмента в литературе присутствуют только для разделительных операций листовой штамповки [1 – 4]. В части расчета стойкости инструмента операций обратного выдавливания, вытяжки и чеканки в справочной литературе информация отсутствует. В литературе присутствуют только рекомендации по выбору марки материала инструмента.

Расчет износа инструмента. Для определения теоретической стойкости прессового инструмента (в частности пуансонов) предлагается построить методику теоретического расчета стойкости на базе оценки размерного износа инструмента в процессе его жизненного цикла.

Для решения поставленной задачи проведен теоретический расчет инструмента на истирание (уменьшение рабочего диаметра инструмента в зависимости от выработки) пуансона (материал пуансонов – сталь Р6М5, твердость – 58...62 единиц по шкале HRC), предназначенный для второго перехода операции выдавливания полуфабриката детали «Стакан».

Пуансоны в количестве 3-х штук полностью аттестованные и не имеющие отклонений от чертежа поступили в работу на прессовый участок. После выработки 5 000 штук деталей они были сняты с прессы и отправлены на аттестацию рабочего диаметра. При первоначальной аттестации диаметр на всех пуансонах составлял D_1 , а после использования пуансонов в работе он составил D_2 (таблица 1). Величина истирания определяется согласно уравнению (1).

$$N_{изм} = D_1 - D_2, \quad (1)$$

где $N_{изм}$ – величина износа (истирания) = 0,02 мм (среднее значение); D_1 – первоначальный диаметр пуансона; D_2 – диаметр пуансона после выработки.

Размер внутреннего диаметра полуфабриката на втором переходе операции выдавливания составил $\phi 27,1^{+0,1}$ мм (рис. 1), а диаметр рабочей поверхности пуансона составил $\phi 27,2_{-0,03}$ мм (рис. 2). Исходя из полного сопоставления размеров, сделаем вывод о том, что допуск на истирание на данном переходе составил 0,1 мм ($N_{дон}$).

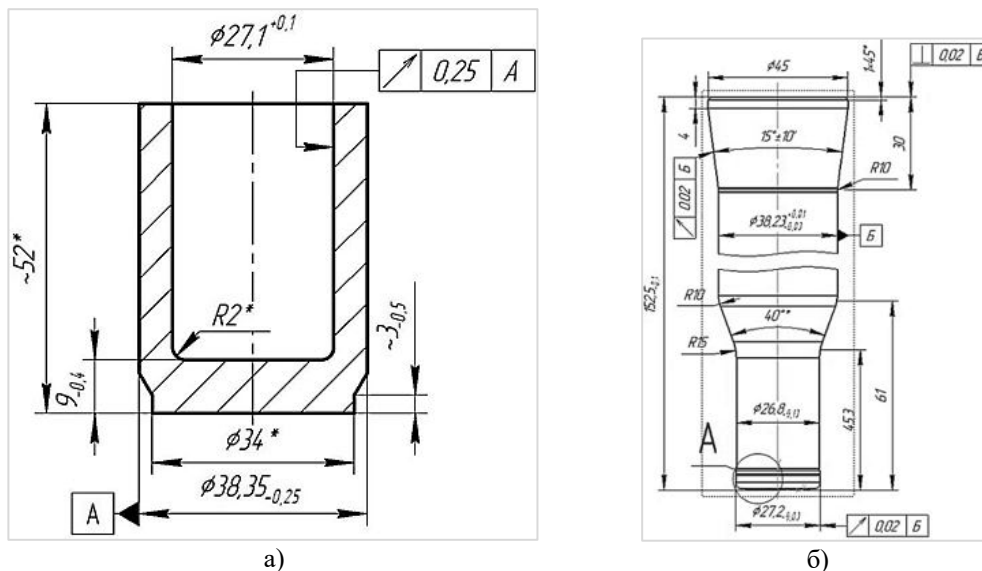


Рис. 1. Чертежи поковки (а) и пуансона для выдавливания (б)

Для учета величины снятия металла при доработке рабочей поверхности инструмента при определении стойкости введем параметр промежуточной стойкости инструмента. Доработка

рабочей части инструмента применяется для устранения появляющихся рисок и царапин на поверхности инструмента, так как доводка (шлифовка или полировка) изменяет его диаметр.

На всех рассматриваемых пуансонах, после выработки деталей (5 000 шт.) имелись дефекты на рабочей части в виде царапин. Для устранения дефекта потребовалась полировка, после которой диаметр рабочей части составил D_3 (таблица 1). Величина доводки определяется согласно уравнению (2).

$$N_{\text{дов}} = D_2 - D_3, \quad (2)$$

где $N_{\text{дов}}$ – величина уменьшения диаметра при доводке инструмента = 0,01 мм (среднее значение), D_3 – диаметр инструмента после доводки.

Таблица 1
Значение основных расчетных параметров

№ пуансона	D_1 , мм	D_2 , мм	D_3 , мм
1	27,194	27,173	27,164
2	27,198	27,179	27,167
3	27,190	27,169	27,178

С учетом доводки поверхности инструмента общее количество деталей можно определить по уравнению (3).

$$N_{\text{общ}} = \frac{N_{\text{доп}}}{N_{\text{из}} + N_{\text{дов}}} K, \quad (3)$$

где $N_{\text{общ}}$ – общее количество штук деталей выработки с единицы инструмента = 16 665 штук; $N_{\text{доп}}$ – размер величины допуска на полуфабрикате; K – количество штук деталей между аттестациями.

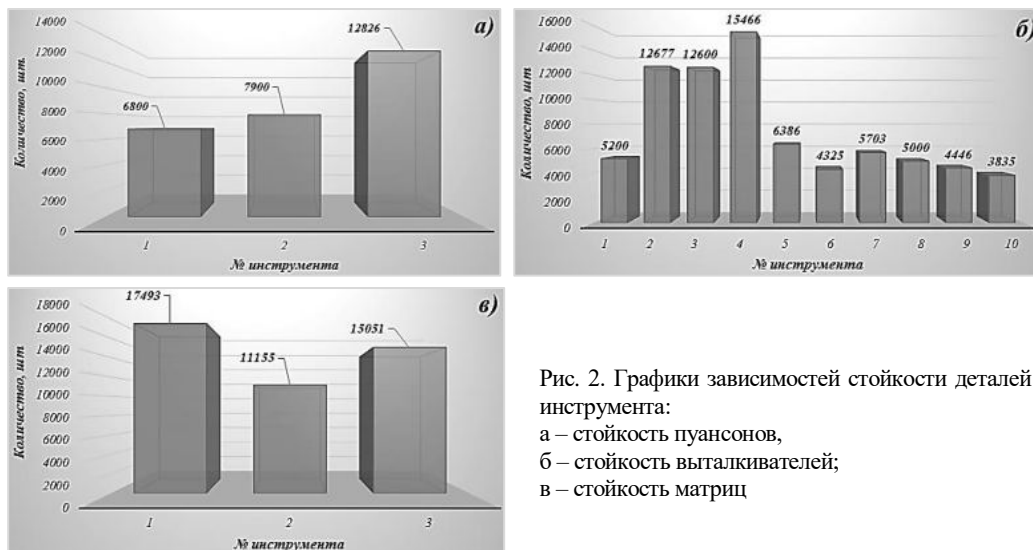


Рис. 2. Графики зависимостей стойкости деталей инструмента:
а – стойкость пуансонов,
б – стойкость выталкивателей,
в – стойкость матриц

Экспериментальные данные по стойкости инструмента. Анализируя дальнейшую стойкость пуансонов, матриц и выталкивателей на втором переходе операции выдавливания полуфабриката «Стакан» были получены следующие показатели, отраженные на рис. 2. Следует отметить, что на каждом из графиков использовался инструмент, изготовленный в одной партии, т.е. с одинаковой термо- и механообработкой, а также условиями эксплуатации. Несмотря на это, наблюдается различная стойкость по выработке количества деталей.

Было определено, что для исследуемых пуансонов среднее значение выработки составляет 9 175 штук, для выталкивателей – 7 564 штук, а для матриц – 14 566 штук.

Способы повышения стойкости инструмента. На производствах для повышения стойкости инструмента применяют три способа: повышение качества механической обработки, замена материала инструмента и применение покрытий. Первый способ подразумевает применение токарных станков с ЧПУ для снижения предварительной шероховатости поверхности (тонкое точение), исключение возможности зарезов инструмента, появления рисок и черноты, обеспечение равномерного контура детали перед последующей шлифовкой и высокой точности обработки. Второй способ оказывается не всегда применим. Для пуансонов и выталкивателей операций обратного выдавливания обычно применяют стали марок У10А, Х12М, Р6М5. Если данные материалы не удовлетворяют необходимым требованиям по стойкости инструмента, то применяется материал с большим пределом прочности, такой как сталь Р12Ф3К10М3 (ЭП-682) или сталь 60Х2Н2М, что повышает стоимость инструмента. Для повышения стойкости матриц применяют твердосплавные марки сплавов ВК-8; ВК-10; ВК-20. Третий способ широко применяется на производстве. Для повышения износостойкости широко распространены методы хромирования, азотирования или борирования, а также булатирования (нитрид титана). За счет большей твердости в 60 – 77 единиц по шкале HRC покрытия применяются как износостойкие и значительно повышают ресурс инструмента.

Выводы. По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод о годности рабочей части шейки пуансона на рассчитанное количество деталей до получения размерного брака.

Разрушение инструмента после сравнительно малого количества деталей является недопустимым. В результате проведенных расчетов и анализа статистических исследований по стойкости инструмента можно сказать, что повышение средней стойкости одной единицы инструмента в производстве до значения, равного не менее расчетного в 15 000 – 17 000 штук деталей, является целесообразным и достижимым показателем.

Библиографический список

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд. Л: Машиностроение, 1979. 520 с.
2. Семенов Е. И. Ковка и штамповка. Т. 3 Холодная объемная штамповка. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2010. 352 с.
3. Шофман Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1964. 368 с.
4. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.

УДК 621.983.31 : 623.452.5-034

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ВЕЛИЧИНУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИЛЫ ПРИ ВЫТЯЖКЕ С УТОНЕНИЕМ

Е. В. Затеруха, М. В. Денисова

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Важным элементом выстрела, от которого зависит надежность и безопасность работы оружия, является гильза. Объектом исследования является гильза к выстрелу клб. 57 мм (рис. 1). Именно этот калибр планируется применять для пушек на БМП и БТР. Кроме того, корабельная артиллерийская установка АК725 оснащена двумя автоматами клб. 57 мм. Эксплуа-

тационные свойства гильзы, необходимые для функционирования боеприпаса, формируются при ее изготовлении [3].

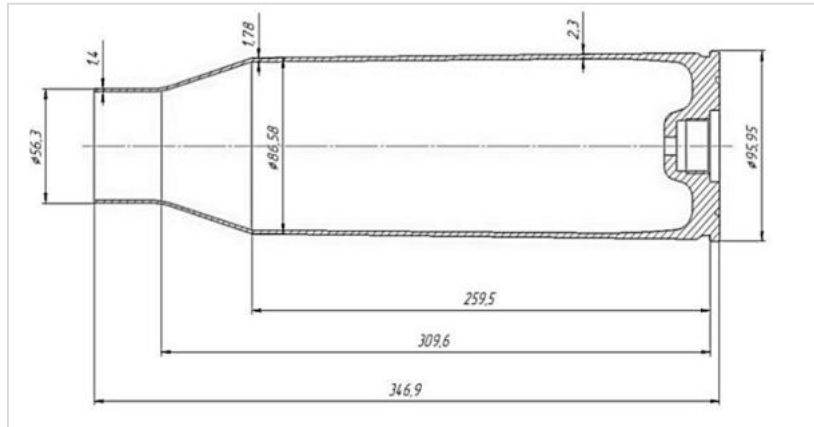


Рис. 1. Эскиз гильзы к снаряду клб. 57 мм

Основным методом, служащим для формообразования гильзы и придания ей необходимых механических свойств, является холодная штамповка.

Технологический маршрут изготовления гильзы включает следующие операции [2]: отрезка (вырубка); подштамповка (калибровка поперечным выдавливанием); свертка (продольное выдавливание); несколько вытяжек с утонением; штамповка дна; обжим; обрезка; сверление запальных отверстий; термохимические операции.

Формоизменяющая операция, применяемая для получения корпуса гильзы – вытяжка с утонением (рис 2).

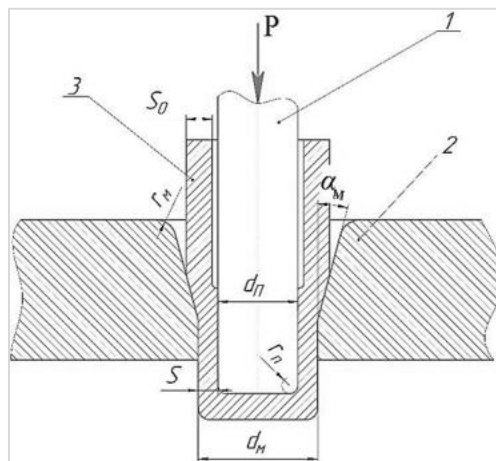


Рис. 2. Технологическая схема процесса вытяжки с утонением стенки:

1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – заготовка; S_0 – толщина исходной заготовки; S – толщина заготовки после вытяжки; $d_п$ – пуансон; $r_п$ – радиус пуансона; $\alpha_м$ – угол конусности матрицы; $r_м$ – радиусы; $d_м$ – диаметр матрицы

Причем их в технологии требуется несколько. Одним из главных технологических параметров при исследовании вытяжки с утонением является сила деформирования, величина кото-

рой влияет на стойкость рабочего инструмента (повышение силы отрицательно сказывается на прочности рабочего инструмента и на стойкости всей оснастки в целом). Поэтому актуальной задачей является разработка рекомендаций, позволяющих снизить технологическую силу.

Рассмотрим зависимость силы деформирования от перемещения инструмента (рис. 3). Из графика видно, что процесс вытяжки можно разделить на 4 стадии [1]: деформирование дна, деформирование придонного участка, деформирования стенки, деформирование краевой части заготовки. Максимальное усилие деформирования достигается на первой стадии процесса (715 кН) – в этот момент дно заготовки проходит через поясok матрицы.

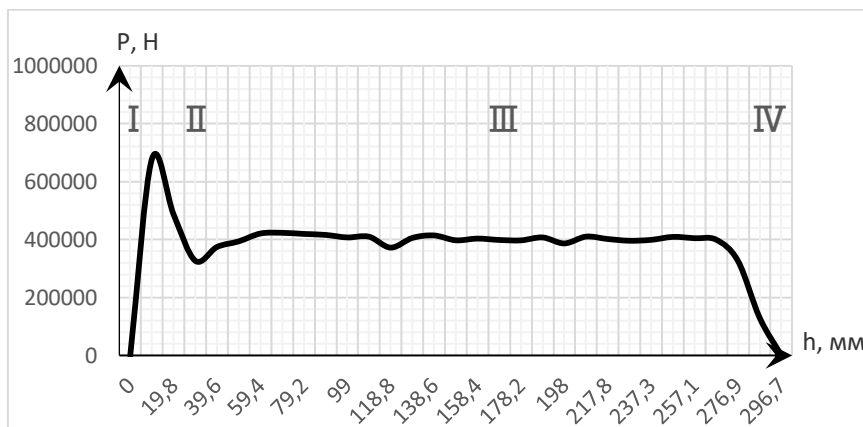


Рис. 3. График зависимости силы деформирования P от перемещения инструмента h

Целью исследования является определение факторов, способствующих снижению максимальной силы деформирования.

Для исследования этих факторов процесс второй вытяжки промоделирован в программе методом конечных элементов. Система конечно-элементного моделирования предназначена для анализа трехмерного течения металла при различных процессах обработки металлов давлением. Суть метода заключается в разбиении области, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, на конечное количество подобластей (элементов) [3].

Программа позволяет получать характеристики распределения НДС, определить технологические усилия, создать анимацию процесса и т. д. Кроме того, с помощью программы возможно моделировать процессы термической обработки (закалка, отжиг и т. д.), процессы механической обработки резанием, отслеживать изменение микроструктурных параметров, оценивать НДС рабочего инструмента. Однако решение нестандартных задач требует специальных данных, характерных для изучения имеющегося материала [5].

В качестве исходной заготовки взят полуфабрикат после первой вытяжки (рис. 4). Гильза клб. 57 мм изготавливается из малоуглеродистой конструкционной стали 11ЮА.

Анализ научно-технической литературы показал, что основными факторами, влияющими на величину силы при вытяжке с утонением, являются: профиль матрицы; угол конусности матрицы; радиусы скругления матрицы и пуансона.

Графики зависимости максимальной силы деформирования P_{max} от различных факторов представлены на рис. 5.

Из графика видно, что с увеличением радиуса пуансона максимальная сила деформирования уменьшается. Это связано с увеличением удельного давления при уменьшении радиуса пуансона. Радиус пуансона $r_{п}$ рекомендуется брать в интервале $(0,5 - 2)S_{д}$ ($S_{д}$ – толщины дна) [7].

Моделирование показало, что минимальная технологическая сила достигается при угле конусности матрицы $8^\circ \div 12^\circ$.

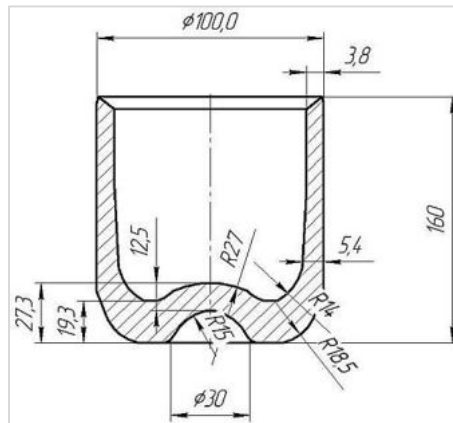


Рис. 4. Эскиз полуфабриката после первой вытяжки

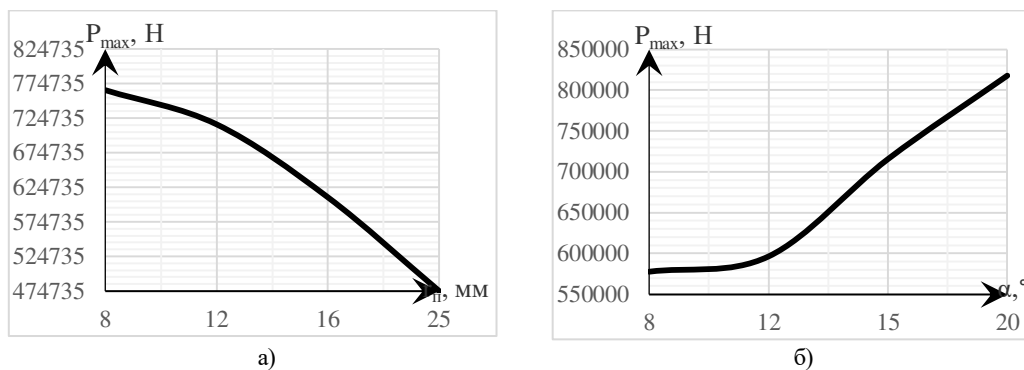


Рис. 5. Зависимость:

- а – максимальной силы деформирования P от радиуса пуансона r_g ;
- б – максимальной силы деформирования P от угла конусности матрицы α

Профиль матрицы оказывает существенное влияние на силу деформирования. Радиальная матрица, как считается, требует большего, по сравнению с конической матрицей усилия вытяжки. В действительности радиальная матрица может вызвать и большее и меньшее усилие вытяжки, чем коническая в зависимости от угла конусности последней [4].

Про моделирован процесс вытяжки через радиальную матрицу с радиусом вытяжной кромки 25 мм. Максимальная технологическая сила при данном способе вытяжки (760423 Н) увеличилась на 30% по сравнению с вытяжкой через коническую матрицу с углом конусности 8° (рис 6). В момент достижения максимальной технологической силы площадь контакта заготовки с матрицей больше у конической матрицы (1310 мм^2), чем у радиальной (753 мм^2). Однако интенсивность деформации больше при вытяжке в радиальной матрице (рис 7). При вытяжке через радиальную матрицу течение металла затруднено (рис 8).

Исследован процесс последовательной вытяжки через две матрицы латунной заготовки. В качестве материала для вытяжки через две матрицы наиболее целесообразно применять латунь, поскольку латунь является более пластичным материалом.

Процесс вытяжки через две матрицы можно разделить на три этапа (рис.9): вытяжка через верхнюю матрицу, разгрузка и вытяжка через нижнюю матрицу.

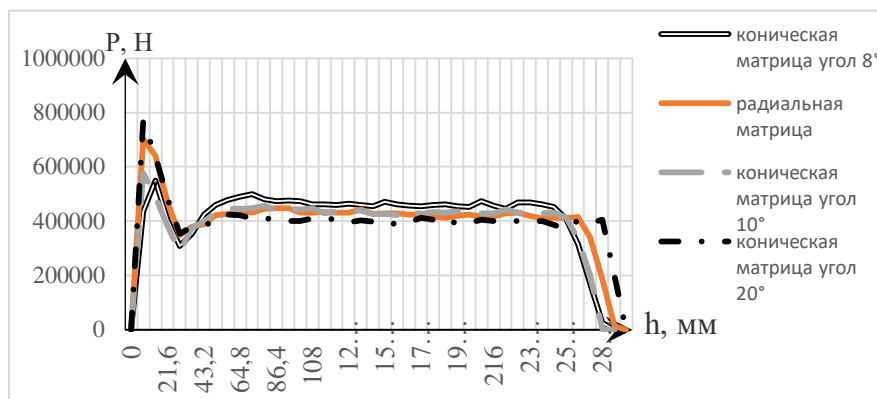


Рис. 6. Зависимости силы деформирования P от перемещения инструмента h для матриц с различным профилем

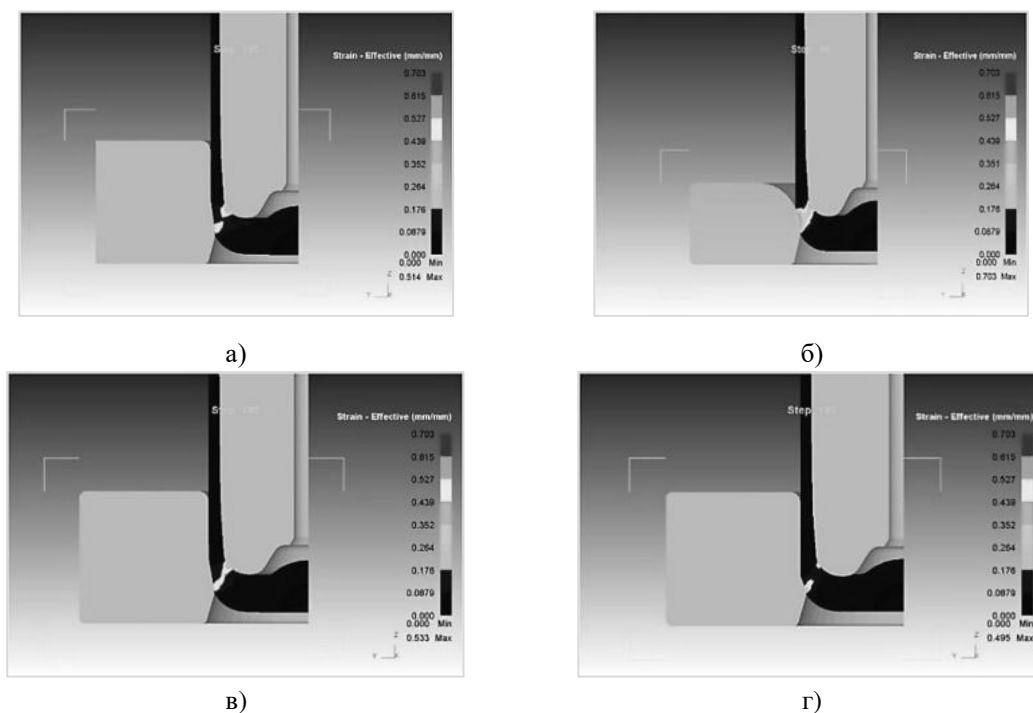


Рис. 7. Распределение интенсивности деформации при вытяжке через радиальную и коническую матрицы:
 а – коническая матрица с углом конусности 8° ;
 б – радиальная матрица с радиусом вытяжной кромки 25 мм;
 в – коническая матрица с углом конусности 10° ;
 г – коническая матрица с углом конусности 20°

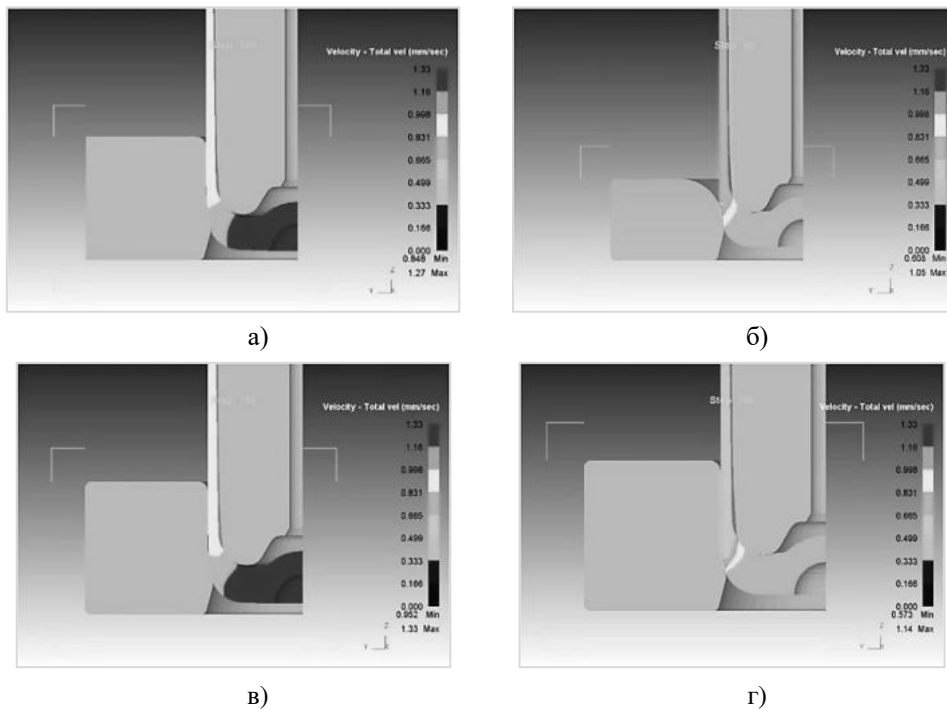


Рис. 8. Скорость течения металла при вытяжке через радиальную и коническую матрицы:
 а – коническая матрица с углом конусности 8° ;
 б – радиальная матрица с радиусом вытяжной кромки 25 мм;
 в – коническая матрица с углом конусности 10° ;
 г – коническая матрица с углом конусности 20°

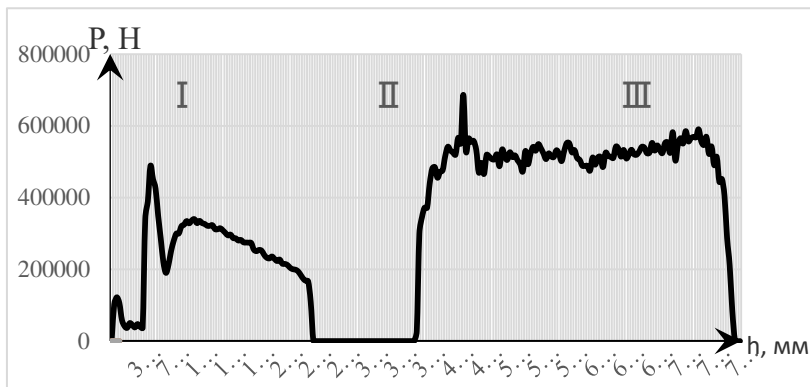


Рис. 9. График зависимости силы деформирования P от перемещения инструмента h для вытяжки через две матрицы

При последовательной вытяжке через две матрицы максимальное технологическое усилие достигается при вытяжке через нижнюю матрицу (686473 Н). Увеличение максимальной силы деформирования (на 37 %) связано тем, что деформирование в нижней матрице происходит предварительно упрочненной в верхней матрице заготовки. Однако вытяжка через две матрицы позволила получить деталь с коэффициентом утонения 0,34 и сократить количество вытяжных операций.

Таким образом, для уменьшения максимальной технологической силы при вытяжке с утонением можно порекомендовать: выбирать угол конусности матрицы около $8^{\circ} \div 10^{\circ}$; увеличить радиус пуансона до $2S_d$.

Библиографический список

1. Агеев Н. П., Данилин Г. А., Огородников В. П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталей машино- и приборостроения. Ч. 1. Механические основы процесса. Тверь: из-во ГЕРС, 1997. 336 с.
2. Агеев Н. П., Данилин Г. А., Масляев Н. М. и др. Справочник по технологии патронного производства: в 2 т. Т.1. СПб, 2011. 643 с.
3. Белевич А. В. Основы метода конечных элементов: Введение. Расчет стержневых систем: конспект лекций / сост. Л. Е. Кондратьева. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. 36 с.
4. Свердлов М. И. Изучение процессов свертки и вытяжки применительно к гильзовому производству. 1939. 60 с.
5. Паршин В. С., Карамышев А. П., Некрасов И. И., Пугин А. И., Федулов А. А. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 266 с.
6. Зубцов М. Е. Листовая штамповка: учебник для студентов, обучающихся по специальности «Машины и технология обработки металлов давлением». 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1980. 432 с.
7. Матвеев А. Д. Ковка и штамповка: справочник в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / под ред. А. Д. Матвеева. М. Машиностроение, 1985 – 1987. 554 с.

УДК 623.425.5-034

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ПОДШТАМПОВКИ ГИЛЬЗ

Е. В. Затеруха, В. А. Лобов, Е. Ю. Ремшев

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

За долгую историю существования калибр 57 мм то становился актуальным, то был забыт на долгие годы. Изначально он использовался для пушки ЗИС-2 (рис.1), но потом как к пушке, так и к калибру утратили интерес из-за несоответствия современным требованиям. Автоматическая пушка клб. 57 мм является модернизацией советской зенитной установки С-60, применяемой в ЗСУ 57-2. Снаряды этой пушки показывали высокие баллистические характеристики и пробивную способность, но в связи с несовершенством прицельных приспособлений и развитием управляемого ракетного вооружения пушка была снята с производства.

Благодаря недавно разработанному боевому модулю АУ-220М интерес к калибру вновь возвращается (рис.2). Поэтому актуальным является разработка технологии изготовления основных элементов выстрела клб. 57 мм.

Основные тактико-технические характеристики орудий представлены в таблице 1 [1].

Таблица 1
Основные тактико-технические характеристики

Тактико-технические характеристики орудий	Пушка ЗИС-2 обр. 1943 г.	Боевой модуль с 57 мм автоматической пушкой АУ-220М
Калибр, мм	57	57
Начальная скорость снаряда, м/с:	700-1250	1000
Наибольший угол возвышения, град:	25	75
Угол склонения, град:	-5	-5
Угол горизонтального обстрела, град:	54	360
Вес в боевом положении, кг:	1250	нет данных
Скорострельность, выстр./мин:	до 25	80
Наибольшая дальность стрельбы, м:	8400	12000
Дальность прямого выстрела, м:	1120	нет данных



Рис. 1. Противотанковая пушка ЗИС-2 обр. 1943 г.



Рис. 2. Боевой модуль с 57 мм автоматической пушкой АУ-220М

Объект исследования в работе – гильза клб. 57 мм (рис.3), являющаяся основным элементом выстрела, от которого зависит надежность, безотказность действия орудия. Гильза пред-

назначена для размещения порохового заряда, средства воспламенения и соединения в единое целое элементов выстрела: снаряд, пороховой заряд и капсюльная втулка.

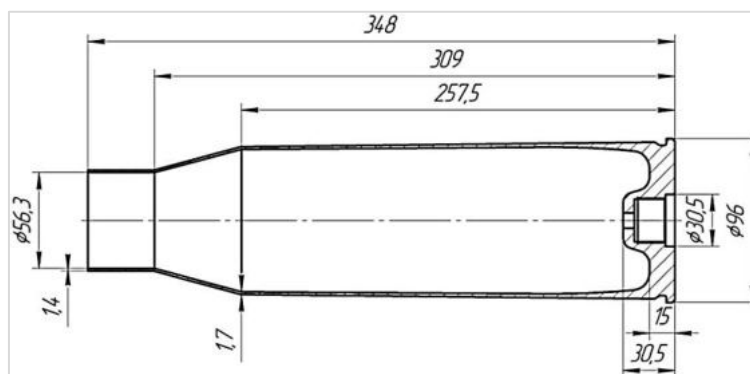


Рис. 3. Эскиз гильзы клб. 57 мм

В советское время для изготовления гильзы клб. 57 мм использовали кремнистую латунь ЛК75-05. Однако сильно деформированная гильзовая латунь обладает свойством – склонностью к самопроизвольному растрескиванию при длительном хранении. Также к недостаткам латуни относится ее дороговизна, поэтому с целью удешевления производства предлагается взамен латуни использовать гильзовую сталь 11ЮА.

Предлагаемый авторами технологический процесс изготовления гильзы (рис.4) включает такие методы обработки, как механическая (обрезка), обработка металлов давлением (вырубка, подштамповка, свертка, коническая осадка дна, вытяжки, штамповка дна и фланца, обжим), термическая (отжиг, закалка и отпуск), и химическая (травление, фосфатирование, омыление, обезжиривание, пассивирование).

В работе особое внимание уделено начальному этапу технологического процесса, а именно операции подштамповки, применяемой для уменьшения напряжений и технологических сил на последующей свертке и для предварительного формообразования донной части гильзы. На этой операции самая высокая технологическая сила, что может негативно повлиять на стойкость рабочего инструмента и требует использования более мощного оборудования [2, 3].

Исследование подштамповки выполнено с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов. Приняты допущения: коэффициент трения $f_{тр}=0,12$; скорость движения пуансона $V_{п}=10$ мм/с.

В результате моделирования получена диаграмма «Сила – путь инструмента», максимальная технологическая сила на которой равна 1000 т. На диаграмме выделены три этапа, на каждом из которых показано формоизменение заготовки (рис. 5).

В ходе исследования выполнен анализ влияния технологических факторов на силу деформирования (таблица 2): коэффициента трения; скорости движения пуансона; геометрии матрицы (угол матрицы изменяли от 21 до 38° и радиус скругления от 10 до 38 мм). Коэффициент трения варьировался, исходя из использования различных смазочных материалов: ВЕСНЕМ, графитовая УСса, смазка на основе мелкодисперсного графита. Значения скоростей пуансона взяты из паспорта прессы модели ESLS-1000D, с максимальным усилием прессы 1000 т ($V_{п}=10 - 20$ мм/с). С увеличением скорости пуансона технологическая сила снижается, с увеличением угла матрицы и повышением коэффициента трения сила увеличивается. Видно, что заметнее всего на технологическую силу повлияло снижение коэффициента трения (при $f_{тр}=0,08$ сила 913 т).

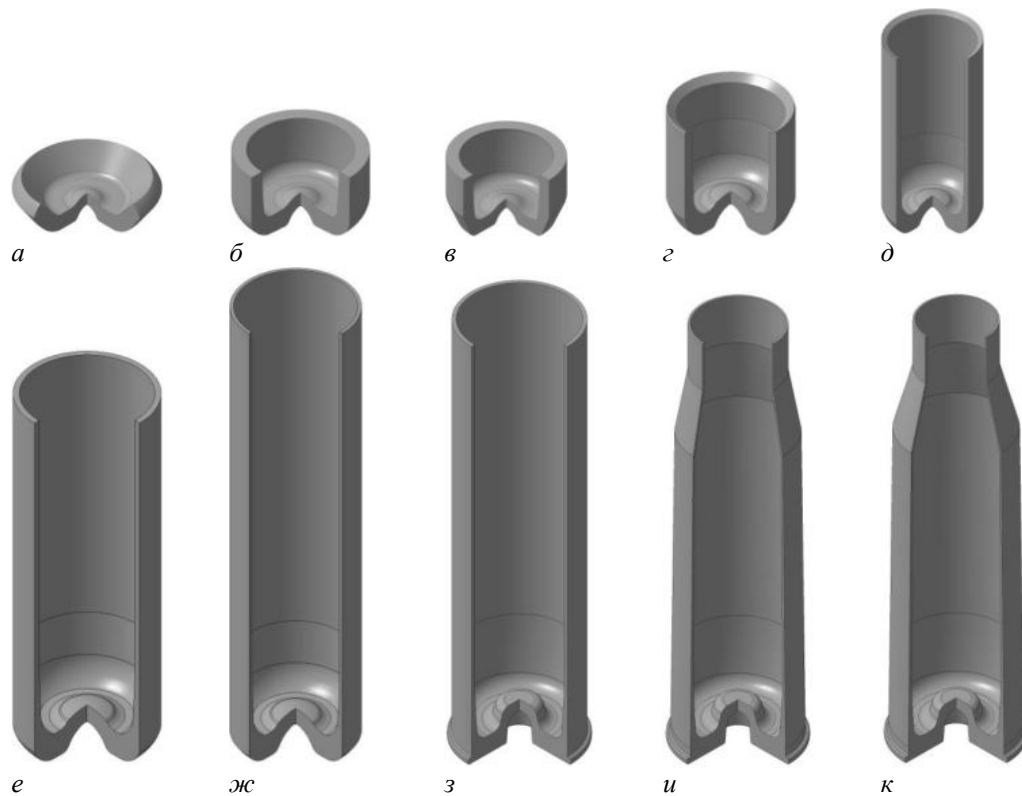


Рис. 4. Полуфабрикаты гильзы клб. 57 мм после подштамповки (а), свертки (б), конической осадки (в), первой, второй, третьей и четвертой вытяжки (г, д, е, ж), штамповки дна (з), первого и второго обжима (и, к)

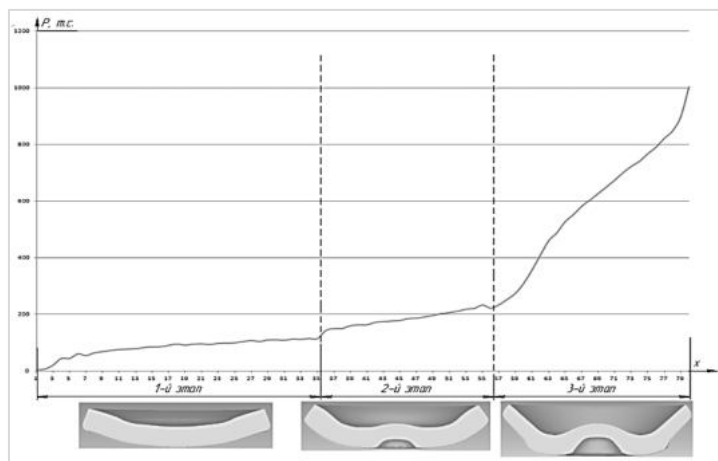


Рис. 5. Диаграмма «Сила-путь инструмента»

Таблица 2
Результаты исследования влияния технологических факторов на технологическую силу

Факторы	№ моделирования								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коэффициент трения ($f_{тр}$) Смазка:	0,15 KR-944-1	0,1 ВЕС-НЕМ	0,08 Графит	0,12 УСса	0,12 УСса	0,12 УСса	0,12 УСса	0,12 УСса	0,12 УСса
Скорость рабочего инструмента ($V_{п}$, мм/с) Пресс модели ESLS-1000D	10 мм/с	10 мм/с	10 мм/с	12 мм/с	15 мм/с	20 мм/с	10 мм/с	10 мм/с	10 мм/с
Геометрия рабочего инструмента (угол матрицы, β° , радиус, R)	38°, R 10	38°, R 10	38°, R 10	38°, R 10	38°, R 10	38°, R 10	30°, R 18	25°, R 25	21°, R 38
Результат технологических сил (P, т.)	987	942	913	982	971	960	980	968	945

Процесс подштамповки экспериментально исследован в лабораторных условиях кафедры Е4 БГТУ «ВОЕНМЕХ» на прессе модели ПО-54, номинальное усилие которого составляет 2000 т. После экспериментального исследования сопоставлены измеренные размеры готовой детали с размерами детали после компьютерного моделирования. Эти размеры совпадают, указывая на то, что геометрия заготовки и рабочего инструмента при моделировании построена верно.

Библиографический список

1. Новости проекта АУ-220М «Байкал» // Интернет-журнал «Армейский вестник». (<http://army-news.ru/2016/06/novosti-proekta-au-220m-bajkal/>).
2. Справочник по технологии патронного производства: в 2 т. / Под ред. Н. П. Агеева; СПб: БГТУ «Военмех», 2011.
3. Агеев Н. П., Данилин Г. А., Огородников В. П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч. 1. Технологические основы проектирования патронов. СПб: БГТУ «Военмех», 2005. 352 с.

УДК 621.983.044

КАЛИБРОВКА КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКОЙ

И. В. Зверев, Н. Е. Проскуряков

Тулский государственный университет

Сокращение сроков освоения новых изделий, снижение себестоимости их изготовления и металлоемкости применяемой оснастки, повышение конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения оказывают мощное стимулирующее воздействие на разработку научно-обоснованных методов расчета новых техники и технологий, компьютерных проектных методик. В настоящее время все это усугубляется недостатком инвестиций, высокой сто-

имостью кредитов, жесткими требованиями и нестабильностью товарного рынка, в связи с чем особенно актуальной становится задача комплексного проектирования ресурсосберегающих технологий и оборудования, обеспечивающих минимальную трудоемкость изделий при наилучшем их качестве.

Магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) получила практическое применение на ряде машиностроительных предприятий. Комплексный подход к решению задач применения технологии МИОМ позволил создать на базе Публичного акционерного общества «Тульский оружейный завод» (ПАО «ТОЗ») новый производственный участок магнитно-импульсной обработки специальных корпусных изделий, который обеспечивает высокие технико-экономические показатели производства.

Для решения задач на основе технологии и оборудования МИОМ по заказу ПАО «ТОЗ» в Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева (Научный руководитель – канд. техн. наук, профессор Глуценков В.А. [1]) была спроектирована, и изготовлена четырехпостовая магнитно-импульсная установка МИУ 30/4 (рис.1).

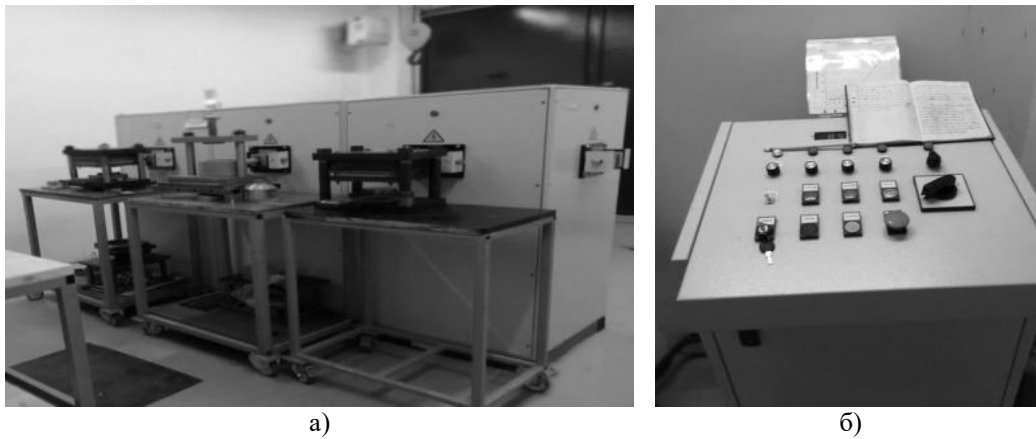


Рис.1. Установка МИУ 30/4 (а) и ее пульт управления (б)

Одной из задач, решаемых ПАО «ТОЗ» с помощью МИОМ является выполнение операций калибровки специальных деталей типа «корпус» (рис. 2) для получения чертежных размеров:

- радиус R3;
- длина обжимаемой части – 30 мм;
- длина выхода на номинальный диаметр не более 20 мм.

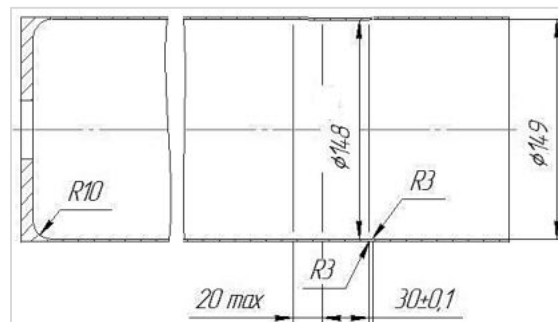


Рис. 2. Деталь «Корпус»

Выполнение данной операции методом раскатки роликом на токарном или раскатном станках оказалась неэффективной из-за большого процента брака.

Поэтому для решения данной задачи на ПАО «ТОЗ» была разработана технология, основанная на применении операции магнитно-импульсной калибровки по схеме «обжим».

Разработанный вариант оснастки для выполнения данной операции показан на рис. 3. Перед началом работы оператор выкручивает винт 7 до исходного положения влево, вставляет кольцо 8 в отверстие оправки 3. Далее он устанавливает заготовку через индуктор в оправку 3. Затем происходит включение магнитно-импульсной установки и разряд. Потом оператор вращает ручку выталкивателя 10, втулка 9, перемещаясь на винте 7, выводит кольцо 8 из цилиндрической оправки, которая остается в детали.

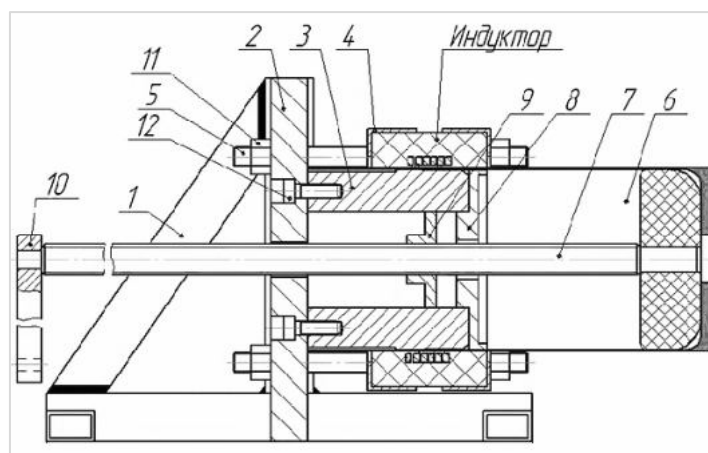


Рис. 3. Оснастка для обжима:

1 – Рама; 2 – Плита; 3 – Оправка; 4 – Крепление индуктора; 5 – Шпильки; 6 – Заготовка;
7 – Винт выталкивателя; 8 – Кольцо; 9 – Втулка; 10 – Ручка; 11 – Гайка; 12 – Винт

Оператор аккуратно вытаскивает деталь, и производит ее контрольный замер. При необходимости операцию можно повторить с уменьшенным значением энергии зарядки, так как основная операция формоизменения уже проведена. В этом случае имеется возможность откорректировать геометрические размеры детали.

Данное приспособление, изображенное на рис. 3, является новым, и не имеет технических аналогов.

По разработанным нами методике и программе для ЭВМ, изложенных в [2, 3], были проведены расчеты, которые позволили провести оптимизацию параметров системы «Магнитно-импульсная установка-индуктор-заготовка».

По результатам расчетов, и данных, представленных на рис. 4, были выбраны следующие параметры системы:

- число витков индуктора – 7,
- материала индуктора – медная полоса 8×4 мм, изолированная лавсановой лентой,
- внутренний диаметр индуктора – 155 мм,
- энергия разряда МИУ – 7 кДж.

Последующие испытания подтвердили расчетные данные. На рис. 5 приведена осциллограмма рабочего разряда. Рабочая частота отличается от расчетной на 8%. Погрешности получаемых деталей по основным геометрическим параметрам укладываются в размеры допусков. Данная технология используется в ПАО «ТОЗ» уже более года.

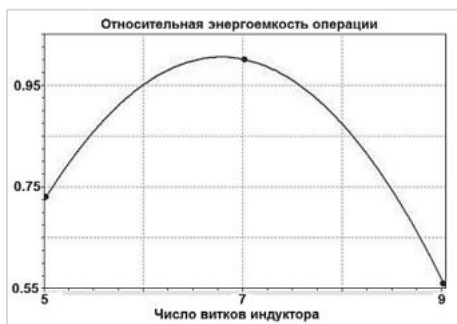


Рис. 4. Оптимизация числа витков индуктора

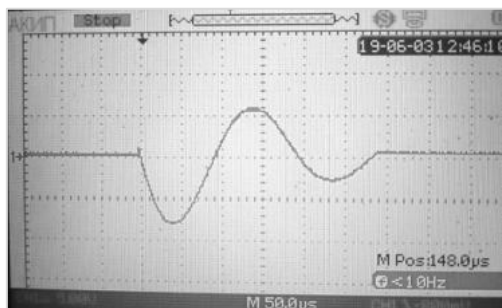


Рис. 5. Типовая осциллограмма рабочего разряда

Библиографический список

1. Глущенков В. А., Карпухин В. Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материала: монография. Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. 208 с.
2. RU 2018661638 – Свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ «Программный комплекс расчета операций формообразования деталей электромагнитной штамповкой». Проскуряков Н.Е. и др. – Опубликовано 12.09.2018, Бюл. № 9.
3. Проскуряков Н. Е., Лай Д. 3. Оптимизация параметров системы «Оборудование-инструмент-заготовка» в операциях электромагнитной штамповки трубчатых заготовок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 6-2. С. 79 – 83.

УДК 539.38

УПРОЧНЕНИЕ ПОСЛЕ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

С. И. Каратушин, Д. А. Храмова

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

В основу технологического процесса изготовления многих деталей специального назначения, положена холодная обработка давлением, сопровождающаяся различными видами пластических деформаций. В предлагаемой работе рассматривается 3 вида пластических деформаций: растяжение, кручение, изгиб и промежуточного низкотемпературного отжига (300° – возврат). Исследовано влияние промежуточной термообработки на упрочнение стали 40, эвтектидной стали и титанового сплава ВТ-23. Это материалы различных структурных классов и позволяют изучать большой диапазон деформаций.

В результате исследования установлено, что промежуточная термообработка устраняет эффект Баушингера после первого цикла. Упрочняемость стали и титанового сплава в основном зависит от накопленной степени деформации и практически не зависит от реверсивности. Низкотемпературный отжиг между циклами нагружения способствует значительному эффекту упрочнения, в особенности при сдвиговой деформации. Предел текучести становится равным пределу прочности. Данный эффект можно использовать для упрочнения деталей механизмов специального назначения, например танковых торсионов.

Введение. Технологический цикл изготовления деталей, сопровождающийся различными видами упругопластической деформации, приводит к образованию остаточных напряже-

ний. Данный эффект давно привлекает внимание и продолжает изучаться по сей день [1-4]. Однако в большинстве источников рассматривается негативное влияние остаточных напряжений на прочность изделий и рассматриваются методы устранения или уменьшения влияния остаточных напряжений. Тем не менее ряд исследований направлены на эффект упрочнения материала в результате неоднородных пластических деформаций [5-13].

В данном исследовании было рассмотрено влияние промежуточного низкотемпературного отжига на прочность пластичных материалов при циклической деформации.

Испытания на растяжение- сжатие и изгиб- выпрямление производились на машине SHIMADZU AG - X-1. Для испытаний на ступенчатое и реверсивное кручение использовалась машина TNS- DW1. Все испытания производились в статическом режиме с записью диаграмм. Для сжатия стандартных разрывных образцов и чистого изгиба разработаны приспособления.

Растяжение-сжатие. Испытания на циклическое растяжение- сжатие производились по следующей схеме: деформация растяжение- сжатия в пределах 2,5 мм ($\epsilon=7\%$), что гарантирует области равномерной деформации. Испытания для всех материалов велись по двум схемам: часть образцов деформировалась циклических растяжением-сжатием без термической обработки, часть образцов подвергала низкотемпературному отжигу при температуре 300° в течении часа, после каждого вида деформирования (растяжение, сжатие).

В результате исследования было установлено, что низкотемпературный отжиг не приводит к упрочнению материала, но и не препятствует его разупрочнению. На рисунке 1 показана зависимость усилия от удлинения для эвтектоидной стали, для образцов с термообработкой и без нее.

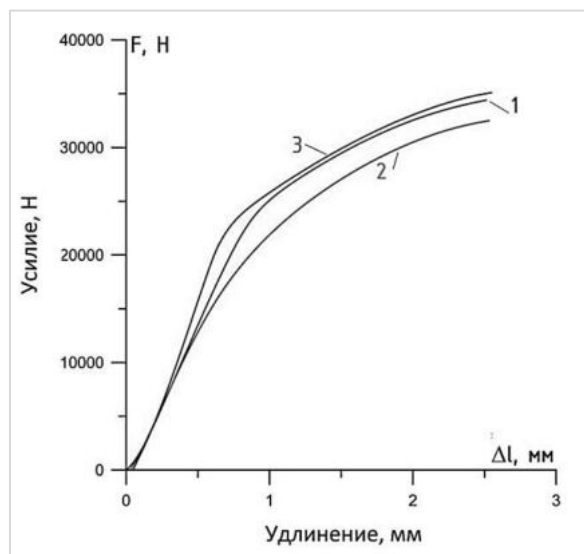


Рис 1. Первичная диаграмма растяжения. Эвтектоидная сталь:

- 1 – диаграмма первогорастяжения образца; 2 – диаграмма повторного растяжения образца после сжатия;
- 3 – диаграмма повторного растяжения образца после сжатия и термообработки

Изгиб. Испытания на изгиб проводились на той же машине, что и растяжение сжатия. Образцы из стали 40 и эвтектоидной стали циклически изгибались по схеме 3-х точечного и чистого изгиба. Также как и при испытаниях на растяжение-сжатие испытания проводились по двум схемам: часть образцов циклично деформировалась по схеме: изгиб на 16 мм-выпрямление, часть с промежуточной термообработкой при 300 градусах в течение часа после каждой деформации. В результате исследований были сделаны выводы, что циклическая

деформация при обоих видах изгиба вызывает упрочнение только при чередовании с термической обработкой - низкотемпературным отжигом-старением. В отсутствие термообработки процесс упрочнения не происходит. Особенно четко данный эффект проявляется при чистом изгибе. На рисунке 2, представлена диаграмма изгиба образца из эвтектоидной стали. На диаграмме видно, что при повторном изгибе после выпрямления и последующей термообработки происходит процесс упрочнения.

Кручение. Испытания на кручение производились на машине TNS- DW1 в ступенчатом реверсивном и нереверсивном режимах деформацией с т/о между ступенями и без таковой. Результаты исследования для титанового сплава и эвтектоидной стали представлены на рис. 3.

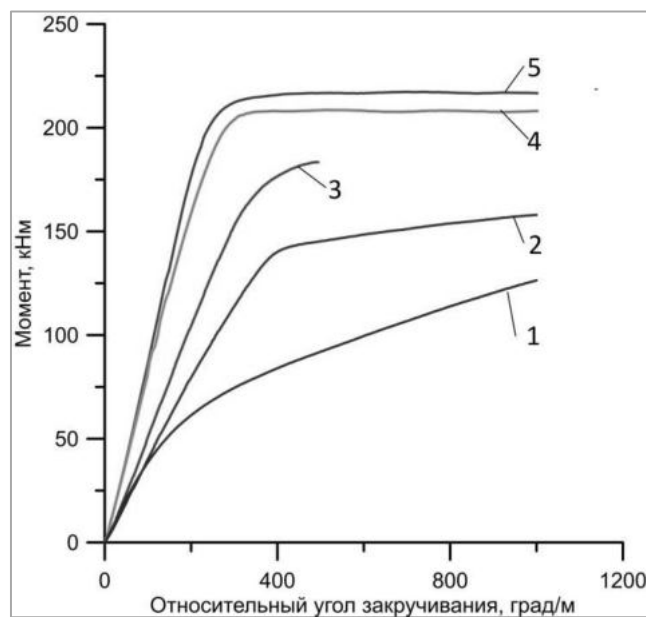


Рис. 2. Первичная диаграмма чистого изгиба. Эвтектоидная сталь:

1 – диаграмма первого изгиба образца, 2 – диаграмма повторного изгиба образца после выпрямления первого образца, 3- диаграмма повторного изгиба образца после выпрямления и термообработки второго образца

Рисунок 3. Первичная диаграмма кручения. Материал титановый сплав: 1- диаграмма первого кручения образца, 2- диаграмма повторного кручения первого образца без термообработки (кручение 90 по часовой стрелки→90 против часовой стрелки), 3 - диаграмма повторного кручения второго образца с термообработкой (кручение 90 по часовой стрелки→термообработка→90 против часовой стрелки). Материал эвтектоидная сталь: 4- диаграмма повторного кручения первого образца без термообработки (кручение 180 по часовой стрелки→180 против часовой стрелки), 5- диаграмма повторного кручения второго образца после термообработки (кручение 180 по часовой стрелки→термообработка→180 против часовой стрелки).

В результате исследований было выявлено, что отпуск между ступенями мало влияет на суммарную степень деформации до разрушения, однако оказывает существенное влияние на упрочнение материала образца при сдвиговой деформации эффект упрочнения наблюдается особенно явно, после каждого этапа деформации. Также следует отметить, что эффект упрочнения в результате пластической деформации более выражен на титановом сплаве. Данный

эффект может быть использован для упрочнения деталей для механизмов специального назначения без изменения размеров сечения, например торсионов танков.

Вывод. Применение отпуска между циклами реверсивного нагружения существенно изменяет картину процесса при всех видах пластического деформирования. При деформировании всех исследуемых материалов при растяжении-сжатии промежуточная термообработка уменьшает эффект разупрочнения. При деформировании кручением и изгибом происходит интенсивное упрочнение, при этом при сдвиговой деформации данный эффект более выражен. Условный предел текучести становится равным пределу прочности. Каждый последующий шаг нагружения дает прирост прочности. Суммарная деформация возрастает. Данный эффект рекомендуется использовать для упрочнения деталей для механизмов специального назначения (например, торсионы танков, витых пружин диаметром более 6 мм), без изменения размеров сечения.

Библиографический список

1. *Khoddam, Shahin and D Hodgson, Peter and Habibi Parsa, Mohammad.* High pressure torsion process of a cylindrical segment sample. Conference: Conference: 5th International Biennial Conference on Ultrafine Grained and Nanostructured Materials, UFGNSM15, At Tehran University, Society of Iranian Metallurgical engineers. Procedia Materials Science, 2015.
2. *Lin S. et al.* Effect of cyclic plastic deformation on microstructure and mechanical properties of weld metals used for reel-lay pipeline steels // *Materials Science and Engineering: A.* 2018. Т. 737. pp. 77 – 84
3. *Krolo P., Grandić D., Smolčić Ž.* Experimental and numerical study of mild steel behaviour under cyclic loading with variable strain ranges // *Advances in Materials Science and Engineering.* 2016. Т. 2016.
4. *Bennati S., Fisticaro P., Valvo P. S.* An elastic-interface model for the mixed-mode bending test under cyclic loads // *Procedia Structural Integrity.* 2016. Т. 2. pp. 72 – 79.
5. *Крюков А. А.* Моделирование и экспериментальное исследование упрочнения цилиндрических изделий методом совместного упругопластического деформирования растяжением и кручением // *Известия Самарского научного центра РАН.* 2011, №13 (4-4). С. 970 – 974.
6. *Крюков А. А.* Технология упрочнения длинномерных цилиндрических изделий совместным растяжением и реверсивным кручением // *Металлообработка,* 2015, № 3(87). с. 11 – 17.
7. *Малыгин Г. А.* Механизм деформационного упрочнения и образования дислокационных структур в металлах при больших деформациях // *Физика твердого тела.* 2006. Т. 48. № 4 С. 651 – 657.
8. *Грачев С. В.* Термическая обработка и сопротивление сплавов повторному нагружению. Москва, Металлургия, 1976. 152 с.
9. *Каратушин С. И., Храмова Д. А., Пехов В. А.* Эффект Баушингера при различных видах пластической деформации // *Известия ВУЗов. Машиностроение.* 2017. №12. С. 45 – 50.
10. *Podgaiskii M. S., Maksimov A. B., Nalivaichenko T. M.* Strengthening of 10G2S1 steel in relation to the temperature of cyclic bending deformation // *Metal Science and Heat Treatment.* 1986. Т. 28. №6. pp. 455 – 458.
11. *Ikeya H., Fukutomi H.* Cyclic Bending Deformation and Fracture of Al and Al-1.0 mass% Mg Alloy // *Procedia Materials Science.* 2016. Т. 12. pp. 42 – 47.
12. *Pereira J. C. R. et al.* ULCF assessment of X52 piping steel by means of cyclic bending tests // *Journal of Constructional Steel Research.* 2017. Т. 138. pp. 663 – 674.
13. *Каратушин С. И., Храмова Д. А., Плешанова Ю. А.* Моделирование процесса упрочнения заготовки кручением // *Известия ВУЗов. Машиностроение.* 2019. №2. С. 34 – 39.

УДК 621.983

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВЫДАВЛИВАНИЕМ РАДИАЛЬНЫМ ОБЖАТИЕМ МАТРИЦ ДЛЯ ШТАМПОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ ПАТРОНА

А. В. Кулешова, Н. И. Нестеров

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Патронное производство – это массовое производство. Качество и себестоимость выпускаемой продукции в массовом производстве – это важный фактор, который определяет ее конкурентную способность на мировом рынке. Во многом себестоимость боеприпаса, изготавливаемого обработкой давлением, определяется затратами на изготовление его отдельных элементов, сборку и обеспечения требований как для изделия ответственного назначения.

Важным фактором в развитие патронного производства является использование наукоемких технологий. Разработка и внедрение таких технологий – это трудоемкий процесс из-за сложности расчетов и проведения эксперимента. Альтернативой теоретическому и экспериментальному методу является компьютерное моделирование. Метод моделирования позволяет исключить сложные расчеты, сократить количество экспериментальных исследований, а также сократить затраты по времени от начала проектирования до внедрения готового решения.

Матрицы являются наиболее сложными и трудоемкими деталями штампового инструмента, предназначенного для изготовления пульных оболочек в патронном производстве. В номенклатуре изделий инструментальных цехов они занимают значительный удельный вес. Полости матриц отличаются разнообразием и имеют сложную конфигурацию рабочего профиля. В приведены разновидности штамповочных матриц, используемых при изготовлении металлических элементов боеприпасов на предприятиях отрасли. Основой группирования служила конфигурация полости, определяемая количеством уступов профиля и плавностью перехода от одного участка к другому.

На кафедре Е4 БГТУ «ВОЕНМЕХ» усовершенствована технология изготовления матрицы обжима пульной оболочки клб. 5,45. Предложено изготавливать матрицу обжима пульной оболочки радиальным обжатием (рис. 1а) из стали У10А (ГОСТ 1435-99). Исследовано изменение и напряженно-деформированное состояние (НДС) полуфабрикатов матрицы обжима (рис. 1б) с использованием методов делительной сетки и твердости [1].

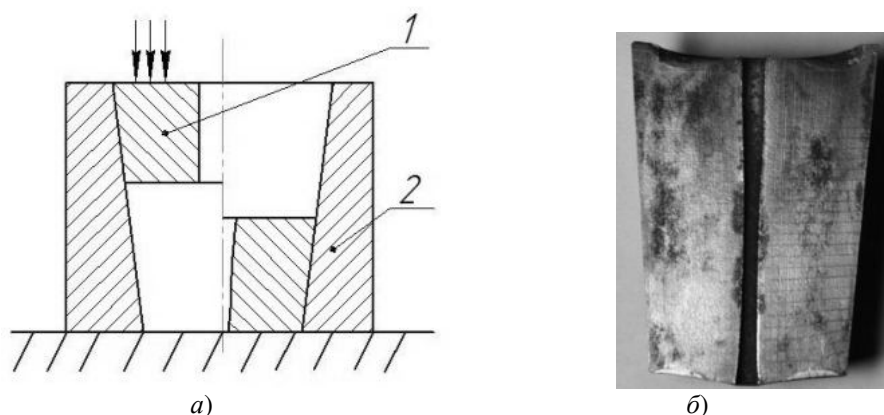


Рис. 1. Схема процесса радиального обжатия (а): 1 – заготовка; 2 – матрица; (б) полуфабрикат после радиального обжатия

Технологический процесс изготовления матрицы обжима состоит из следующих этапов: изготовление заготовки, подготовка заготовки к выдавливанию, выдавливание, доделочные операции, термообработка.

В технологическом процессе всего двенадцать операций. Количество штамповочных операций – одна. Количество термических операций – три. Количество химических операций – две. Количество операций обработки резанием – пять.

Отжиг заготовки до деформирования осуществляется в режиме: температура нагрева $680 - 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 6 часов, охлаждение с печью до $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, затем на воздухе. Твердость заготовки $\text{HV}=167-175 \text{ МПа}$.

Для более детального исследования НДС, для построения математических моделей, для определения усилия деформирования смоделирован процесс радиального выдавливания конических заготовок со сквозным отверстием в программе Deform-3D.

Пакет Deform-3D является системой конечно-элементного моделирования разрабатываемой компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC), и предназначена для анализа трехмерного течения металла при различных процессах обработки металлов давлением. Данная система позволяет прогнозировать характер формоизменения с высокой точностью и минимальными затратами на экспериментальные проверки.

Деформирование заготовок производилось в 4 стадии на испытательной машине Р-100 с максимальным усилием 1 Нм. В качестве смазки использовался графитол. После каждой стадии производился замер отверстия на микроскопе БМИ – 1 через каждые 5 мм по длине отверстия с меньшим диаметром отверстия (рис. 2).

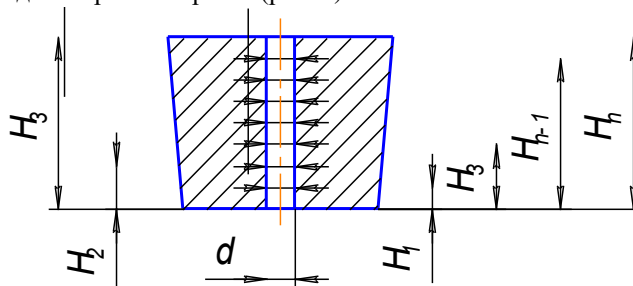


Рис. 2. Схема измерения заготовки

Во время проведения эксперимента фиксировались значения силы деформирования на ходе обжатия равным 15 мм, 25мм, 30 мм.

В качестве примера рассмотрена коническая заготовка. Размеры заготовки до и после деформирования в программе Deform-3D приведены на рис. 3. Размеры заготовки после деформирования, измеренные после моделирования, и после эксперимента совпадают.

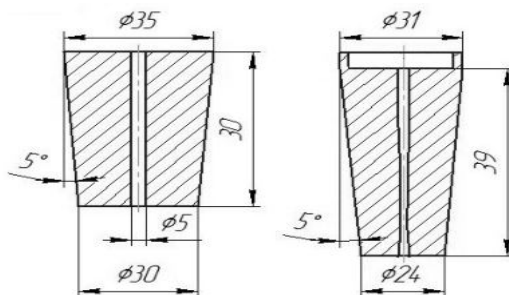


Рис. 3. Эскиз заготовки до и после деформирования

По методике разработана и написана программа на языке высокого уровня C++ для определения параметров НДС. С помощью программы получен расчет параметров НДС при деформировании радиальным обжатием разъемных конических заготовок.

График распределения параметров деформированного состояния вдоль верхнего поперечного сечения (1-1) заготовки представлен на рис. 4, параметров напряженного состояния вдоль сечения 1-1 на рис. 5.

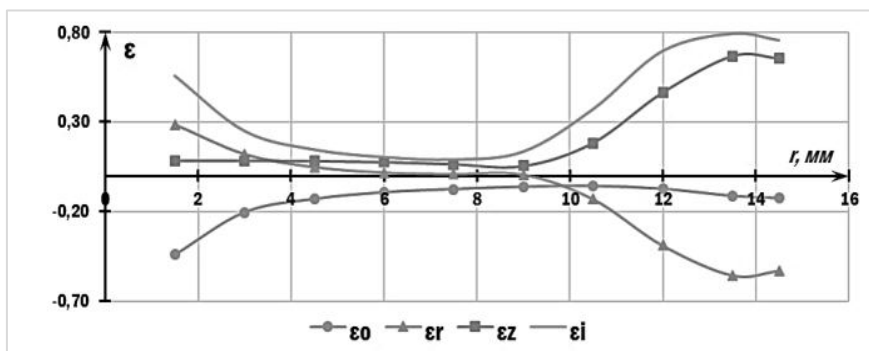


Рис. 4. Распределение параметров деформированного состояния по сечению (1-1)

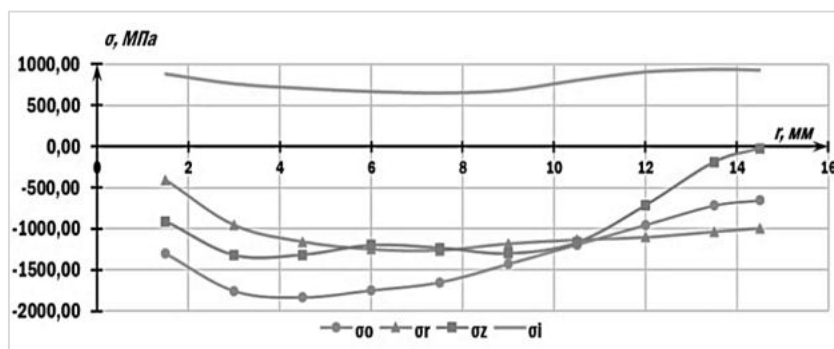


Рис. 5. Распределение параметров напряженного состояния (МПа) по сечению (1-1)

При моделировании были приняты следующие допущения:

1. Материал изотропный.
2. Процесс деформирования монотонный.
3. Рабочие инструменты являются абсолютно жесткими.
4. Температура не влияет на процесс моделирования.
5. Коэффициент трения принят равным 0,07 [2].

В программном пакете разбиение модели на конечные элементы (КЭ) проводится автоматически. Конечным элементом является тетраэдр. Число конечных элементов было задано 150 000. После генерации сетки число КЭ составило 135 632 элемента. Ход обжатия h заготовки составляет 30 мм.

По итогам моделирования выполнен анализ распределения параметров напряженно-деформированного состояния в трех поперечных сечениях заготовки и по высоте заготовки (рис. 6).

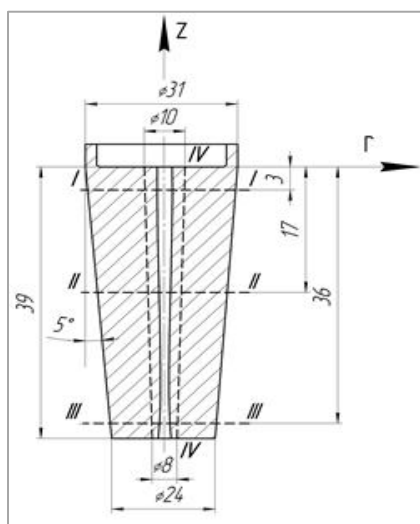


Рис. 6. Вид заготовки после деформации (меридиальное сечение):
I-I, II-II, III-III, IV-IV – сечения, в которых исследованы параметры НДС

Проведена оценка и сравнение параметров НДС при методе компьютерного моделирования и при экспериментальных методах исследования. Анализ позволяет утверждать возможность использования моделирования в научных исследованиях.

Распределения параметров НДС представлено на рис. 7а, параметров деформированного состояния – на рис.7б.

При рассмотрении распределения НДС в поперечных сечениях заготовки выявлены следующие закономерности. Заготовку можно разделить на три зоны – центральную, прилегающую к отверстию, среднюю и поверхностную. Центральная зона продеформирована больше, чем остальная часть заготовки. Максимальная величина деформации ϵ_i составляет 150 %, напряжений σ_i – 1100 МПа. В центральной части преобладают $\sigma_i = 940 \dots 1020$ МПа, $\epsilon_i = 75 \dots 113$ %; в средней $\sigma_i = 780 \dots 860$ МПа, $\epsilon_i = 37,5 \dots 56,3$ %; в краевой $\sigma_i = 780 \dots 940$ МПа, $\epsilon_i = 37,5 \dots 56,3$ %. В верхней части заготовки ϵ_i и σ_i распределены неравномерно, что отражено на рисунке 6. По абсолютной величине напряжений в центральной части заготовки $\sigma_i = 940 \dots 1100$ МПа, $\epsilon_i = 75,5 \dots 150$ % в два раза превосходят напряжения в средней и краевой зонах $\sigma_i = 460 \dots 780$ МПа, $\epsilon_i = 18,8 \dots 56,3$ %.

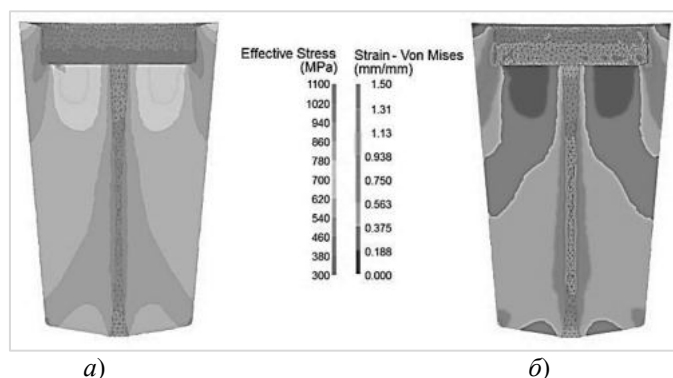


Рис. 7. Распределение интенсивности напряженного состояния (а) и интенсивности деформированного состояния (б)

При рассмотрении распределения НДС в поперечных сечениях заготовки выявлены следующие закономерности. Заготовку можно разделить на три зоны – центральную, прилегающую к отверстию, среднюю и поверхностную. Центральная зона деформирована больше, чем остальная часть заготовки. Максимальная величина деформации ε_i составляет 150 %, напряжений σ_i – 1100 МПа. В центральной части преобладают $\sigma_i = 940 \dots 1020$ МПа, $\varepsilon_i = 75 \dots 113$ %; в средней $\sigma_i = 780 \dots 860$ МПа, $\varepsilon_i = 37,5 \dots 56,3$ %; в краевой $\sigma_i = 780 \dots 940$ МПа, $\varepsilon_i = 37,5 \dots 56,3$ %. В верхней части заготовки ε_i и σ_i распределены неравномерно, что отражено на рисунке 6. По абсолютной величине напряжений в центральной части заготовки $\sigma_i = 940 \dots 1100$ МПа, $\varepsilon_i = 75,5 \dots 150$ % в два раза превосходят напряжения в средней и краевой зонах $\sigma_i = 460 \dots 780$ МПа, $\varepsilon_i = 18,8 \dots 56,3$ %.

По результатам моделирования получена зависимость изменения силы деформирования P от хода обжатия заготовки (рис. 8).

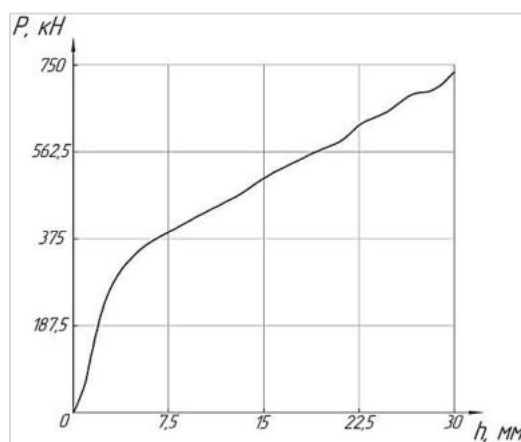


Рис. 8. Зависимость силы P от хода обжатия конической заготовки h

Сила деформирования составляет 74 тонн, что не соответствует экспериментальному значению равным 35 тоннам. Такие расхождения данных возможны из-за сложности моделирования процесса ОМД, а также из-за неточной методики расчета силы деформирования в программе Deform-3D.

На примере совершенствования технологии изготовления матриц обжима показана высокая эффективность процесса выдавливания радиальным обжатием в патронном производстве.

Адекватность полученных моделей и методики в целом подтверждена математически и экспериментально.

Библиографический список

1. Кулешова А. В., Нестеров Н. И. Совершенствование технологии изготовления матрицы обжима пульной оболочки // Молодежь. Техника. Космос: труды X ОМНТК. Т.1. СПб: БГТУ «Военмех», 2018. С. 393 – 396.
2. Лясников А. В. Образование полостей пресс – форм и штампов выдавливанием. СПб: Внешторгиздат. СПбО, 1993. 312 с.

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ПРОИЗВОДСТВА ПОЛОЙ ДЕТАЛИ****А. С. Ларкин, Н. Ф. Шпунькин***Московский политехнический университет*

Получение полых деталей является одной из насущных проблем в холодной штамповке. Номенклатура данных изделий очень широка и детали производятся как в серийном, так и в массовом производстве. В данной статье рассмотрен вопрос оптимизации процесса изготовления полых деталей методом объемной штамповки. Даются рекомендации по технологическим параметрам процесса и выбору оборудования.

Деталь (рис. 1) изготавливается методом холодной объемной штамповки из алюминиевого прутка Д16. Технологический процесс включает в себя следующие операции: рубка прутка, осадка, формовка, обратное выдавливание, сверление отверстия, токарная обработка.

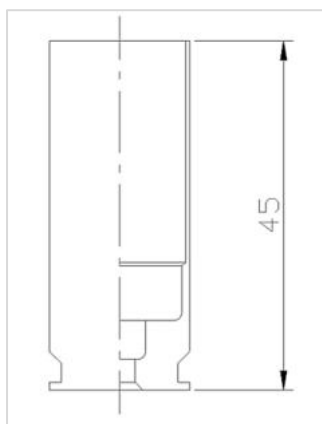


Рис. 1. Готовая деталь

Перед оптимизацией процесса было проведено моделирование существующего технологического процесса, а именно операции «формовка» и «обратное выдавливание» в среде QForm. Операционные эскизы данных процессов представлены на рис. 2.

Операция «формовка» выполняется на гидравлическом прессе PYE-25S (максимальная номинальная сила 25 тонн), а операция «обратное выдавливание» – на кривошипном прессе КД2126 (максимальная номинальная сила 40 тонн).

Результаты моделирования представлены на рис. 3 и рис. 4.

Анализируя результаты моделирования можно отметить то, что максимальное усилие при операции формовки составляет около 17 т, а при обратном выдавливании – около 30 т, что подтверждает тот факт, что пресса, на которых выполняются данные операции, подобраны правильно.

Было принято решение оптимизировать технологический процесс, исключив операцию «формовка», т.е. провести обратное выдавливание заготовки после осадки.

Результаты моделирования данного процесса представлены на рис. 5 .

Анализируя результаты моделирования можно отметить то, что максимальное усилие при данной операции составляет около 34 т, т.е. данную операцию невозможно провести на существующих прессах.

Чтобы осуществить данную операцию, необходим пресс с номинальной силой не менее полученной в результате расчета. Основываясь на этом, был выбран гидравлический пресс РУЕ-63 с максимальной номинальной силой 63 тонны.

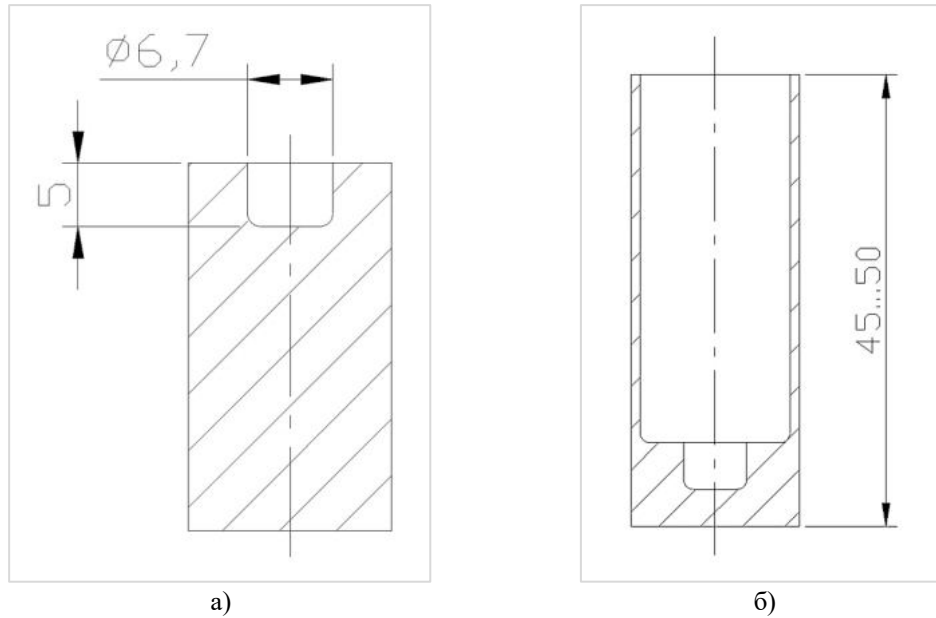


Рис. 2.
а – операционный эскиз формовки,
б – операционный эскиз обратного выдавливания

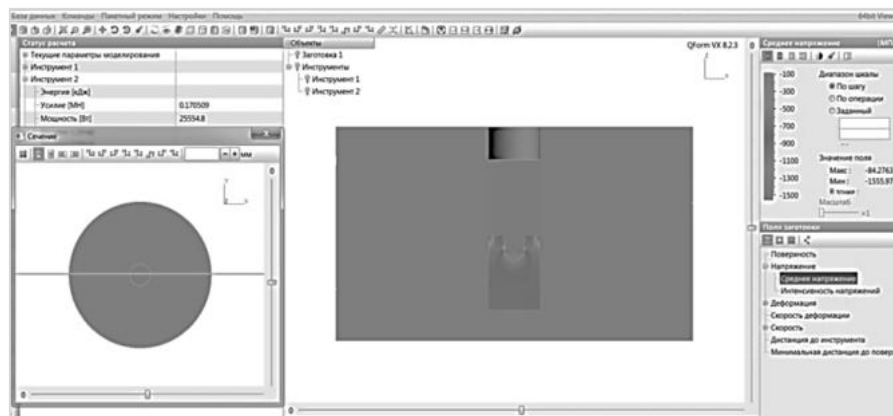


Рис. 3. Результаты моделирования процесса формовки

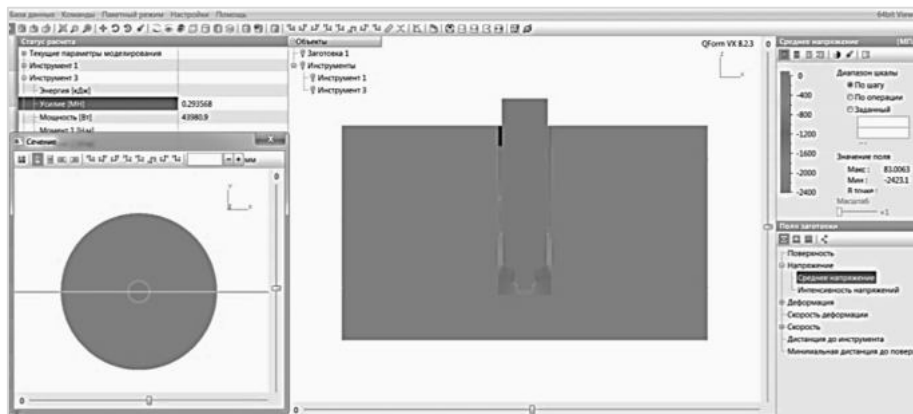


Рис. 4. Результаты моделирования процесса обратного выдавливания

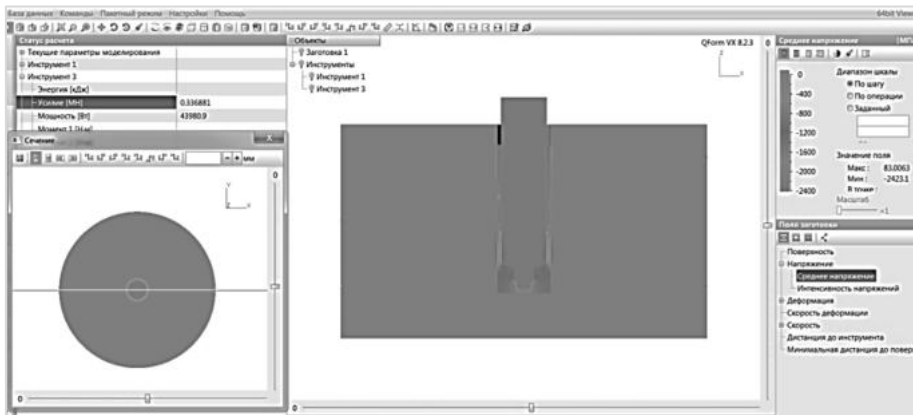


Рис. 5. Результаты моделирования процесса обратного выдавливания без предварительной формовки

В результате проведенной работы в технологическом процессе объемной штамповки детали было заменено оборудование, что сделало возможным сократить количество технологических операций, а, следовательно, сократило время на изготовление одной единицы продукции.

Библиографический список

1. Родионов Е. М. Конспект лекций по курсу «Технологические основы конструирования деталей оптических приборов», раздел – «Технологические основы конструирования деталей, изготавливаемых методами обработки давлением». М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 55 с.
2. Головин В. А., Ракошиц Г. С., Навроцкий А. Г. Технология и оборудование холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1987. 352 с.
3. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение ЛО, 1979. 520с.
4. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 423с.

ФОРМУЕМОСТЬ ТОНКОЛИСТОВЫХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ**В. С. Мамутов, В. В. Блажевич***Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

Увеличение формуемости тонколистовых металлов является одной из проблем современного листоштамповочного производства. Это представляется важным при изготовлении крупногабаритных кузовных деталей автотранспорта, параболических антенн спутникового телевидения и других деталей, требующих значительного и сложного формоизменения. В настоящее время перспективными являются экстранизкоуглеродистые стали с содержанием углерода менее 0.002...0.0005% и азота менее 0.002...0.0007%. Производство таких сталей в настоящее время налаживается и в нашей стране [1]. У таких сталей нет эффекта старения, относительно высокая коррозионная стойкость и прочность при сохранении формуемости. Дополнительное увеличение формуемости при изготовлении детали можно достичь за счет импульсного нагружения заготовки, например, при электрогидроимпульсной штамповке (ЭГИШ) [2, 3]. До сих пор обсуждаются различные механизмы увеличения формуемости при импульсном нагружении по сравнению с вариантом квазистатического нагружения заготовки. Обычно при ЭГИШ формуемость листового металла оценивается уровнем заполнения конической матрицы [4]. В работе [5] предполагается, что увеличение формуемости происходит за счет увеличения гидростатического давления в точках контакта заготовки со стенкой матрицы. С другой стороны, исследование диаграммы предельных деформаций (FLD) показывает, что при динамическом нагружении FLD лежит ниже по сравнению со случаем квазистатических испытаний [6]. В настоящее время в связи с развитием компьютерной техники, возможности расчета с использованием таких конечно-элементных (КЭ) комплексов как LS-DYNA [7] дает возможность делать качественные анализы процессов импульсного деформирования листовых металлов.

Целью данной работы было исследование механизма увеличения предельной штампуемости стали марки IF при электрогидроимпульсном нагружении в сравнении с квазистатическим нагружением при вытяжке-формовке в коническую матрицу на основе анализа результатов компьютерного моделирования в явном КЭ комплексе LS-DYNA.

Экспериментальные исследования. Рассматривалась вытяжка-формовка круглой в плане заготовки из стали IF (российский аналог 08КП) толщиной 0.74 мм диаметром 148 мм в коническую матрицу с диаметром заходной части конуса 90 мм и высотой 30 мм с радиусом закругления кромки матрицы 2 мм.

Эксперименты по импульсному нагружению проводились на промышленной электрогидроимпульсной установке ПЭГ-25 с измененными по сравнению с номинальными параметрами высоковольтного блока. Установка имела следующие основные параметры:

- энергия, запасаемая в конденсаторной батарее – $W_0 = 25$ кДж,
- максимальное напряжение заряда конденсаторной батареи – $U_0 = 32$ кВ,
- собственная индуктивность – $L_0 = 5$ мкГн,
- емкость конденсаторной батареи – $C = 50$ мкФ.

Схема электрогидроимпульсного нагружения представлена на рис. 1.

Конденсаторная батарея С электрогидроимпульсной установки 1 заряжается до напряжения несколько десятков киловольт от повышающего трансформатора Т и высоковольтного выпрямителя R, В. При подаче управляющего импульса на разрядник D происходит пробой промежутка между электродами 3 в рабочей жидкости разрядной камеры 2. Расширение образующейся плазменной парогазовой полости за счет адиабатического нагрева протекающими по ней сильными импульсными токами приводит к сжатию жидкости, импульсное давление

воздействует на деформируемую заготовку 4, осуществляя требуемую формообразующую операцию по профилю матрицы 5. В опытах варьировалась энергия заряда конденсаторной батареи, чтобы определить минимальную энергию, необходимую для разрушения заготовки или заполнения формы матрицы, если заготовка не разрушалась.

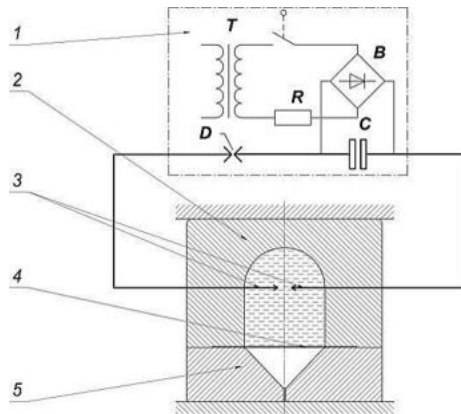


Рис. 1. Схема электрогидроимпульсного нагружения:
1 – электрогидроимпульсная установка; 2 – разрядная камера с рабочей жидкостью; 3 – электроды;
4 – заготовка; 5 – матрица

Также проводились опыты по квазистатической вытяжке-формовке аналогичной заготовки с той же конической матрицей, установленной в контейнер с полиуретаном. Эксперименты по квазистатическому нагружению проводились на гидравлической испытательной машине усилием 1000 кН (ПСУ-100). При возможном разрушении заготовки давление резко уменьшалось, и нагружение останавливалось.

Выяснилось, что для конической матрицы с указанными выше размерами (рис. 2, а) при импульсной формовке происходит полное заполнение формы матрицы и частичное заполнение отверстия для выхода воздуха, центр заготовки доходит до дна матрицы без разрушения, а при квазистатическом нагружении имеет место разрушение заготовки (рис. 2, б). Также при ЭГИШ можно наблюдать частичный отскок заготовки от стенки матрицы вблизи центра заготовки.



Рис. 2. Матрица и образцы после квазистатического и импульсного нагружения

Это позволяет говорить об увеличении штампуемости стали марки *IF* при электрогидроимпульсной штамповке.

Компьютерный расчет деформирования заготовки. Компьютерный расчет двух вариантов нагружения заготовки – квазистатического и импульсного с параметрами давления, характерными для ЭГИШ – осуществлялся с использованием универсального конечно-элементного комплекса *LS-DYNA 971*. При расчетах материал заготовки считался изотропным, и определялись следующие основные параметры: упругие константы: $E = 200$ ГПа – модуль Юнга, $\nu = 0.3$ – коэффициент Пуассона; параметры степенного закона упрочнения: $B = 554$ МПа, $m = 0.227$; плотность материала $\rho = 7800$ кг/м³. Модель материала бралась: *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY*. При этом полагалось, что кривая деформационного упрочнения аппроксимирована степенной зависимостью

$$\sigma_s = k_d B \cdot \varepsilon_i^m,$$

где σ_s – напряжение текучести материала, ε_i – интенсивность тензора логарифмических деформаций, k_d – коэффициент динамичности, который при квазистатическом нагружении брался равным $k_d = 1$, а при динамическом нагружении $k_d = 1.2$ по аналогии с малоуглеродистым материалом 08КП [7]. Материал матрицы и прижима задавался моделью *RIGID*.

Задавалось кулоновское трение со значениями коэффициента трения при трении покоя $\mu = 0.2$ и $\mu = 0.15$ при движении.

Временной закон импульсного давления задавался модифицированной экспоненциальной зависимостью с временем фронта t_f и характеристическим временем T . При этом зависимость давления p от относительного времени τ в численном эксперименте задавалась в виде

$$p = p_0 N_p (\tau)^a \exp(-b\tau),$$

где p_0 – амплитудное значение давления, $\tau = t/T$ – относительное время. Нормирующие величины N_p , a , b определялись соотношениями:

$$\begin{aligned} t^* &= t_f/T, \\ b &= 1/(1-t^* + t^* \ln t^*), \\ N_p &= \exp(b-1), \\ a &= b \cdot t^*. \end{aligned}$$

Такая зависимость определяет амплитуду давления $p = p_0$ при времени $t = t_f$ и уменьшение давления в e раз при величине $t = T$.

При квазистатическом нагружении давление линейно возрастало до максимального значения при времени 100 мс. Амплитуда давления выбиралась таким образом, чтобы первая главная деформация немного превысила кривую разрушения *FLD* при квазистатическом нагружении, а при импульсном нагружении немного не доходила до этой кривой. При таких условиях сравнивался предельный прогиб заготовки при импульсном и динамическом нагружении.

Пример компьютерных расчетов представлен на рис. 3. Диаграммы предельных деформаций даны в координатах: вторая главная инженерная деформация – первая главная инженерная деформация. Элементы взяты вдоль образующей заготовки.

Численный эксперимент проводился путем варьирования характеристического времени T с постоянным относительным временем нарастания давления $c = 0.1$. Для каждого варианта временных параметров варьировалась также амплитуда давления $p = p_0$, чтобы максимально приблизиться к верхней линии *FLD*.

По данным компьютерных расчетов максимальный прогиб, предшествующий разрушению заготовки, при квазистатическом нагружении на 20...25% ниже, чем при импульсном нагружении в пределах исследованного диапазона характеристического времени $T \in [50, 500]$ мкс. Такой диапазон характерен для ЭГИШ. Если пути деформирования точек заготовки при квазистатическом нагружении (рис. 3, б) практически детерминированы, то при импульсном нагружении пути деформирования (рис. 3, г, е) зависят от параметров давления. В частности, это позволяет перераспределять деформации вдоль образующей заготовки (рис. 3, в, д). Такое отличие вызвано волновым характером деформирования заготовки вследствие конечной ско-

рости распространения пластических волн в материале заготовки, время пробега которых соизмеримо с длительностью давления. При очень коротком давлении эффект может быть отрицательным, и разрушение заготовки может произойти вблизи радиуса закругления кромки матрицы за счет эффекта локализации пластических деформаций. При создании благоприятных условий импульсное нагружение позволяет увеличить величину предельного формоизменения заготовки.

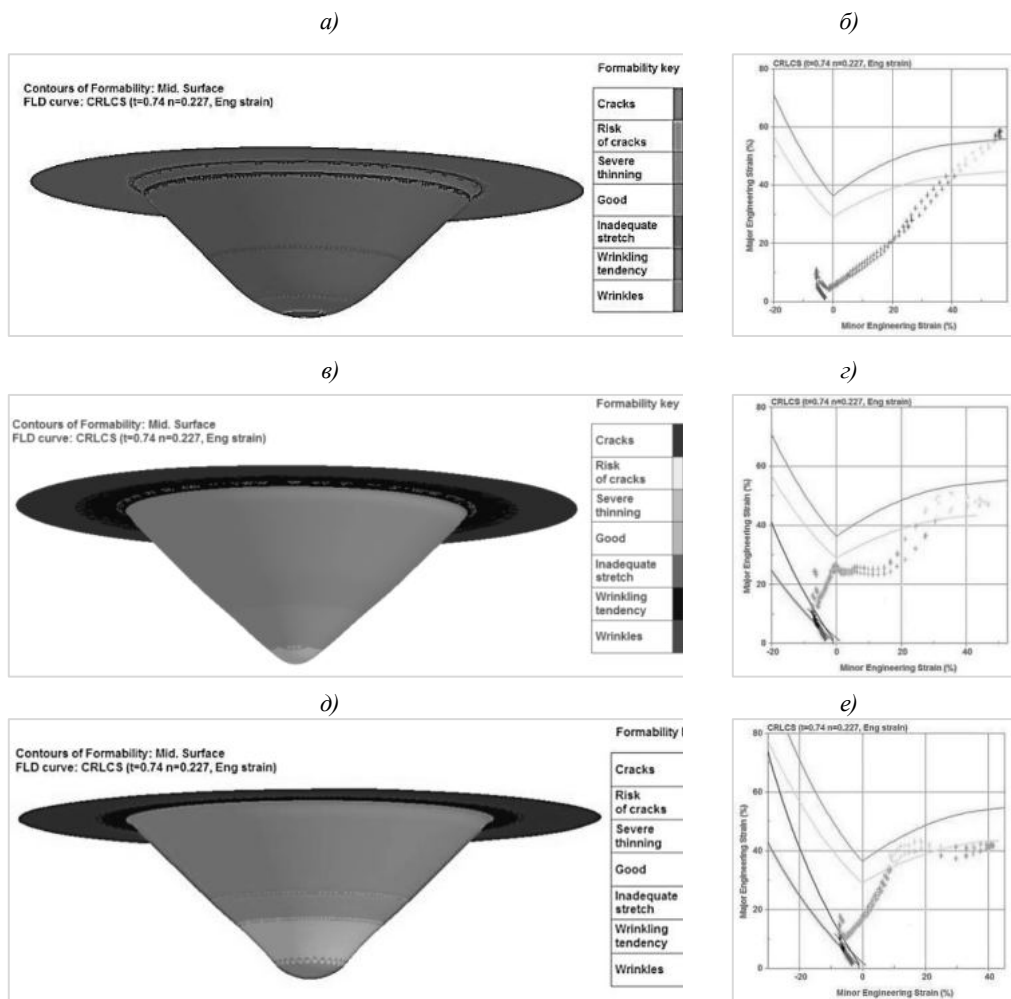


Рис. 3. Параметры деформированной заготовки

- a) форма заготовки при квазистатическом нагружении в момент после начала нарушения сплошности;
- б) диаграмма предельных деформаций для варианта a);
- в) форма заготовки при импульсном нагружении вблизи момента начала нарушения сплошности ($t_f = 5$ мкс, $T = 50$ мкс),
- з) диаграмма предельных деформаций для варианта в);
- д) форма заготовки при импульсном нагружении вблизи момента начала нарушения сплошности ($t_f = 50$ мкс, $T = 500$ мкс),
- е) диаграмма предельных деформаций для варианта д)

Таким образом, при импульсном нагружении, в частности при электрогидроимпульсной штамповке тонколистовой заготовки в закрытую матрицу может быть достигнута большая

величина предельного формоизменения по сравнению с вариантом квазистатического нагружения, как это показано на примере низкоуглеродистой стали *IF*. Максимальный прогиб, предшествующий разрушению заготовки, при квазистатическом нагружении на 20...25% ниже, чем при импульсном нагружении в пределах исследованного диапазона характеристического времени $T \in [50, 500]$ мкс. Данный эффект определяется более благоприятным расположением точек главных деформаций заготовки относительно кривой разрушения на *FLD*, что вызвано волновым характером деформирования заготовки.

Библиографический список

1. Кудрявцев С. М., Пачурин Г. В., Соловьев Д. В., Власов В. А. Основы проектирования, производства и материалы кузова современного автомобиля. Нижний Новгород: изд-во НГТУ, 2010. 236 с.
2. S. F. Golovashchenko and V. S. Mamutov, Electrohydraulic Forming of Automotive Panels // Proceedings of 6th Global Innovations Symposium: Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries, TMS, 2005, p.65 – 70.
3. S. F. Golovashchenko, N. M. Bessonov, and A. M. Ilinich, Two-Step Method of Forming Complex Shapes from Sheet Metal // J. Materials Process. Technol. 211 (5), 875–885 (2011).
4. A Rohatgi, EV Stephens, RW Davies, MT Smith, A Soulami, S Ahzi Electro-hydraulic forming of sheet metals: Free-forming vs. conical-die forming. Journal of Materials Processing Technology 212 (5), 1070-1079 (2012)
5. Persy J.N. The effect of strain rate on the forming limit diagram for sheet metal. Annals of CIPP, 1980, vol. 29, N1, pp.131 – 132.
6. J.O. Hallquist, LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 498 p. (2006).
7. Вагин В. А., Здор Г. Н., Мамутов В. С. Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. Минск: Наука и техника, 1990. 208 с.

УДК 624.074.5

ДИСКРЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО РАСЧЕТА ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

В. А. Мелешко

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Рассмотрена формулировка метода конечных элементов в форме метода перемещений и метода сил. Представлена гибридная модель МКЭ для определения упругопластических деформаций. Предложена алгоритмизация расчета плоских стержневых систем в нелинейной области. Показаны основные отличия и преимущества при расчете стержневых систем дискретно-аналитическим методом. Проведено сравнение результатов расчета стержневых систем, полученных дискретно-аналитическим методом с методом конечных элементов. Предлагаемый способ позволяет получить адекватные результаты без значительных процессорных и временных затрат.

В современной инженерной практике довольно часто приходится решать задачи связанные с определением упругопластических деформаций. В настоящее время провести нелинейный анализ можно только используя мощные компьютерные программы, которые базируются на применении метода конечных элементов (МКЭ). При решении методом конечных элемен-

тов нелинейных задач, связанных с анализом упругопластических процессов в конструкциях, резко возрастает процессорное время, что часто неприемлемо в проектных условиях.

В большинстве случаев для расчета строительных конструкций используются стержневые системы, которые охватывают большой спектр инженерных задач. Для таких систем возможно решение упругопластических задач с помощью обобщения классических методов строительной механики – метода сил и метода перемещений. Такое обобщение предполагает использование явной по времени вычислительной схемы и определения на каждом шаге касательных жесткостей системы. Подход на основе обобщенного метода сил (обобщенного метода перемещений) позволяет резко сократить время решения упругопластических задач.

Целью данного исследования была разработка дискретно-аналитического метода расчета стержневых систем в нелинейной области. Предложен алгоритм расчета плоской стержневой системы. Проведено сравнение результатов расчета с МКЭ.

Научная новизна и отличие от метода конечных элементов (МКЭ) заключается в исключении конечных элементов при формировании системы алгебраических уравнений и замене их участками, на которых происходит интегрирование распределенных параметров жесткости. В результате количество уравнений в системе будет соответствовать числу статической (или кинематической) неопределимости стержневой системы. Причем, если стержневая система статически определима, то нет необходимости решать систему уравнений. Здесь любое распределение параметров по длине стержня учитывается с помощью интегральной жесткости в сечении. Далее будет рассмотрен алгоритм нелинейного расчета плоской стержневой системы дискретно-аналитическим методом. Здесь предпочтение отдано методу перемещений в основном из-за простоты выбора основной системы, способа построения равновесных уравнений, составления матрицы жесткости и вектора внешних нагрузок. При этом в классическом методе сил есть неоспоримое преимущество, связанное с отсутствием необходимости определять локальную матрицу жесткости стержня. Рассмотрим плюсы и минусы двух форм МКЭ при упругопластическом расчете.

Преимущества метода сил:

- точность определения напряжений;
- прямое построение матрицы податливости;
- учет абсолютно жестких стержней.

Недостатки метода сил:

- больше неизвестных при жестком соединении нескольких стержней;
- необходимы дополнительные выражения для определения полных перемещений;
- трудности при формировании системы уравнений и учете геометрической нелинейности.

Преимущества метода перемещений:

- меньшее количество неизвестных при жестком соединении стержней;
- естественный механизм формирования разрешающей системы уравнений;
- прямое получение перемещений при решении системы уравнений;
- учет геометрической нелинейности.

Недостатки метода перемещений:

- погрешность при определении напряжений, так как они вторичны;
- сложности при учете абсолютно жестких стержней;
- необходимость определения промежуточной матрицы жесткости. Но так как матрицу жесткости стержня можно определить через функции формы, то не надо решать промежуточную систему уравнений для определения коэффициентов жесткости в узлах.

Теоретически, на основе вариационного принципа Кастильяно, должна получиться система разрешающих уравнений в форме метода сил, но на практике возникают определенные трудности и необходим специальный механизм для формирования этой системы. В данной работе рассмотрен гибридный подход, в котором для определения внутренних усилий в узлах длинного стержня применяется МКЭ в форме метода перемещений, а для учета распределения внутренних усилий по длине стержня – интегральные аналитические выражения. Здесь

конечные элементы заменяются участками интегрирования, что приведет к значительному ускорению расчета.

Основные соотношения для плоской стержневой системы. Рассмотрим гибридный метод для определения упругопластических деформаций в стержневых системах. Схема нелинейного анализа состоит из следующих этапов:

- определение матрицы жесткости стержня с учетом распределенных параметров по длине, используя аналитическое выражение для касательной жесткости или обобщенную формулу Мора;
- приведение распределенной нагрузки к узлам и перерасчет на шаге при геометрической нелинейности;
- формирование системы уравнений для определения перемещений в узлах стержней;
- определение реакций в узлах стержней;
- определение функций изменения внутренних усилий на криволинейных стержнях;
- определение напряжений в точках интегрирования через обобщенную кривизну;
- определение функций изменения перемещений по длине стержней;
- определение касательной жесткости, характеризующей жесткость в сечениях стержней.

Для плоской задачи касательную жесткость можно определить, используя интегральную функцию закона состояния сечения [1, 2]. Приведем формулу для определения касательной жесткости прямоугольного сечения [3]:

$$T(\tau) = \begin{cases} \frac{\sigma_s b h^3}{4 \varepsilon_s} \cdot \frac{1}{3}, \tau \leq 1 \\ \frac{\sigma_s b h^3}{4 \varepsilon_s} \cdot \frac{1}{3 \tau(x)^3} \cdot \left[1 + a \left(\tau(x)^3 - 1 \right) \right], \tau > 1 \end{cases}, a = \frac{E_{pl}}{E}, \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\chi h}{2 \varepsilon_s}, \quad (2)$$

где ε_s – деформация, соответствующая пределу текучести, σ_s – предел текучести, χ – кривизна стержня в рассматриваемом сечении, b, h – параметры прямоугольного сечения; E_{pl} – касательный (пластический) модуль упругости.

Так как здесь не учитывается перемещение от сдвига, то матрицу жесткости стержня можно получить через функции формы (рис. 1)

$$N_1 = 1 - \frac{x}{l}; N_2 = \left(1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3} \right); N_3 = \left(x - \frac{2x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2} \right), \quad (3)$$

$$N_4 = \frac{x}{l}; N_5 = \left(\frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3} \right); N_6 = \left(-\frac{x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2} \right). \quad (4)$$



Рис. 1. Степени свободы

Продифференцировав потенциальную энергию деформации по перемещениям, получим формулу для определения матрицы жесткости стержневого элемента работающего на изгиб

$$[K^e] = EI \int_0^l \frac{d^2[N]^T}{dx^2} \frac{d^2[N]}{dx^2} dx = EI \int_0^l \begin{bmatrix} N_2'' \\ N_3'' \\ N_5'' \\ N_6'' \end{bmatrix} [N_2'' \quad N_3'' \quad N_5'' \quad N_6''] dx = EI \int_0^l \begin{bmatrix} N_2'' N_2'' & N_2'' N_3'' & N_2'' N_5'' & N_2'' N_6'' \\ N_3'' N_2'' & N_3'' N_3'' & N_3'' N_5'' & N_3'' N_6'' \\ N_5'' N_2'' & N_5'' N_3'' & N_5'' N_5'' & N_5'' N_6'' \\ N_6'' N_2'' & N_6'' N_3'' & N_6'' N_5'' & N_6'' N_6'' \end{bmatrix} dx \quad (5)$$

Заменим EI на $T(\tau)$ и в несем под знак интегралла. С учетом осевых коэффициентов жесткости получим формулу для определения матрицы жесткости на шаге через функции формы

$$[K^e] = \int_0^l \begin{bmatrix} \frac{F}{I} \cdot N_1' N_1' & 0 & 0 & \frac{F}{I} \cdot N_1' N_4' & 0 & 0 \\ 0 & N_2'' N_2'' & N_2'' N_3'' & 0 & N_2'' N_5'' & N_2'' N_6'' \\ 0 & N_3'' N_2'' & N_3'' N_3'' & 0 & N_3'' N_5'' & N_3'' N_6'' \\ \frac{F}{I} \cdot N_4' N_1' & 0 & 0 & \frac{F}{I} \cdot N_4' N_4' & 0 & 0 \\ 0 & N_5'' N_2'' & N_5'' N_3'' & 0 & N_5'' N_5'' & N_5'' N_6'' \\ 0 & N_5'' N_2'' & N_6'' N_3'' & 0 & N_6'' N_5'' & N_6'' N_6'' \end{bmatrix} \cdot T(\tau) dx, \quad (6)$$

где F – площадь сечения; I – момент инерции сечения.

Приведение распределенной нагрузки p к эквивалентной на шаге

$$\{P^e\} = \int_0^l [N]^T p \cdot \frac{T(\tau)}{EI} dx = p \int_0^l \begin{bmatrix} N_2 \\ N_3 \\ N_5 \\ N_6 \end{bmatrix} \cdot \frac{T(\tau)}{EI} dx. \quad (7)$$

После определения коэффициентов жесткости k_{ij} матрица жесткости в глобальной системе координат определяется обычным образом на каждом шаге. Коэффициенты жесткости сходящихся в узле стержней складываются. Затем в инкрементальной форме для приращения нагрузки на шаге решаются для системы в целом уравнения метода конечных элементов и находятся приращения моментов в сечениях $\Delta M(x)$.

Определение приращения кривизн по длине стержней:

$$\Delta \chi(x) = \frac{\Delta M(x)}{T(\tau)}, \quad (8)$$

приращение деформаций в крайних волокнах:

$$\Delta \varepsilon(x) = \Delta \chi(x) \frac{h}{2}. \quad (9)$$

Определение напряжений и деформаций на шаге:

$$\varepsilon(x) = \varepsilon(x) + \Delta \varepsilon(x) \quad (10)$$

$$\sigma(x) = \begin{cases} \sigma(x) + E_{pl} \Delta \varepsilon(x), & \tau > 1 \\ \sigma(x) + E \Delta \varepsilon(x), & \tau \leq 1 \end{cases}. \quad (11)$$

Далее происходит формирование новой локальной матрицы жесткости стержневого элемента, посредством интегрирования (6), с учетом изменения жесткости в сечении. И цикл повторяется.

Сравнение результатов с МКЭ. Для проверки разработанной математической модели были написаны программы для плоской и пространственной стержневой системы (рис. 2). Отдельные блоки программ для плоской стержневой системы приведены в [2]. Сравнение результатов расчета проводилось с методом конечных элементов в ANSYS. Функция автоматического временного шага была отключена. В задаче были приняты следующие исходные данные:

- модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$;
- касательный модуль упругости $E_{pl} = 2,1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$;
- предел текучести $\sigma_s = 240 \text{ МПа}$;
- ширина квадратного сечения $a = 0,1 \text{ м}$; $l = 1 \text{ м}$
- сила $F = 1 \cdot 10^5 \text{ Н}$.

Так как разработанная математическая модель учитывает распределение напряжений по площади сечения, то в ANSYS сечение стержня было поделено на 20 площадок по высоте и ширине. Количество конечных элементов на стержне 100. При расчете дискретно-аналитическим методом для стержня было задано 100 участков интегрирования. Нелинейный расчет проводился за 20 шагов.

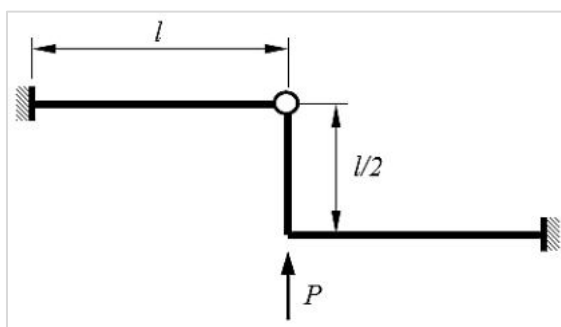


Рис. 2: Расчетная схема

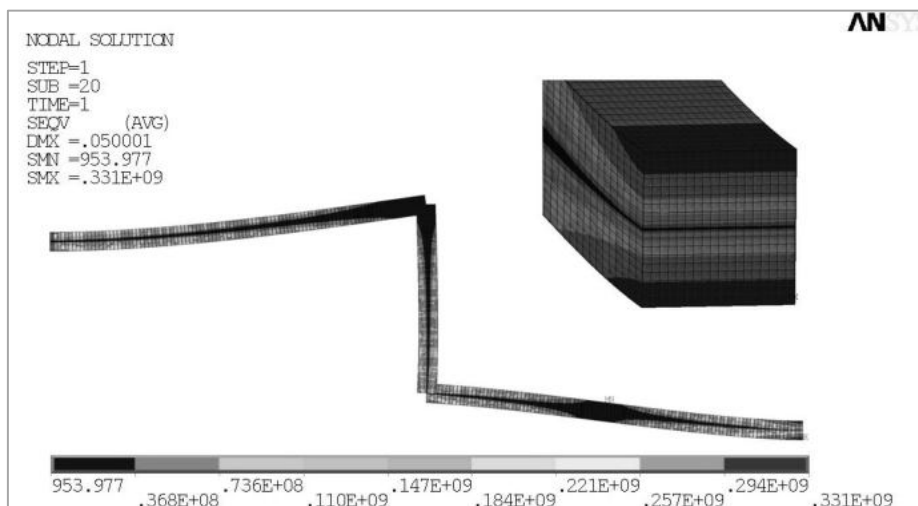


Рис. 3. Распределение напряжений в плоской раме

Таблица 1
Плоская рама

Parameter	DANA	FEA (B188)
σ , МПа	367	343
Δ , m	0.047	0,055
t, c	3	86

При увеличении количества участков интегрирования, решение стремится к точному, без существенных временных затрат.

Выводы

Предлагаемый дискретно-аналитический метод позволяет повысить точность при определении напряжений в стержневых системах и в разы снизить время упругопластического расчета. Отметим ключевые особенности и основные преимущества дискретно-аналитического нелинейного анализа в сравнении с методом конечных элементов.

Ключевые особенности:

- для расчета статически неопределимых систем используется *гибридный МКЭ в форме метода перемещений* совместно с аналитическими выражениями для стержня;
- использование интегральной касательной жесткости, позволяет *исключить конечные элементы* по длине стержня;

Основные преимущества:

- использование аналитического выражения для касательной жесткости в сечении позволяет *повысит точность* определения *упругопластических деформаций* в стержнях;
- предлагаемый метод позволит на порядок *снизить время расчета* при использовании *явных и неявных схем* численного интегрирования, реализованных в мощных программных комплексах на основе МКЭ.

Библиографический список

1. V. A. Meleshko and Yu. L. Rutman, Generalized flexibility method by the example of plane elastoplastic problem. Procedia structural integrity, Vol. 6, pp. 140–145, 2017.
2. V. A. Meleshko, Generalized force method on the example of plane geometrically nonlinear problem. Procedia structural integrity, Vol. 6, pp. 115–121, 2017.
3. N. V. Ostrovskaya, V. A. Meleshko. Analytical dependences for the tangent stiffness of cross section in elastoplastic analysis of plane rod systems. Marine intellectual technologies, 2017. 4 (38), 183 – 188.
4. V. A. Meleshko and Yu. L. Rutman, The generalization of the flexibility method for an elastoplastic calculation of rod systems. Materials physics and mechanics, Vol. 31, pp. 67–70, 2017.
5. Meleshko, V. A., Rutman U. L., 2015. Strength computation of rod systems with the consideration of physical nonlinearity using the generalized flexibility method GFM. The results are compared with FEM. Eastern European Scientific Journal, 6, 150–161.
6. (Программные комплексы и новые подходы для нелинейного анализа стержневых систем) Web of Conferences.

УДК 621.7.043

РЕКОНСТРУКЦИЯ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА АО «КОНЦЕРН «КАЛАШНИКОВ»

Ю. О. Михайлов, Н. В. Тепин, В. А. Храбров, С. Н. Князев

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

Приведены результаты комплексной работы по разработке технологических процессов, стандартов предприятия, технологических и рабочих инструкций, а также по проектированию, изготовлению штампового инструмента поковок. Рассмотрены особенности проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки с учетом опыта использования программного комплекса QForm. Использование QForm для повышения квалификации ИТР позволило существенно ускорить процесс обучения.

В рамках масштабной модернизации производства АО «Концерн «Калашников» предусмотрено создание нового кузнечно-прессового цеха для производства штампованных заготовок.

На Ижевском оружейном заводе кузнечное производство существует с основания предприятия в 1807 году. Тогда А.Ф. Дерябин открыл кузнечные мастерские, которые производили детали для оружейного производства: штыки, холодное оружие и прочее.

В 1934 году недалеко от заводоуправления был построен новый корпус кузнечного производства завода. Расцвет кузнечного производства на Ижевском оружейном заводе пришелся на 60-70 годы XX века. Тогда в цехе работало больше тысячи человек, производивших детали для оружейного, мотоциклетного производств, станкостроения и для внешних заказчиков. Многие изделия тех времен были уникальными, например, тормозной и заводной рычаги мотоциклов «Иж». Они отличались тем, что, в отличие от сварных зарубежных аналогов, целиком изготавливались штамповкой, что определяло их прочность.

Физический и моральный износ здания цеха и оборудования в условиях глубокой модернизации всего требовали принципиального решения по реконструкции действующего производства или строительству нового. Реконструкция могла негативно сказаться на сроках запуска, снижению объемов и даже остановке выпуска продукции. Поэтому было принято стратегическое решение о строительстве нового кузнечно-прессового цеха.

Сроки реализации проекта были достаточно жесткие – 2 года. Для успешной реализации проекта по организации нового кузнечного производства специалистами АО «Концерн «Калашников» и ФБГОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» было разработано техническое задание на поставку оборудования для цеха и производился аудит поставщиков оборудования. При разработке проекта новой кузницы основной задачей был переход на оборудование нового уровня, которое позволит снизить затраты, повысить точность и качество поковок. В цехе планировалось разместить пять штамповочных линий на базе молотов с энергией удара 25 и 50 кДж. Каждая линия включает карусельную газовую нагревательную печь, молот, обрезной пресс и средства механизации. Кроме того, одна из линий дополнительно оснащена автоматизированными ковочными вальцами. Кроме того, в цехе создается заготовительный участок, участок свободнойковки, участок для термообработки, очистки от окалины и калибровки. Вместо устаревших паровоздушных штамповочных молотов используются гидравлические с ЧПУ. Современное оборудование позволяет снизить влияние человеческого фактора на конечный результат и повысить КИМ поковок.

Ввиду невозможности использования на новом оборудовании действующей штамповой оснастки, параллельно строительству был запущен процесс по аудиту всех технологических процессов и подготовке технического задания на поставку для предприятия штамповой оснастки с пусконаладочными работами.

К сожалению, как показал опыт, на сегодняшний день ограничен круг предприятий, имеющих одновременно компетенции и по проектированию, и по изготовлению молотовую оснастки. Изготовитель и проектировщик в одном лице - такое условие было поставлено заводом, для оперативных решения по всем вопросам связанных с оснасткой.

Для решения подобного рода задач на базе ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» был создан Инжиниринговый центр «Ижспецтех». В рамках Инжинирингового центра действует лаборатория кафедры «Технологии и оборудование машиностроительных производств». Научные разработки кафедры известны не только в России, но и за ее пределами. Кафедру ценят не только за сильную теоретическую школу исследований, но и за успехи по внедрению новых разработок в производство.

Руководящий и преподавательский состав кафедры всегда чутко реагировал на изменения потребностей рынка, постоянно совершенствуя научную деятельность. На кафедре сформировались научные направления, занимающиеся исследованиями в области обработки материалов давлением, сварки, наплавки и термомеханической обработки, а также выполняют инжиниринг новых технологий и оборудования.

Научный потенциал кафедры «ТиОМП» позволяет одновременно осуществляется сразу несколько проектов, причем уникальных. Все работы выполняются «под ключ»: от разработки рабочих чертежей до ввода в производство спроектированных процессов и оборудования.

Богатый опыт проектирования и технологические возможности изготовления позволили специалистам кафедры «ТиОМП» выиграть тендер на разработку технологических процессов, проектирование и изготовление штампового инструмента самых массовых поковок. Кроме того, для эффективной работы нового кузнечного производства специалистами кафедры «Технологии и оборудование машиностроительных производств» проведена комплексная работа по разработке стандартов предприятия на технологическую оснастку, технологических и рабочих инструкций.

Использование металлорежущих станков с ЧПУ накладывает на штамповочное производство дополнительные требования по уменьшению фактического поля допуска поковок и снижению припусков и напусков на поковки. Поковки имеют достаточно сложную конфигурацию, поэтому это приводит к повышенному износу штамповой оснастки и нередко к поломкам (рис. 1).

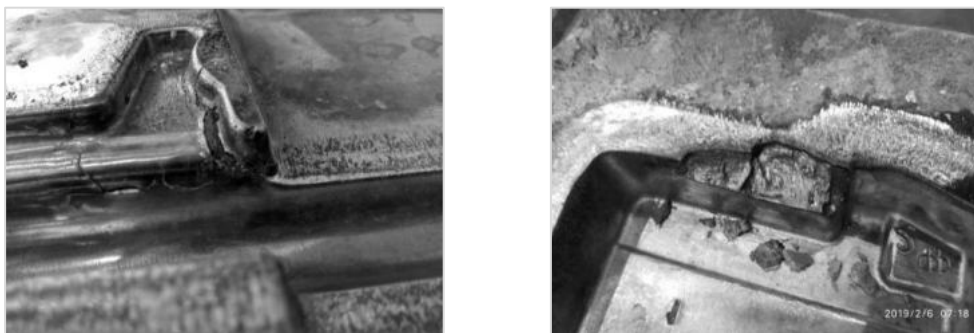


Рис. 1. Разрушение штампов

Для исключения дефектов, снижения расхода металла и сокращения сроков пусконаладочных работ при проектировании процессов пластического формоизменения использовалось компьютерное моделирование в программном комплексе QForm, который использует конечно-элементный метод решения задач.

Программный комплекс QForm позволяет моделировать все операции технологического процесса, в том числе нагрев, охлаждение на воздухе и в штампе, деформацию заготовки, обрезку облоя и термообработку.

Кроме того, используя встроенные подпрограммы можно оценить не только действующие напряжения в штампе, но и его износ.

Для технолога, кроме проверки заполняемости чистового ручья важно знать о возможных дефектах поковки, которые могут наследоваться из заготовительных ручьев (рис.2), поэтому при решении задачи необходимо моделировать каждый удар инструмента. Поскольку поковки не симметричные, поэтому необходимо решать трехмерную задачу, что существенно увеличивает время расчета, однако позволяет повысить точность получаемых результатов (рис.3).

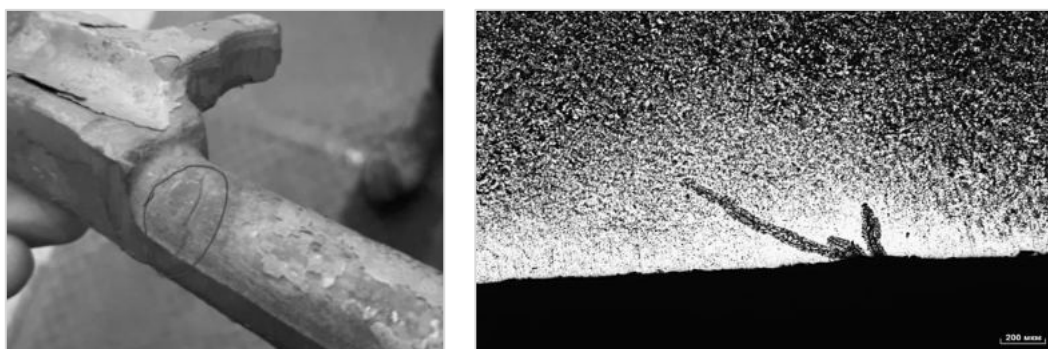


Рис. 2. Дефект поковки – заков

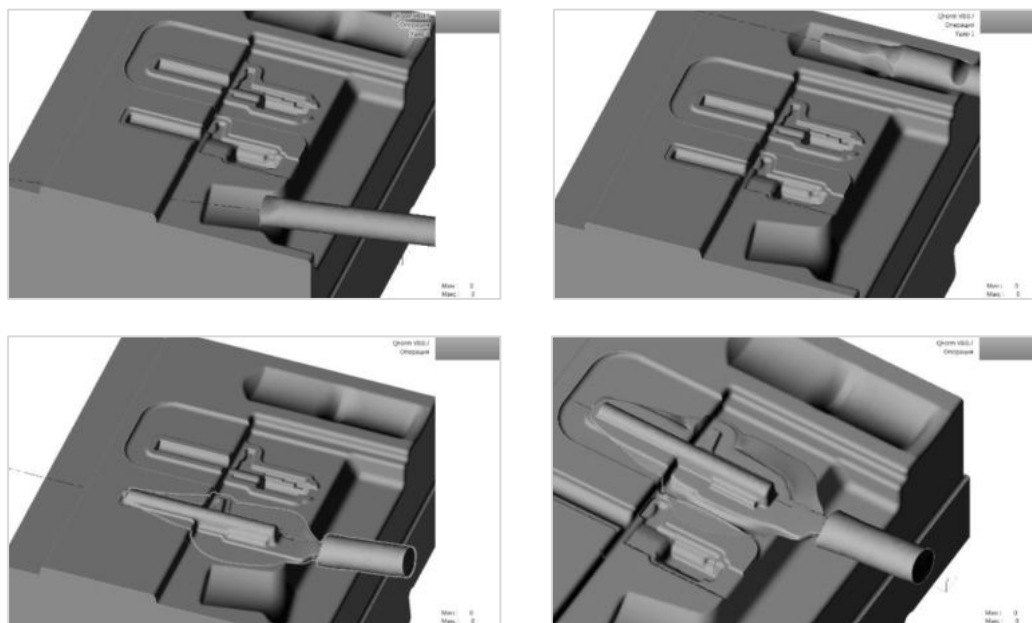


Рис. 3. Моделирование деформирования

Основная номенклатура поковок АО «Концерн «Калашников» относится к удлиненным в плане поковкам. Особенностью технологического процесса является штамповка двух поковок с поворотом заготовки на 180° . Поэтому при моделировании необходимо учитывать охлаждение второй половины заготовки в клещах. Это позволило уточнить требования к температуре нагрева заготовок.

К сожалению, в объемной штамповке до сих пор отсутствует готовый программный продукт, который бы позволял на основании модели детали спроектировать поковку и операционные эскизы. Поэтому проектирование производится вручную с использованием справочной литературы и опыта технолога. В дальнейшем модели и чертежи инструмента были создаются в САД системах типа Компас3D (рис. 3). Разработанные модели используются как для моделирования, так и для изготовления штампов.

Программный комплекс QForm имеет большую базу деформируемых материалов, инструмента и оборудования, что позволяет существенно сократить время подготовки проекта расчета. При моделировании использовалась возможность создания пользовательской модели оборудования, для расчета конкретных задач, в частности вальцовки и чеканки.

При проектировании технологического процесса использовалась возможность моделирования нагрева и охлаждения заготовок между операциями. Также использовался такой инструмент программы как граничные условия для имитации удержания заготовки клещами в процессе деформации. Кроме того, для оценки стойкости оснастки, моделировались напряжения и деформации в инструменте.

Оборудование, установленное в кузнечно-прессовом цехе, позволяет задавать и контролировать энергию каждого удара. Это позволяет с высокой достоверностью задать условия, принятые при моделировании.

При сопоставлении моделирования и опытной партии поковок установлена хорошая сходимость размеров промежуточных заготовок и готовых поковок.

Основные отличия наблюдались в размерах облоя. Это связано в основном с колебаниями размеров заготовки.

В результате проведенной работы были выработаны рекомендации по повышению стойкости штамповой оснастки, точности поковок, по проектированию технологических процессов. Данные рекомендации нашли отражение в разработанных технологических инструкциях. Разработаны комплекты технологической и конструкторской документации для производства 8 поковок. Проведено успешное промышленное освоение изготовленных комплектов молотовых, обрезных и правочных штампов.

Преподавателями кафедры «Технологии и оборудование машиностроительных производств» разработаны курсы повышения квалификации для различных категорий работников кузнечно-прессовых цехов. Для технологов и конструкторов АО «Концерн «Калашников» организовано обучение по компьютерному моделированию процессов ОМД в программном комплексе «QForm». Программа QForm имея простой интуитивно понятный интерфейс, позволяет разобраться с заданием исходных данных за считанные минуты, а благодаря специальным алгоритмам примененными в программе, получить результаты моделирования также за короткое время. Для продвинутых пользователей имеются средства для задания любых видов реологических моделей материалов, граничных условий и управления движением большого количества инструментов и деформируемых тел. Для большинства 2D задач время моделирования занимает десятки секунд и десятки минут для 3D.

Наглядные результаты моделирования позволяют значительно лучше усваивать учебный материал.

Все это существенно ускорило процесс обучения и позволило слушателям самостоятельно решать задачи оптимизации параметров технологических процессов действующего производства.

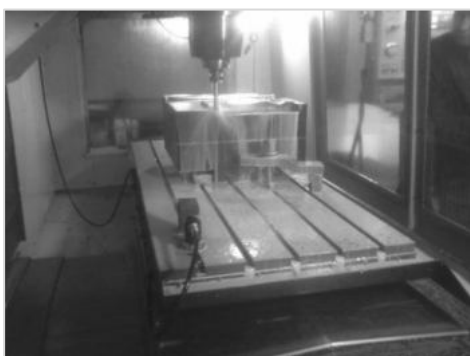
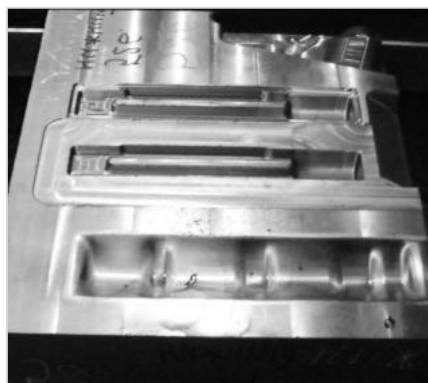
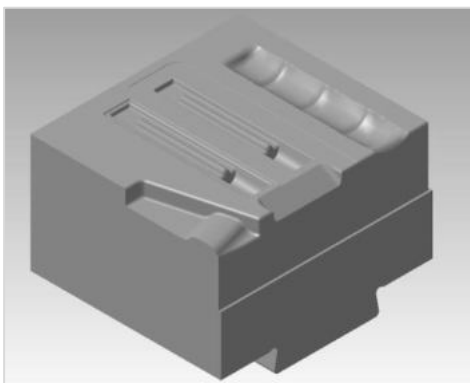


Рис. 4. Компьютерная модель и изготовленный молотовой штамп

Проведенный цикл работ позволил вывести кузнечно-штамповочное производство АО «Концерн «Калашников» на новый современный уровень, обеспечить эффективное использование средств, направляемых на развитие производств, облегчить процесс освоения новых продуктов и оптимизировать технологию выпуска существующих изделий.

Библиографический список

1. Разработка прогрессивных, малоотходных, интенсифицированных технологических процессов изготовления деталей военной и специальной техники: отчет о НИР ИжГТУ им. М.Т. Калашникова; рук. Михайлов Ю.О.; исполн: Дресвянников Д.Г. [и др.]. Ижевск, 2014. 76 с. № ГР 01201262581.
2. Михайлов Ю. О., Тетин Н. В., Храбров В. А. Использование программы QFORM в комплексном развитии штамповочного производства // Развитие кадрового потенциала ОПК: федеральные программы и региональная кадровая политика. Материалы XI Всероссийского совещания. Ижевск, 2018. С. 91 – 97.
3. Гладков Ю. А., Мордвинцев П. С. Моделирование технологических процессов штамповки при решении задач авиа- и двигателестроения // КШП. ОМД. 2012. № 5. С. 38 – 46.
4. Биба Н. В., Стебунов С. А., Гладков Ю. А., Мордвинцев П. С. Qform – универсальная и эффективная программ для моделированияковки и штамповки // КШП. ОМД. 2011. № 1. С. 36 – 42.
5. Сидоров А. Настоящее и будущее моделирования процессов обработки металлов давлением // САПР и графика. 2007. №10. С. 78 – 80.

УДК 623.452.5.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МЕМБРАН ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. И. Олехвер, Е. Ю. Ремшев

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

В настоящее время широкое применение в авиационной технике, в стартовых ракетных комплексах, в жидкостных ракетных двигателях, в различных специзделиях и боеприпасах (рисунок 1, б) находят мембраны, которые могут применяться в качестве чувствительных, предохранительных и функциональных элементов.

Например, в авиастроении мембраны используют как составной элемент систем защиты элементов питания литий-ионных батарей, установленных на самолете Боинг 787 [1,2,3]. В нефтегазовой отрасли массово применяются предохранительные мембраны различной конфигурации, которые предотвращают аварии и разрушение основного оборудования (рис. 1).

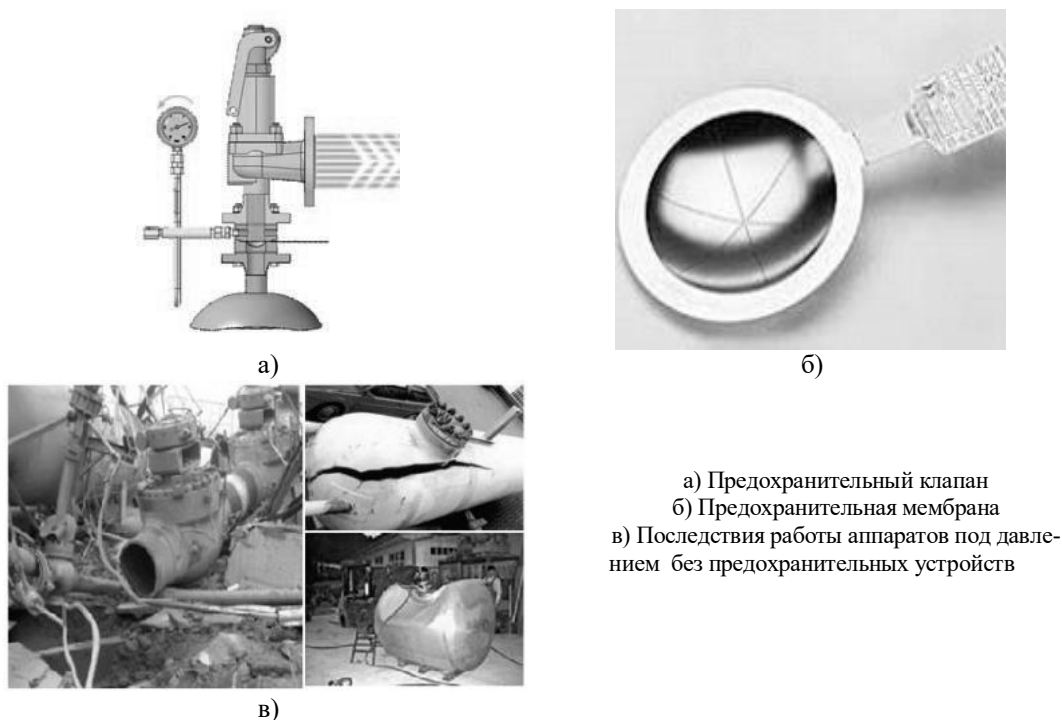


Рис. 1.

В специальных изделиях – в конструкции гранатометного выстрела 7ПЗ9 (рис. 2) используется деталь «Крышка» (рис. 3). Тонкая алюминиевая мембрана имеет шесть групп насечек – «дюзы» (рис. 3а), которые должны одновременно раскрываться под действием пороховых газов в заданном интервале давлений, что обеспечивает определенную скорость движения и стабильность полета снаряда по траектории (рис. 3б).

Основной характеристикой мембран является давление срабатывания ($P_{сраб}$). На текущий момент существует ряд полуэмпирических зависимостей, позволяющих оценить давление срабатывания плоской круглой мембраны, зафиксированной по контуру. Однако, не существует зависимостей для оценки давления срабатывания элементов с концентраторами напряжений

(насечками). Приблизительная оценка производится по зависимостям для плоских мембран по наименьшей толщине с введением дополнительных коэффициентов. Дополнительно можно отметить, что оценка прочности мембран с насечками производится в предположении о схеме двухосного растяжения вдоль образующей мембраны, что справедливо только для плоской мембраны при обеспечении соответствующей геометрии заделки [4 – 6, 8, 9].

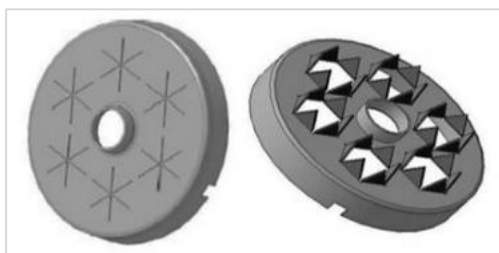


а)

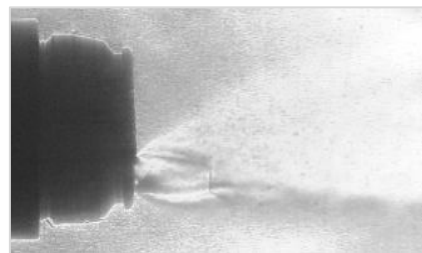


б)

Рис. 2. а) Гранатомет «Балкан», б) Выстрел 7П39



а)



б)

Рис. 3. а) Эскиз общего вида крышки до и после срабатывания, б) исследование влияния качества детали на исходящий поток газа

Производитель мембран на сегодняшний день сталкивается со следующими проблемами:

1. Существующие методики не позволяют оценить достоверно давление срабатывания мембран.

2. Производство вынуждено проводить многочисленные испытания (до 100% партии)

3. Контроль мембран на всех этапах их изготовления состоит в разрушающих методах.

Предлагаемое Решение / Задачи:

1. Разработка методики прогнозирования давления срабатывания мембран с учетом технологии ее изготовления.

2. Разработка методики неразрушающего контроля (и аппаратной базы) на окончательном и промежуточном этапе изготовления мембран методом акустической эмиссии АЭ.

Учет технологического фактора является комплексной проблемой и предполагает следующие шаги:

1) Определить влияние технологии изготовления концентраторов напряжений на состояние материала и его механические характеристики в области;

2) Определить влияние технологии изготовления на геометрические параметры (профиль) концентраторов напряжений;

3) Оценить параметры напряженно-деформированного состояния материала в области концентратора напряжений в процессе деформирования и разрушения.

На сегодняшний день коллективом кафедры Е-4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» проведены следующие работы:

1. *Исследование влияния технологии изготовления насечек на геометрические параметры (профиль) концентраторов напряжений срабатывание мембран*

Для нанесения насечек возможно применение нескольких способов: чеканка, фрезерование и лазерная резка. Исследование влияния технологии изготовления насечек на их форму показало, что:

- При изготовлении насечек чеканкой острие пуансона притупляется, что приводит к появлению радиусного участка в вершине концентратора (рис. 4а);
- При изготовлении насечки методом фрезерования острие фрезы также притупляется, форма концентратора близка к трапеции (рис. 4б);
- При изготовлении насечки методом лазерной резки форма концентратора напряжений соответствует чертежу и представляет треугольник (рис.4в).

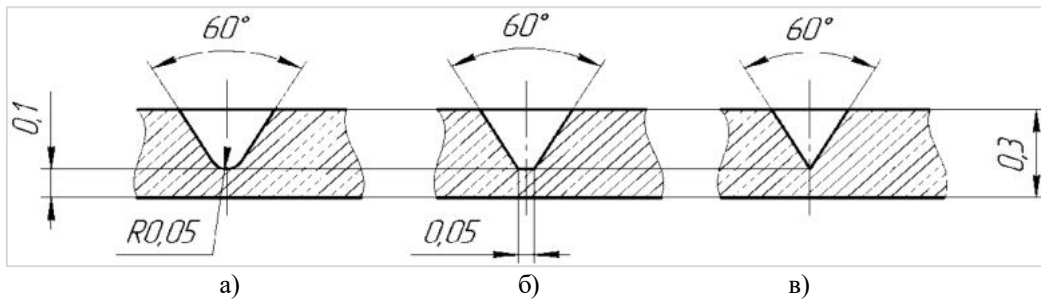


Рис. 4. Эскизы поперечных сечений вариантов насечек:
а) радиусная, б) трапецевидная, в) треугольная

Для оценки влияния технологии изготовления насечек на срабатывание мембран были изготовлены опытные партии деталей (рис. 5).

2. *Исследование напряженно-деформированного состояния плоских мембран под действием внутреннего давления*

Были изготовлены мембраны из алюминия диаметром $D = 40$ мм и толщиной $s = 0,3$ мм. На них нанесена сетка типографическим способом, с размерами 1×1 мм (рис. 6).

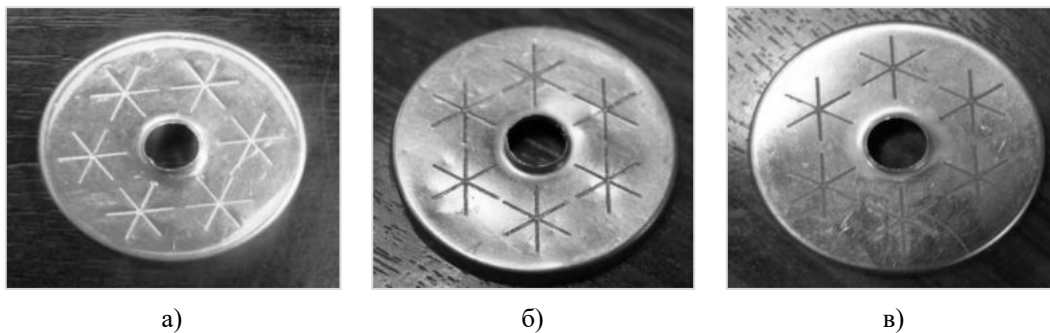


Рис. 5. Эскизы поперечных сечений вариантов насечек:
а) радиусная, б) трапецевидная и в) треугольная



Рис. 6. Мембрана с нанесенной сеткой и ее изображение в микроскопе:
 z_0, θ_0 – размеры ячеек в осевом и тангенциальном направлениях

По результатам совместного экспериментального исследования (рис. 7) и компьютерного моделирования отмечено:

а) Разрушение плоских мембран происходит, как правило, в области заделки, а не в центральной части;

б) Метод делительных сеток не позволяет оценить с достаточной точностью параметры напряженно-деформированного состояния в виду малых деформаций мембраны и погрешностей самого экспериментального метода;

в) Методом компьютерного моделирования были получены параметры напряженного и деформированного состояния. В центральной части мембрана подвергается двусосному растяжению. Критерий разрушения Смирнов-Аляева ω_i [10] достигает критического значения на давлении 2,1 МПа, что согласуется с полученными экспериментальными данными.

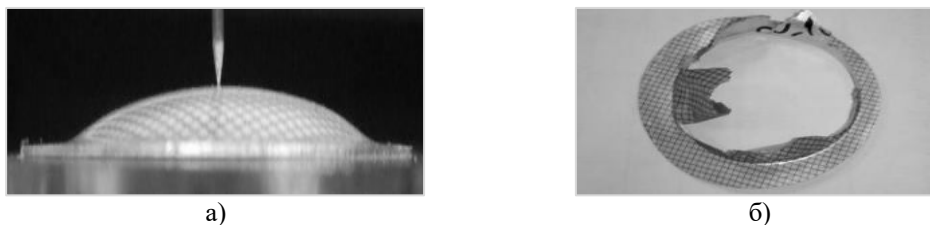


Рис. 7. Плоская мембрана: а) момент перед разрушением, б) разрушение

3. Исследование влияния конструктивных параметров концентраторов напряжений на давление срабатывания мембран методом компьютерного моделирования

Проведено компьютерное моделирование процесса деформирования и разрушения мембран с различным конструктивом профиля концентратора. 3D модели мембран до и после разрушения показаны на рис. 8.

Значения давления срабатывания мембран в зависимости от формы насечки представлены в таблице 1.

Таблица 1
 Значения давления срабатывания мембран в зависимости от формы насечки

Вид концентратора	Радиусный	Трапецевидный	Треугольный
$P_{сраб.}$ МПа	2,92	2,33	2,53

Разброс характеристики давления срабатывания составляет примерно 20...25 % от средней величины.

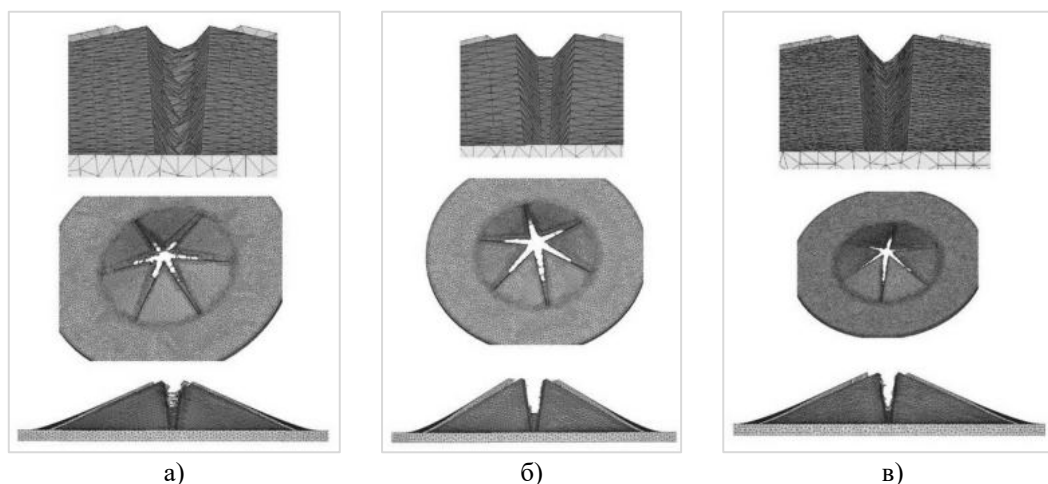


Рис. 8. 3D модели мембран до и после разрушения с:
а) радиусной, б) трапециевидной, в) треугольной насечкой

Одним из основных выводов работы является следующий.

В независимости от вида концентратора напряжений, на контактной (плоской) поверхности мембрана подвергается двухосному растяжению, а на свободной поверхности реализуется схема трехосного растяжения, что существенно снижает предельную до разрушения пластичность материала и понижает показатель давления срабатывания изделия, что необходимо учитывать в методиках оценки функционирования мембран.

Сотрудники кафедры продолжают развивать направление технологического и методического обеспечения производства мембран ответственного назначения. Активно проводятся теоретические и экспериментальные исследования, расширяется применения различных материалов и типов мембран.

Библиографический список

1. Patent Aircraft fuel tank arrangement US2015/022948 A1, (GB) Appl. No. 14/194,596 Feb 28 2014, May 7, 2015
2. <https://aviationweek.com/blog/faa-787-batteries-ok-fly-burst-discs-dozens-flights>. Дата обращения 10.09.19.
3. Patent Overpressure protection for an aircraft fuel tank system, US2008/0295905 A1, (GB) Appl. No. 12/116,299 May 7 2008, Dec. 4, 2008.
4. *Ольховский Н. Е.* Предохранительные мембраны. М.: Химия, 1976. 149 с.
5. *Водяник В. И.* Взрывозащита технологического оборудования. М.: Химия, 1991. 253 с.
6. *Смирнов-Аляев Г. А., Чикидовский В. П.* Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1972. 360 с.
7. *Смирнов-Аляев Г. А.* Механические основы пластической обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1968. 271 с.
8. *Работнов Ю. Н.* Сопротивление материалов. М.: Физматлит, 1962. 456 с.
9. *Феодосьев В. И.* Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 592 с.
10. *Лясников А. В., Агеев Н. П., Кузнецов Д. П. и др.,* Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением. СПб: БГТУ «Военмех», 1995. 526 с.

УДК 621.9

**МЕХАНИЧЕСКИЕ БУНКЕРНЫЕ ЗАГРУЗОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПАТРОНОВ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ
С НЕЯВНОЙ АСИММЕТРИЕЙ**

Е. В. Пантюхина, В. В. Прейс

Тульский государственный университет

Одной из проблем при создании автоматизированных технологических систем в производстве патронов для стрелкового оружия на базе современных прессов-автоматов и автоматических роторных линий является автоматическая загрузка элементов патронов стрелкового оружия (исходных штучных заготовок, полуфабрикатов гильз, пуль, собранных патронов и т.п.) на соответствующих технологических переходах. Основным функциональным устройством системы автоматической загрузки, осуществляющим захват единичного элемента из общей массы, приведение его в ориентированное положение и выдачу в таком положении в приемник накопителя, являются механические бункерные загрузочные устройства (БЗУ), которые во многом определяют производительность и надежность всей технологической системы.

В течение всего XX века элементы патронов стрелкового оружия не претерпевали существенных изменений в форме и размерах, количество их типоразмеров было ограничено, а их производство носило массовый характер. Практически все элементы производимых патронов стрелкового оружия, являясь представителями класса объемных осесимметричных деталей формы тел вращения, имели явно выраженные, так называемые «ключи ориентации», такие как, смещение центра масс вдоль продольной оси симметрии или продольная асимметрия внешней или внутренней формы. Для автоматической загрузки таких элементов применяли и применяют до настоящего времени механические дисковые БЗУ, принцип действия которых основан на использовании указанных ключей ориентации. Наибольшее распространение получили конструкции механических дисковых БЗУ с наклонными или вертикальными вращающимися дисками, оснащенными захватывающими органами в виде радиально или тангенциально расположенных профильных карманов, гнезд и т.п.

В последние десятилетия активно развивается разработка новых видов стрелкового оружия специального назначения и соответствующих ему различных специальных патронов не массового выпуска. Это привело к появлению элементов патронов с неявно выраженными ключами ориентации, а в некоторых случаях – элементов с поперечной асимметрией. Вследствие этого эффективность применения традиционных конструкций механических дисковых БЗУ резко упала из-за снижения их производительности и надежности. Во многих случаях предприятия были вынуждены перейти с автоматической загрузки элементов патронов на ручную подачу, при которой обеспечивается производительность загрузки лишь до 30 – 50 шт./мин.

Резкое снижение производительности и надежности традиционных механических дисковых БЗУ обусловлено тем, что в их конструкциях функции захвата и ориентирования элементов патронов были совмещены, так как захватывающий орган БЗУ является одновременно и ориентирующим. Поэтому для надежного ориентирования элементов с неявной асимметрией необходимо было значительно уменьшать величину зазора между поверхностью захватываемого элемента и направляющей поверхностью захватывающего органа (кармана, гнезда и т.п.). Это, в свою очередь, приводило к значительному снижению вероятности захвата элемента движущимся захватывающим органом и, тем самым, снижению производительности и надежности БЗУ.

С целью повышения производительности и надежности традиционных механических дисковых БЗУ с наклонным вращающимся диском при загрузке элементов патронов стрелкового оружия с неявно выраженной асимметрией центра масс или внешней формы была предложена идея разделения функций захвата и ориентирования элементов путем введения в кон-

струкции БЗУ группового кольцевого ориентатора, реализующего способы пассивного ориентирования элементов патронов.

На рис. 1 представлены схемы вариантов реализации предложенной идеи в конструкции механического дискового БЗУ с наклонным вращающимся диском и радиальными карманами.

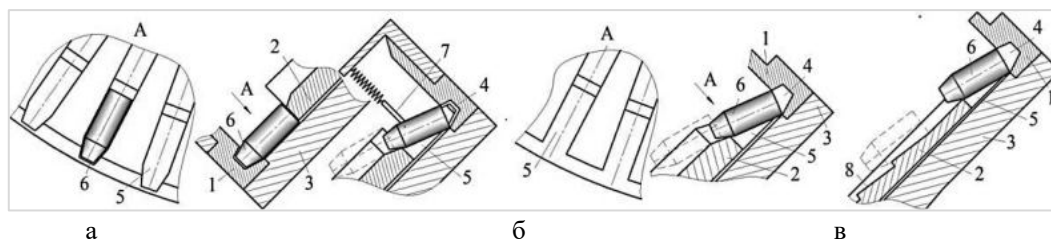


Рис. 1. Усовершенствованные конструкции бункерных загрузочных устройств с кольцевым ориентатором и радиальными профильными гнездами (а), прямоугольными гнездами (б, в) и гребенкой (в):

1 – кольцевой ориентатор, 2 – вращающийся диск; 3 – неподвижное основание;
4 – паз кольцевого ориентатора; 5 – радиальное гнездо; 6 – деталь; 7 – плужок; 8 – гребенка

Впервые идея разделения функций захвата и ориентирования была заложена в конструкции БЗУ с радиальными профильными гнездами и кольцевым ориентатором [Пат. 64977 РФ]. Захват деталей, движущихся к гнезду в требуемом для захвата положении – коническим торцом, обеспечивается объемным захватывающим органом, образованным профильным гнездом и сопряженным с ним кольцевым ориентатором, паз которого повторяет конический торец детали. Надежное пассивное ориентирование обусловлено минимальной величиной зазора в профильном гнезде и невозможностью полного западания в паз кольцевого ориентатора деталей, движущихся к гнезду цилиндрическим торцом. Для более коротких и тяжелых деталей в конструкции модернизированного БЗУ был предусмотрен плужок, обеспечивающий принудительное выпадение частично запавших деталей из гнезда (рис. 1, а).

При испытаниях и экспериментальных исследованиях модернизированной конструкции было выявлено, что при загрузке тяжелых деталей с высоким коэффициентом трения наблюдался износ паза кольцевого ориентатора, а наличие в БЗУ сопряженного с вращающимся диском кольцевого ориентатора делает невозможным процесс сборки-разборки устройства. Кроме этого профильность сквозного гнезда, усложняющая конструкцию модернизированного БЗУ, не влияет на захват неправильно сориентированных деталей, так как надежное ориентирование обеспечивается непосредственно самим кольцевым ориентатором.

Для устранения указанных недостатков была предложена конструкция БЗУ с радиальными прямоугольными гнездами [Пат. 164711 РФ]. Гнезда выполнены открытыми в сторону кольцевого ориентатора, что значительно снижает трудоемкость изготовления вращающегося диска с радиальными гнездами и упрощает установку кольцевого ориентатора (рис. 1, б). Величина зазора по шагу в такой конструкции ограничена только отсутствием возможностей западания в гнездо второй детали, что позволяет значительно повысить вероятность захвата и, тем самым, производительность устройства.

В модернизированных устройствах (см. рис. 1, а, б) радиальные пазы на всем своем протяжении имеют постоянную глубину, равную половине диаметра детали. Из-за высокой глубины радиального паза неправильно ориентированные детали, двигаясь в процессе пассивного ориентирования к центру диска, не удаляются из радиального паза в верхней части бункера, а при дальнейшем вращении диска снова движутся к гнезду и частично западают в них, препятствуя западанию в гнездо деталей в требуемом положении. Это значительно снижает вероятность захвата таких деталей, производительность устройства падает [1, 2].

С целью устранения указанных недостатков предложено модернизированное БЗУ [подана заявка на изобретение]. Радиальные пазы, выполненные в виде гребенки с чередующимися выступами и впадинами, равномерно уменьшаются до нулевой величины. Конструкция гребенки затрудняет западание в сквозные гнезда неправильно сориентированных заготовок и обеспечивает их надежное удаление не только из сквозных гнезд, но и из радиальных пазов (рис. 1, в).

Усовершенствованные БЗУ с радиальными гнездами и кольцевым ориентатором (см. рис. 1) предназначены для полых или сплошных деталей с коническим торцом и ступенчатых цилиндрических деталей. Кроме отсутствия смещения центра масс такие детали отличаются от деталей с явной асимметрией углом 2β при вершине асимметричного торца, равным менее 30° , отношением диаметров торцов d_1 и d_2 от 0,6 до 0,9 и отношением длины l и большего диаметра d_1 в диапазоне $3 \leq l/d_1 \leq 5$.

Идея применения кольцевого ориентатора для повышения надежности и производительности при загрузке деталей с неявной асимметрией с отношением $2 \leq l/d_1 \leq 3$ нашла продолжение в известной конструкции зубчатого БЗУ, ранее широко применяемого для длинных стержневых деталей с явным смещением центра масс.

Модernизированное БЗУ с групповым кольцевым ориентатором [Пат. 100942 РФ] устроено следующим образом (рис. 2, а). Если деталь движется к гнезду асимметричным торцом вперед, то она погружается в него полностью, так как поперечное сечение паза кольцевого ориентатора соответствует профилю ее асимметричного торца. В противном случае деталь опирается на верхний край паза кольцевого ориентатора и западает в гнездо не полностью. При дальнейшем вращении диска деталь в верхней части бункера под действием силы тяжести выпадает обратно в бункер [3].

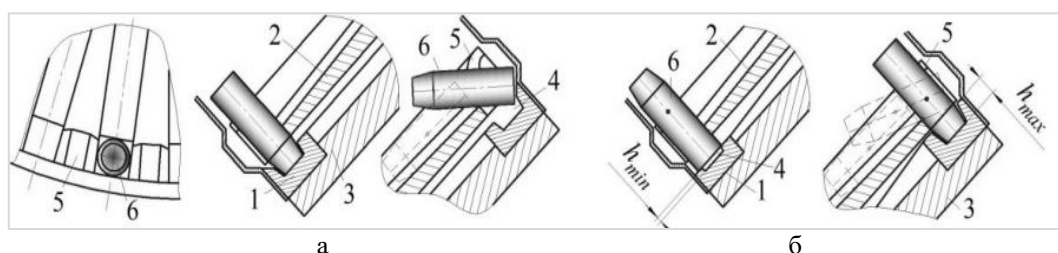


Рис. 2. Усовершенствованные конструкции зубчатых бункерных загрузочных устройств с кольцевым ориентатором, у которого глубина паза постоянна (а) или переменна (б):

1 – кольцевой ориентатор, 2 – вращающийся диск; 3 – неподвижное основание;
4 – паз кольцевого ориентатора; 5 – зубья диска; 6 – деталь

Для повышения надежности рассмотренного БЗУ при пассивном ориентировании деталей с высоким коэффициентом трения и соотношением длины и большего диаметра равным 2, было предложено установить в верхней части бункера копир [Пат. 106577 РФ]. Копир, имея форму сегмента окружности с торцевым криволинейным профилем, угол подъема которого совпадает с направлением вращения диска с гнездами и зубьями, подхватывает детали, запавшие в гнездо цилиндрическим торцом, и способствует их надежному удалению из гнезда.

В процессе испытаний опытных образцов усовершенствованных конструкций дисковых зубчатых БЗУ был выявлен их общий недостаток, а именно, повышенный износ кольцевого ориентатора, обусловленный трением асимметричных торцов деталей о внутреннюю поверхность паза практически по всей окружности кольцевого ориентатора и, как следствие, снижение надежности работы БЗУ. С целью устранения указанного недостатка было предложено в конструкциях дисковых зубчатых БЗУ плавно изменять сечение паза кольцевого ориентатора

по направлению вращения диска [Пат. 159403 РФ]. При этом в нижней части бункера глубина паза минимальна h_{\min} и не превышает одной четверти высоты асимметричного торца детали, а в верхней части бункера высота h_{\max} не превышает всей высоты асимметричного торца детали (рис. 2, б).

Обязательным условием работоспособности и надежной работы модернизированных зубчатых БЗУ является наличие у деталей асимметрии внешней формы. Они могут применяться для сплошных или полых ступенчатых цилиндрических деталей и деталей с коническим или сферическим торцом, радиус которого составляет не более половины диаметра детали.

Для загрузки аналогичных деталей с коническим торцом, в том числе легких, типа сердечника, без смещения центра масс, у которых $1,5 \leq l/d_1 \leq 3$ и отношение длины конического торца ко всей длине детали находится в диапазоне $0,25 \leq h/l \leq 0,3$, предложено альтернативное решение – усовершенствованная конструкция БЗУ с тангенциальными гнездами [Пат. 158620 РФ]. Под вращающимся диском в верхней части бункера установлена гребенка с чередующимися выступами. При вращении диска детали, запавшие в гнезда в правильном положении (асимметричным торцом), опираются на соответствующий профилю ее торца наклон и в верхней части бункера, проходя через гребенку, не западают в ее впадины, оставаясь в гнезде [4]. Неориентированные детали, наоборот, проходя через гребенку, цилиндрическим торцом западают во впадины и, скользя коническим торцом по фаске, под действием силы тяжести сбрасываются обратно в бункер (рис. 3).

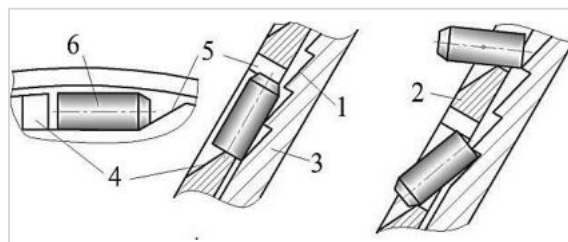


Рис. 3. Усовершенствованная конструкция бункерного загрузочного устройства с тангенциальными гнездами:

1 – гребенка; 2 – вращающийся диск; 3 – неподвижное основание; 4 – фаска; 5 – наклон; 6 – деталь

Для полых или сплошных плоских и близких к равноразмерным деталей с коническим торцом или ступенчатых цилиндрических заготовок с неявно выраженной асимметрией предложено модернизированное вертикальное БЗУ [Пат. 170000 РФ]. Идея модернизации конструкции была обусловлена недостатками традиционного БЗУ, выявленными при загрузке деталей с явной асимметрией (заклинивание деталей с высоким коэффициентом трения в профильных карманах вращающегося диска и не универсальность конструкции, поскольку для деталей одного размерного ряда, но различной конфигурации, требовалось изготовление нового вращающегося диска с оригинальными профильными карманами), которые еще более усугубляются при загрузке деталей с неявно выраженной асимметрией.

При вращении диска детали движутся в сторону профильных карманов, образованных вращающимися роликами. Если деталь движется асимметричным (коническим) торцом, то он западает в профильный карман полностью. В противном случае частично запавшие цилиндрическим торцом детали опираются на поверхность профильных роликов и при дальнейшем вращении диска выпадают из карманов под действием силы тяжести обратно в бункер (рис. 4).

Устройство обеспечивает автоматическую загрузку деталей с отношениями диаметров торцов $0,6 \leq d_2/d_1 \leq 0,9$, высот торцов $0,5 \leq h_2/h_1 \leq 0,6$, высоты и большего диаметра

$0,6 \leq h/d_1 \leq 1$ и значительно расширяет область применения традиционной конструкции, способной обеспечивать только автоматическую загрузку полых деталей в форме колпачка, высота которых больше наружного диаметра на 10-20 %.

Усовершенствованные конструкции были изначально разработаны для деталей с неявной асимметрией, но могут быть использованы и для элементов патронов стрелкового оружия с явно выраженными ключами ориентации.

Для оценки фактической производительности модернизированных БЗУ был предложен комплексный подход, позволяющий учесть вероятность захвата единичной детали из общей массы, геометрические и физико-механические параметры загружаемых элементов, а также конструктивные и кинематические параметры БЗУ.

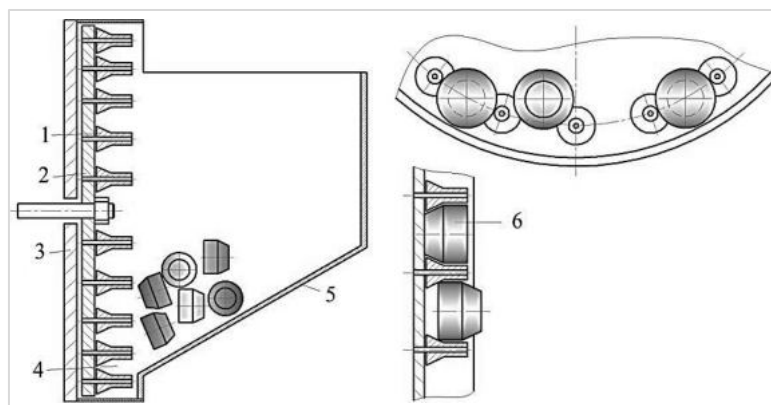


Рис. 4. Усовершенствованная конструкция вертикального бункерного загрузочного устройства с роликами: 1 – ролики; 2 – вращающийся диск; 3 – неподвижное основание; 4 – карман; 5 – бункер; 6 – деталь

Впервые комплексный подход был апробирован на модернизированном БЗУ с радиальными гнездами и кольцевым ориентатором. Математическая модель, описывающая фактическую производительность, строилась на основе теоретических положений, изложенных в работах [2, 5].

Фактическая производительность $\Pi_{\text{БЗУ}}$ [шт./мин] БЗУ с вращающимися захватывающими органами определяется по известному выражению

$$\Pi_{\text{БЗУ}} = 60 \frac{v}{t} \eta, \quad (1)$$

где v , t – соответственно окружная скорость [м/с] и шаг захватывающих органов [м], определяемые по центру захватывающих органов БЗУ; η – коэффициент выдачи, характеризующий вероятность захвата деталей захватывающими органами БЗУ.

Для расчета коэффициента выдачи БЗУ использовали известное эмпирическое выражение, предложенное В.Ф. Прейсом [6]

$$\eta = \eta_{\text{max}} (1 - \varepsilon v_0^4), \quad (2)$$

в котором η_{max} – максимальная величина коэффициента выдачи БЗУ, соответствующая окружным скоростям захватывающих органов близким к нулю; ε – некоторый эмпирический коэффициент.

Выражение для максимальной величины коэффициента выдачи η_{max} искали в виде произведения двух «условных» вероятностей по методике, предложенной М.В. Медвидем [7]

$$\eta_{\max} = p_i p_c \quad (3)$$

где p_i – вероятность нахождения детали на пути захватывающего органа в требуемом ориентированном положении; p_c – вероятность того, что захвату деталей захватывающим органом не помешает взаимная сцепляемость деталей.

Коэффициент ε определили исходя из того, что при некотором предельном значении окружной скорости $v_{\text{пред.}}$ захватывающих органов производительность БЗУ падает до нуля. Тогда из выражения (1) следует, что коэффициент выдачи η тоже должен быть равен нулю. Полагая $\eta = 0$ в формуле (2), получим выражение

$$\varepsilon = v_{\text{пред.}}^{-4}, \quad (4)$$

в котором предельное значение окружной скорости $v_{\text{пред.}}$ захватывающих органов определяем с помощью физической модели процесса захвата детали гнездами БЗУ.

После подтверждения корректности и адекватности предложенного подхода был применен при моделировании фактической производительности БЗУ с радиальными профильными гнездами [8], зубчатого БЗУ с кольцевым ориентатором [9-14], БЗУ с тангенциальными карманами [15] и вертикальных БЗУ [16, 17]. Значения параметров, входящих в выражения (1) – (4) определяются индивидуально для каждой конструкции БЗУ. Построенные путем компьютерного моделирования графические зависимости фактической производительности БЗУ от скорости движения захватывающих органов при различных параметрах деталей и устройств определяют оптимальные условия захвата деталей с неявной асимметрией движущимися гнездами (карманами) БЗУ.

Для верификации разработанных математических моделей производительности БЗУ были проведены экспериментальные исследования на специально разработанных макетах усовершенствованных конструкций БЗУ, которые подтвердили теоретические выводы о работоспособности конструкций и адекватности и корректности построенных математических моделей производительности.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований усовершенствованных конструкций механических дисковых БЗУ используются на ведущих предприятиях г. Тулы, производящих патроны для стрелкового оружия, а также легли в основу учебных пособий [18, 19], которые используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 15.03.01 – Машиностроение, 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств, 15.03.02 – Технологические машины и оборудование.

Работа по созданию новых конструкций механических БЗУ, повышению их надежности и производительности при загрузке деталей с неявной асимметрией продолжается.

Библиографический список

1. Давыдова Е. В., Прейс В. В. Бункерное загрузочное устройство для предметов обработки с неявно выраженной асимметрией торцов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. № 9. С. 57 – 65.
2. Давыдова Е. В., Прейс В. В. Автоматическая загрузка стержневых предметов обработки с неявно выраженной асимметрией по торцам. Тула. Изд-во ТулГУ. 2009. 112 с.
3. Голубенко В. В., Давыдова Е. В., Прейс В. В. Совершенствование зубчатого бункерного загрузочного устройства для предметов обработки с неявно выраженной асимметрией торцов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. Вып. 2-1. С. 27 – 34.

4. *Пантюхина Е. В., Прейс В. В., Хачатурян А. В.* Механические дисковые бункерные загрузочные устройства для стержневых деталей с неявно выраженными ключами ориентации // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. 2018. № 3 (3). С. 16 – 25.
5. *Давыдова Е. В., Прейс В. В.* Аналитическая модель производительности бункерного загрузочного устройства с радиальными гнездами и кольцевым ориентатором // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 11. С. 23 – 30.
6. Автоматизация загрузки прессов штучными заготовками / В. Ф. Прейс [и др.]; под ред. В. Ф. Прейса. М.: Машиностроение, 1975. 280 с.
7. *Медвидь М. В.* Автоматические ориентирующие загрузочные устройства. М.: МАШГИЗ, 1963. 299 с.
8. *Бурцев Д. В., Давыдова Е. В., Прейс В. В.* Математическая модель производительности дискового бункерного загрузочного устройства с радиальными профильными гнездами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. №9. С. 33 – 36.
9. *Голубенко В. В., Давыдова Е. В., Прейс В. В.* Аналитическая модель производительности дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 6. Ч. 2. С. 104 – 113.
10. *Пантюхина Е. В., Дружинина А. В., Прейс В. В.* Математическая модель и оценка производительности механического зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором // В сб.: Машиностроение и техносфера XXI века (материалы XXI международной научно-технической конференции). 2014. С. 62 – 65.
11. *Давыдова Е. В., Дружинина А. В., Прейс В. В.* Математическая модель производительности механического дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с параметрическими отказами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 10. С. 11 – 15.
12. *Пантюхина Е. В., Прейс В. В., Хачатурян А. В.* Оценка производительности механического зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором для деталей, асимметричных по торцам // Проблемы машиноведения (материалы III Международной науднотехнической конференции): в 2 ч. Омск: ОГТУ. 2019. С. 233 – 239.
13. *E V Pantyukhina, V V Preis and A V Khachaturian.* Feed rate evaluation of mechanical toothed hopper-feeding device with ring orientator for parts, asymmetric at the ends// Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260. pp 032032. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032032.
14. *Хачатурян А. В., Пантюхина Е. В., Прейс В. В.* Математическая модель фактической производительности зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором для пустотелых деталей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 7. С. 98 – 110.
15. *Давыдова Е. В., Прейс В. В., Провоторова К. Н.* Математическая модель производительности дискового бункерного загрузочного устройства с тангенциальными профильными гнездами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. №10. С. 7 – 10.
16. *Давыдова Е. В., Прейс В. В.* Аналитическая модель и методика расчета производительности вертикального бункерного загрузочного устройства // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. №9. С. 27 – 31.
17. *Давыдова Е. В., Прейс В. В., Чурочкин А. В.* Математическая модель производительности вертикального бункерного загрузочного устройства для плоских асимметричных предметов обработки // Прогресивні технології і системи машинобудування. 2016. № 3 (54). С. 36 – 40.
18. *Прейс В. В., Усенко Н. А., Давыдова Е. В.* Автоматические загрузочно-ориентирующие устройства. Ч. 1. Механические бункерные загрузочные устройства: учеб. пособие для вузов; под ред. В. В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. 125 с.
19. Системы автоматической загрузки штучных предметов обработки в технологические машины-автоматы / Н. А. Усенко, В. В. Прейс, Е. В. Давыдова, Е. С. Бочарова; под ред. проф. В. В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 310 с.

**РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА ВЫТЯЖКИ
С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛИ
«ЭКРАН» ИЗ НИОБИЯ НБПЛ-1**

З. Н. Расулов

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Применение ниобия более ограничено, чем молибдена, тем не менее он также находит себе применение как конструкционный материал. Пластичность листового ниобия можно повысить проведением рекристаллизационного отжига при температурах 1200 – 1250°С. Однако прочность падает при этом на 30 – 40%. Природа перехода из вязкого состояния в хрупкое без каких-либо видимых структурных изменений в настоящий момент требует дополнительных исследований [1 – 5].

Перечисленные особенности ниобия, несмотря на его высокую пластичность приводят к ряду технологических проблем при реализации технологии холодной штамповки в производстве полых осесимметрических деталей: значительная доля брака (до 80%); нецелесообразность проведения межоперационного отжига, ввиду значительного изменения свойств металла в процессе технологии; высокая адгезия с инструментом и как следствие быстрый износ; невозможность оперативного контроля исходного материала и полуфабрикатов в процессе последовательных операций холодной штамповки. Перечисленные проблемы приводят к снижению производительности труда и повышению себестоимости изготовления изделий (рис. 1).

Пластическая деформация возникает в результате движения дислокаций. Атомы примесей, имеющихся в металле, блокируют дислокации, образуя «облака Коттрелла». При приложении нагрузки движение дислокаций задерживается у границ зерен, точечных дефектов и других препятствий, пока напряжения от внешней нагрузки не станут достаточными для возникновения пластической деформации или для зарождения трещины. В первом случае происходит пластическое течение, во втором, когда скорость распространения микротрещины превышает скорость пластической деформации, наступает хрупкое разрушение [5]. На температуру перехода влияет много факторов, важнейшими из которых являются химический состав, структура материала, скорость деформации, вид напряженно-деформированного состояния. Однако приводимые в литературе рекомендации по листовой штамповке молибдена с подогревом не содержат, как правило, каких-либо указаний по составу исследуемого материала, по его структуре и т. д. В практике разработки технологических процессов подогрев не всегда повышает штампуемость. Классический подход в решении поставленных задач связан с увеличением количества операций вытяжки, применением межоперационного вакуумного отжига, а также высокая точность изготовления инструмента и подготовка его поверхности. Все перечисленные инструменты не позволяют получить требуемый результат и повысить производительность, что приводит к значительным потерям. Решение поставленных задач при холодной штамповке ниобия возможны при контроле качества исходного материала, построения моделей прогнозирования механических свойств в процессе холодной штамповки и наличия инструмента, позволяющего проводить структурные и субструктурные изменения в полуфабрикатах.

В рамках работы по совершенствованию технологических процессов изготовления изделий ПАО «Светлана» исследовали ниобий НБ-ПЛ1. Результаты спектрального анализа образцов представлены в таблице 1.

В рамках первого этапа работы исследовали эффективность применения модификации штамповочного инструмента фторорганической наноконпазицией и оценивали ее влияние на качество штампуемых деталей.

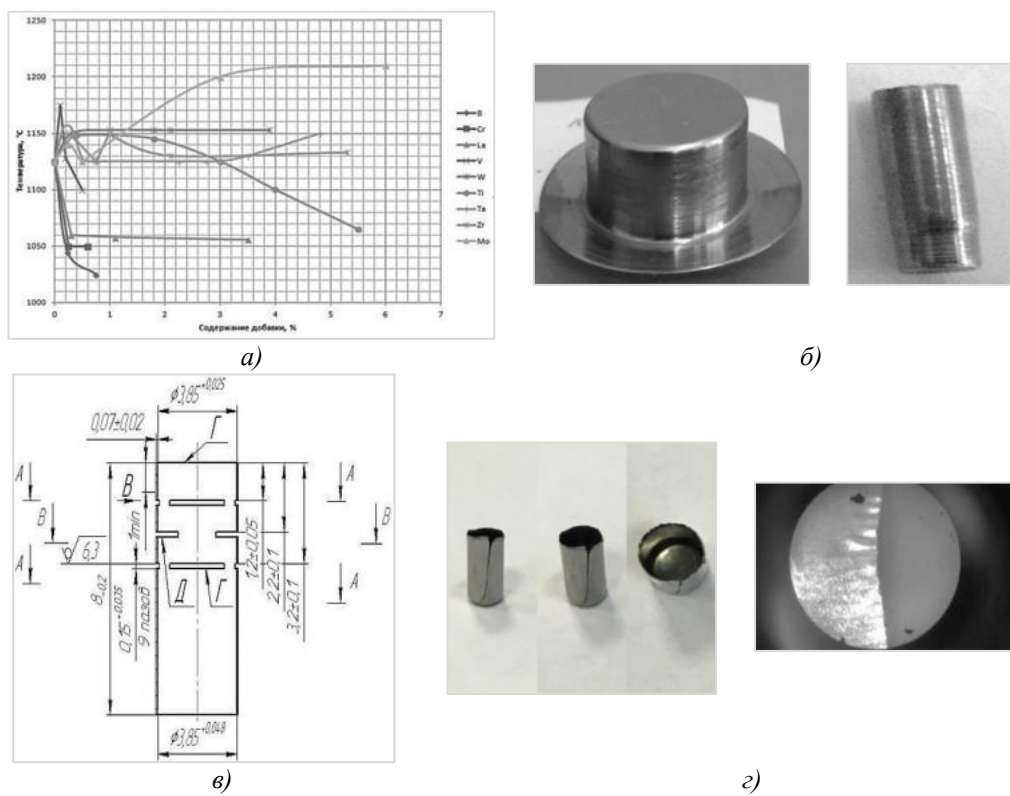


Рис. 1. Полуфабрикаты и эскиз экрана из ниобия
 а – изменение температуры отжига ниобия в зависимости от содержания примесей;
 б – полые осесимметричные детали из молибдена и ниобия;
 в – эскиз изделия «экран»; г – виды брака на операциях (гофры, трещины)

Таблица 1
 Химический состав исходного материала НБ-ПЛ1

№ и.о.	Химический состав								
	Nb, %	Ti, %	V, %	Fe, %	Mn, %	Co, %	W, %	Ni, %	Cu, %
1	98,81	0,28	0,23	0,22	0,13	0,07	0,06	0,05	0,02
2	98,68	0,31	0,29	0,25	0,10	0,07	0,06	0,05	0,04
3	98,67	0,43	0,22	0,22	0,15	0,06	0,05	0,04	0,02
4	98,60	0,41	0,25	0,24	0,15	0,07	0,06	0,05	0,02

Механика взаимодействия фторорганической композиции с поверхностью твердого тела выглядит следующим образом – после нанесения фтор-ПАВ на поверхности тела формируется слой ориентированных молекул, радикально меняющих энергетические характеристики поверхности. Молекулы, закрепляемые за счет сил хемосорбции (поглощение жидкостью или твердым телом веществ из окружающей среды), образуют «структуры Ленгмюра» (рис. 2а) в виде спирали с нормально-ориентированными осями к поверхности материала рабочего инструмента. Модифицировали рабочий инструмент вытяжки (свертки) изделий из ниобия и молибдена (рис. 2б). В существующей технологии изготовления на первой операции вытяжка

(свертка) наблюдается потеря устойчивости(образуется гофра (рис. 2г). Применение отжига кружка перед операцией вытяжка не приводит к повышению качества штампуемых полуфабрикатов, полирование инструмента вытяжки (пуансон, матрица) позволяет повысить качество полуфабрикатов, но на короткий период, после работы штампа в течение 2 – 3 часов наблюдается снижение качества полуфабрикатов вследствие адгезии с инструментом.

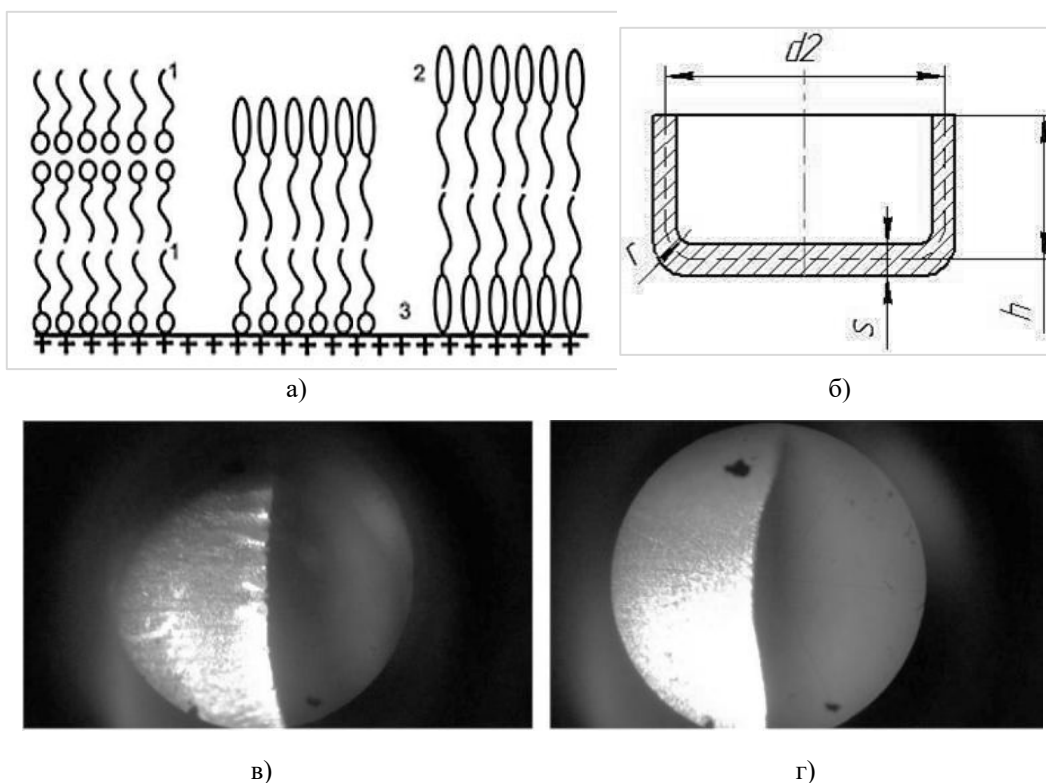


Рис. 2. Модификация штампового инструмента фторорганической наноконпазией: а-структуры Ленгмюра, б-полуфабрикат вытяжки(свертки),в-кромка полуфабриката после свертки модификации инструмента, г- кромка полуфабриката после свертки с модификацией инструмента

Поверхность пуансона и матрицы модифицировали фторорганической наноконпазией, в процессе исследования исходный материал ниобия и молибдена в состоянии поставки также покрывали активным смазочным покрытием (рис. 2). Модифицированные поверхности инструмента и полуфабрикатов оценивали способом оценки поверхностной энергии. Поверхностная энергия – прямое проявление межмолекулярных взаимодействий. Молекулы, находящиеся на поверхности жидкости или твердого тела, испытывают воздействие неуравновешенных молекулярных сил, вследствие чего получают дополнительную энергию по сравнению с молекулами, находящимися внутри жидкости или твердого тела.

Известно, что трибологические свойства узлов трения во многом определяются величиной их поверхностной энергии и соотношения ее дисперсионной и полярной составляющих обрабатываемого материала. Модифицирование уравнивает величины поверхностной энергии материалов. Этот факт может быть использован для назначения оптимального вида обработки композицией деталей из разных материалов, входящих в одну трибосистему. Модифицирование также увеличивает долю дисперсионного компонента. В жидкости поверхностная энергия проявляет себя как сила, стремящаяся уменьшить площадь поверхности до минимально воз-

можной величины. Поверхность твердого тела также обладает дополнительной свободной энергией. Но, поскольку подвижность молекул на поверхности твердого тела отсутствует, эта поверхностная энергия не может непосредственно наблюдаться в виде поверхностного натяжения, поэтому измерять поверхностную энергию твердых тел можно только с помощью косвенных методов. Краевой угол - это угол между рассчитанным контуром капли и поверхностью образца, проекция которой на изображении капли называется базовой линией.

В случае ультрагидрофобности материалов возникает, так называемый эффект лотоса - краевой угол достигает теоретического предела 180° . Работа, которую необходимо применить для увеличения поверхности, называется свободная энергия поверхности (СЭП). Так как энергия измеряется на единицу площади, единицы измерения СЭП мДж/м², что эквивалентно мН/м. Результаты измерения поверхностной энергии представлены на рис.3 и в таблице 2.

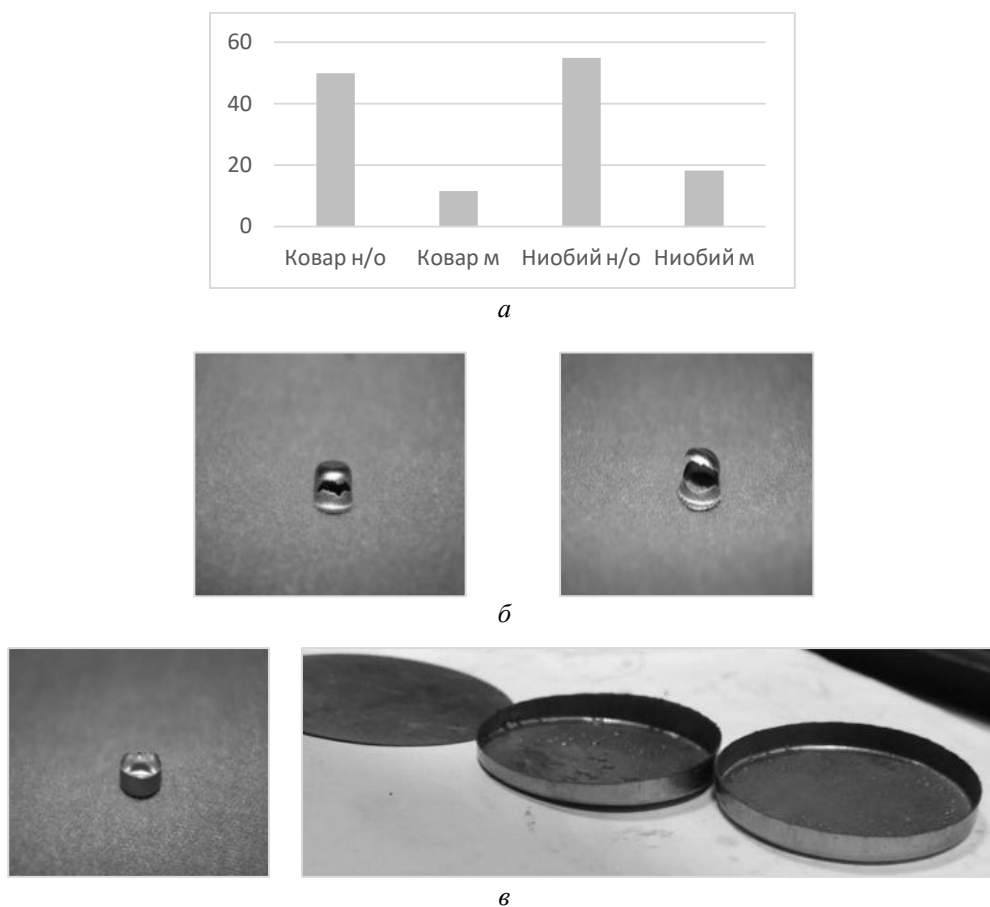


Рис. 3. Результаты модификации фторорганической нанокомпозицией:

а – свободная поверхностная энергия материалов до и после нанесения активного смазочного покрытия;
 б – детали до модификации инструмента; в – полуфабрикаты свертки ниобия и молибдена

Комплекс физико-механических свойств тугоплавких материалов в технологии их изготовления оказывает влияние на формирование остаточных напряжений в процессе штамповки. По классификации Давиденкова остаточные напряжения подразделяют на 3 рода:

- 1 – действующие в объеме всего тела (макроскопические),
- 2 – действующие в объеме сравнимом с размером зерна (микроскопические),
- 3 – действующие в размерах, сравнимых с размером атомно-кристаллической решетки.

Таблица 2

Результаты измерения поверхностной энергии тугоплавких материалов до(н/о) и после (м) модификации

Материал	Краевой угол, град		Поверхностная энергия, мН/м
	Вода	Бромнафталин	
Ковар н/о	59,04	23,22	49,9
Ковар м	117,89	88,84	11,44
Ниобий н/о	50,75	19,08	54,97
Ниобий м	107,85	73,62	18,12

Проведенные эксперименты и анализ литературы позволил сделать вывод о том, что при холодной штамповке деталей из тугоплавких материалов формируются не только остаточные напряжения 2-го рода, но и 3-го рода преимущественно на поверхности, контактируемой с инструментом, которые и оказывают значительное влияние на качество штампуемых деталей. Механизм действия активного смазочного покрытия заключается в параллельно протекающих процессах химической очистки поверхности металлов или сплавов от продуктов коррозии и восстановления и упрочнении поверхности за счет окислительно-восстановительных, электрохимических и диффузионных процессов, протекающих при взаимодействии композиционных составов с металлической поверхностью [6, 7].

Применение модификации инструмента позволило полностью исключить операции межоперационного отжига, а также внедрить в технологию комбинированную вытяжку через 2 матрицы за счет снижения трения и адгезии с инструментом.

Библиографический список

1. *Погодин-Алексеев Г. И.* О хрупком и вязком состояниях металлов // *Металловедение и термическая обработка.* 1965. № 8,
2. Молибден. Пер. с англ. Сб. статей под ред. А. К. Натансона. М.: изд-во Иностран. лит-ры, 1959. 304 с.
3. Молибден. Пер. с англ. Сб. статей под ред. А. К. Натансона. М., изд-во Иностранной литературы, 1962. 394 с.
4. *Клытин Б. А.* Температурная зависимость механических свойств молибдена, ниобия и никеля // Сб. трудов ЦНИИчермет. 1965. Вып. 39.
5. *Богоявленский К. Н., Рус В. В.* Исследование механических свойств и деформируемости молибдена и ниобия // Сб. трудов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого. 1967. №282.
6. *Расулов З. Н., Ремшев Е. Ю., Затеруха Е. В., Лобов В. А.* Разработка модифицированного штамповочного инструмента в технологии изготовления изделий из ниобия и молибдена // В сб.: «ОНТК Восьмые Уткинские чтения». СПб: БГТУ «Военмех», 2019. С.136 – 141.
7. *Винник П. М., Винник Т. В., Олехвер А. И., Ремшев Е. Ю.* Расчет влияния упрочнения материала на напряжения и формируемые механические свойства при последовательных вытяжках с утонением стенки // *Металлообработка.* 2019. №2. С. 30 – 34.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ РЕБЕР СТАБИЛИЗАТОРОВ
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Е. Н. Сосенушкин, В. А. Кадымов, Е. А. Яновская, В. В. Оштук

Московский государственный технический университет «СТАНКИН»

Проведен теоретический анализ технологического процесса прямого выдавливания продольных ребер стабилизатора на наружной поверхности цилиндрической поковки, для чего разработан аналитический аппарат, позволяющий оценить силу выдавливания.

Актуальность темы. Развитие техники, в том числе и военной, требует проектирования и внедрения инновационных технологий [1, 2]. В условиях крупносерийного изготовления металлических элементов боеприпасов востребованными являются высокопроизводительные процессы обработки металлов давлением такие, как холодное [3, 4], полугорячее [5] и горячее выдавливание [6]. Силовые и деформационные параметры процессов выдавливания будут зависеть от выбранных схем пластического деформирования. Однако без теоретического анализа операций [7] или их компьютерного моделирования невозможно выбрать технологическое оборудование, провести прочностной расчет штампового инструмента и определить деформационные параметры. Поэтому развитие методов теории пластичности [8] остается актуальным для инженерных расчетов.

Технологические процессы штамповки стабилизаторов. Возможные варианты штамповки поковки стабилизатора приведены на рис. 1.

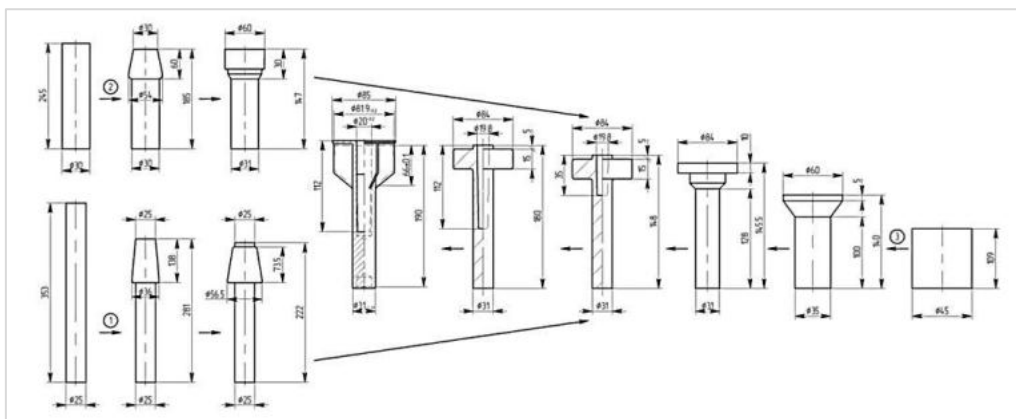


Рис. 1. Альтернативные варианты штамповки поволок стабилизатора

В статье ограничимся рассмотрением наиболее нагруженного перехода прямого выдавливания ребренной части поковки стабилизатора из стержневого полуфабриката с фланцем.

Теоретический анализ силовых параметров. Поскольку пластическая область расположена в сжимаемом фланце, то расчетная схема в плоскости xu представлена круговым сектором, ограниченным плоскостями ребер, как показано на рис. 2а. Осевое сечение поковки и расчетная схема в плоскости rz показаны на рис.2б.

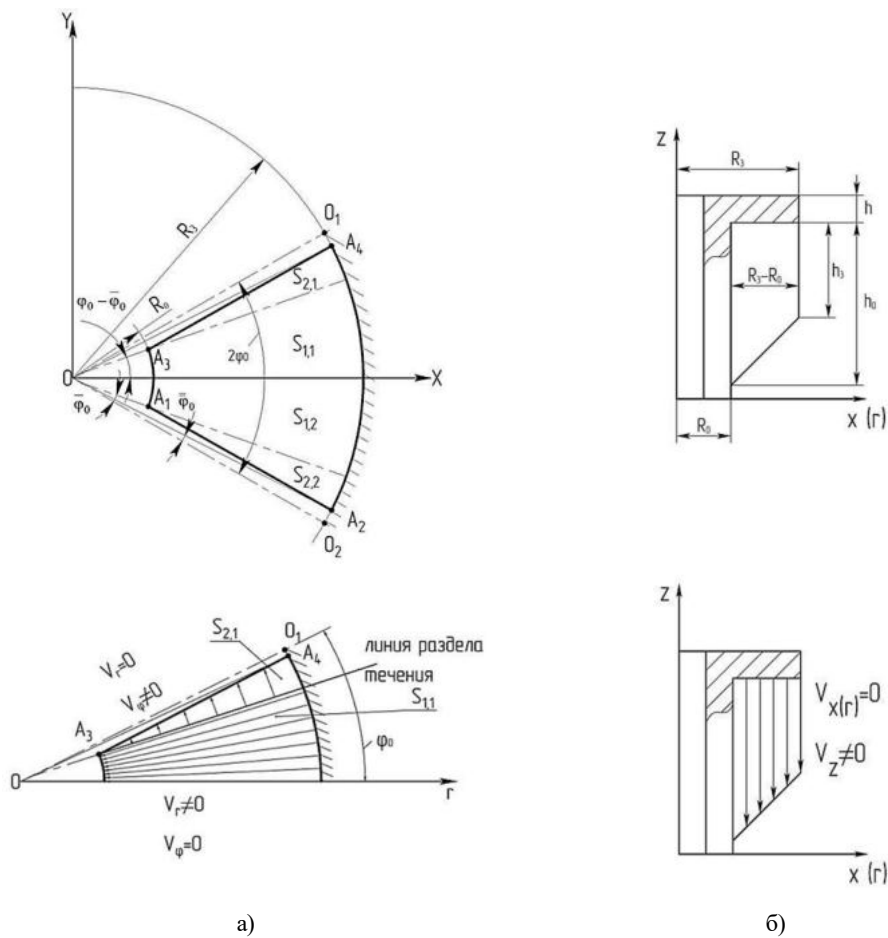


Рис. 2. Схема выделенного элемента фланцевой части поковки в выбранной системе координат: а – геометрические параметры и схема течения металла в пластических областях в плоскости xr ; б – геометрические параметры и схема течения металла в пластических областях в плоскости rz

Согласно расчетной схеме, постановка краевой задачи описывалась системой дифференциальных уравнений в частных производных в цилиндрической системе координат [9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial r} &= -\frac{2\tau_s}{h} \cdot \frac{v_r}{\sqrt{v_r^2 + v_\varphi^2}}; \\ \frac{\partial p}{r\partial\varphi} &= -\frac{2\tau_s}{h} \cdot \frac{v_\varphi}{\sqrt{v_r^2 + v_\varphi^2}}; \\ \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_\varphi}{r\partial\varphi} - \frac{d\lambda}{dt} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где p – давление на контакте; $\lambda = \ln h_0/h$ – степень деформации; h_0, h – начальная и конечная толщина деформируемого фланца; v_j – проекции скорости течения; τ_s – напряжения сдвига.

Уравнение прямой в цилиндрической системе координат, проходящей через точки $A_3(R_0 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0), R_0 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0))$; $A_4(R_3 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0), R_0 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0))$ и являющейся границей ребра стабилизатора:

$$\frac{x - R_0}{R_3 - R_0} = \frac{y - (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}{\bar{\varphi}_0 - \varphi_0}. \quad (2)$$

После подстановки значений координат уравнение рассматриваемой прямой примет вид:

$$\frac{R_\delta(\varphi) \cos \varphi - R_0 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}{R_\delta(\varphi) \sin \varphi - R_0 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)} = \frac{R_3 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) - R_0 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}{R_3 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) - R_0 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)} = \Phi_{OB}, \quad (3)$$

откуда текущая координата конца вектора вдоль рассматриваемой прямой:

$$R_\delta(\varphi) = \frac{R_0 (\cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) - \Phi_{OB} \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0))}{\cos \varphi - \Phi_{OB} \sin \varphi} \quad (4)$$

Краевая задача теории пластичности решалась на основании определяющих соотношений: дифференциальных уравнений квазистатического равновесия, условия полной пластичности и уравнений Коши для деформаций. В качестве допущений приняты кинематические гипотезы А. А. Ильюшина [8], выдвинутые им на основе анализа известного решения Л. Прандля. Для решения задачи рассматривалась пластическая область в виде кругового сектора, поделенного дополнительно на зоны $S_{ij}(r, \varphi)$ с характерным течением металла (рис. 1б). При задании граничных условий в скоростях в каждой выделенной области S решалась система уравнений (1) с определением давления на контакте и скорости течения. Так для области $S_{1,1} = \left\{ (r, \varphi) \left| \begin{array}{l} 0 < \varphi < \varphi_0 - \bar{\varphi}_0 \\ R_0 < r < R_3 \end{array} \right. \right\}$ с учетом граничных условий $v_\varphi = 0$ из системы (1) имеем:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{2\tau_s}{h}; \quad \frac{\partial p}{r \partial \varphi} = 0.$$

Интегрируя, получим $p_{1,1} = \frac{2\tau_s}{h} r + C_{1,1}$. Постоянную интегрирования найдем из граничных условий при $r = R_0$ $p = 2\tau_s$, поэтому $C_{1,1} = 2\tau_s (1 - \frac{R_0}{h})$, а контактное давление

$$p_{1,1} = 2\tau_s \left(1 + \frac{r}{h} - \frac{R_0}{h} \right).$$

С учетом компоненты скорости $v_\varphi \approx 0$ условие несжимаемости из системы (1) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} - \frac{d\lambda}{dt} = 0 \quad (5)$$

Истинная степень деформации в момент времени деформирования $\lambda(t) = \ln \frac{h_0}{h} = \ln h_0 - \ln h$

после дифференцирования по времени $\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{1}{h} \frac{dh}{dt}$ и подстановки в (5): $\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = 0$,

которое после разделения переменных $\frac{\partial(rv_r)}{\partial r} = -r \frac{1}{h} \frac{dh}{dt}$ необходимо проинтегрировать для нахождения компоненты скорости течения с учетом граничных условий при $r = R_3$ скорость $v_r = 0$, тогда получим:

$$v_r = \frac{R_3^2 - r^2}{r2h} \cdot \frac{dh}{dt}, \quad (6)$$

Дальнейшее интегрирование уравнения (6) с учетом граничных условий при $r = R_3$ перемещение $u_r = 0$, тогда $C = 0$ приводит к соотношению для вычисления перемещения

$$u_r = \frac{R_3^2 - r^2}{2r} \ln|h|. \quad (7)$$

Сила штамповки в области $S_{1,1}$:

$$\begin{aligned} P_{S_{1,1}} &= \iint_{S_{1,1}} p_1 r dr d\varphi = \int_{R_0}^{R_3} r dr \int_0^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \left(\frac{2\tau_s r}{h} + 2\tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h}\right) \right) d\varphi = \int_{R_0}^{R_3} \left(\frac{2\tau_s r(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}{h} + 2\tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h}\right)(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) \right) r dr = \\ &= \frac{2\tau_s r^3}{3h} (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) \Big|_{R_0}^{R_3} + 2\tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h}\right)(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) \frac{r^2}{2} \Big|_{R_0}^{R_3} = \frac{2\tau_s}{3h} (R_3^3 - R_0^3)(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) + \tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h}\right)(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)(R_3^2 - R_0^2) \end{aligned} \quad (8)$$

В пластической области $S_{2,1} = \left\{ (r, \varphi) \left| \begin{array}{l} \varphi_0 - \bar{\varphi}_0 < \varphi < \varphi_0 - \bar{\varphi}_0 \\ R_\delta(\varphi) < r < R_3 \end{array} \right. \right\}$ граничным условием явля-

ется $v_r = 0$, поэтому первое уравнение системы (1) примет вид $\frac{\partial p}{\partial r} = 0$, а второе выразится

$\frac{\partial p}{r \partial \varphi} = -\frac{2\tau_s}{h}$, которое после разделения переменных и интегрирования даст соотношение для расчета давления на контакте:

$$p_{2,1} = -\frac{2\tau_s}{h} \cdot r \cdot \varphi + 2\tau_s \left(1 + \frac{R_\delta(\varphi)}{h} \cdot \varphi \right). \quad (9)$$

Из условия несжимаемости системы (1) $\frac{\partial v_\varphi}{r \partial \varphi} + \frac{1}{h} \cdot \frac{dh}{dt} = 0$ после разделения переменных

$\partial v_\varphi = -\frac{r}{h} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot \partial \varphi$ и интегрирования $v_\varphi = -\frac{r}{h} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot \varphi + C_{2,0}$ с учетом граничного усло-

вия $v_\varphi \approx 0$ при $\varphi = \varphi_0 - \bar{\varphi}_0$, находим скорость течения v_φ :

$$v_\varphi = -\frac{r}{h} \cdot \frac{dh}{dt} (\varphi - (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)). \quad (10)$$

Для определения перемещения интегрируем уравнение (10):

$$u_\varphi = -r\varphi \ln|h|. \quad (11)$$

Сила штамповки в рассматриваемой пластической области определяется выражением:

$$\begin{aligned}
P_{S_{2,1}} &= \iint_{S_{2,1}} p_{2,1} r dr d\varphi = \int_{\varphi_0 - \varphi_0}^{\varphi_0 - \varphi_0} d\varphi \int_{R_\delta(\varphi)}^{R_3} \left(-\frac{2\tau_s r}{h} \varphi + 2\tau_s + 2\tau_s \frac{R_\delta(\varphi)}{h} \varphi \right) r dr = \\
&= 2\tau_s \int_{\varphi_0 - \varphi_0}^{\varphi_0 - \varphi_0} d\varphi \int_{R_\delta(\varphi)}^{R_3} \left(-\frac{r^2}{h} \varphi + r + \frac{R_\delta(\varphi)}{h} \varphi r \right) dr = \\
&= 2\tau_s \int_{\varphi_0 - \varphi_0}^{\varphi_0 - \varphi_0} d\varphi \cdot \left(-\frac{r^3}{3h} \varphi + \frac{r^2}{2} \left(1 + \frac{R_\delta(\varphi)}{h} \cdot \varphi \right) \right) \Big|_{R_\delta(\varphi)}^{R_3}
\end{aligned} \tag{12}$$

После интегрирования и подстановки пределов:

$$\begin{aligned}
P_{S_{2,1}} &= \frac{\tau_s}{h} \left[\frac{1}{\varphi_0 - \varphi_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}} - \frac{1}{\varphi_0 - \varphi_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}} + \frac{\operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{(\varphi_0 - \varphi_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}})^2} - \frac{\operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{(\varphi_0 - \varphi_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}})^2} \right] + \\
&\quad + \tau_s \frac{R_0}{1 + \Phi_{OB}^2} \ln \left| \frac{\varphi_0 - \varphi_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{\varphi_0 - \varphi_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}} \right| + \frac{R_0}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \frac{R_3^2 \tau_s}{h} (\varphi_0 - \varphi_0) + \\
&\quad + \frac{R_0 \cdot \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \frac{R_3^2 \tau_s}{h} \ln \left| \frac{\varphi_0 - \varphi_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{\varphi_0 - \varphi_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}} \right| + \frac{\tau_s R_3^3}{3h} (\varphi_0 - \varphi_0) (2\varphi_0 - (\varphi_0 + \varphi_0)) + \frac{R_3^3}{2} (\varphi_0 - \varphi_0) \tag{13}
\end{aligned}$$

Для поковки с n продольными ребрами с учетом симметрии пластических областей в форме круговых секторов общая сила деформирования поковки: $P_\Sigma = n(2P_{S_{1,1}} + 2P_{S_{2,1}})$.

В плоскости $r\tau$ определена сила на преодоление трения:

$$\begin{aligned}
P &= -R_0^2 \sigma_s \left(1 + \frac{\beta R_0}{3h} \right) (\pi - n\varphi_0) - n \frac{\beta \sigma_s}{2} (h_0 + h_3) (R_3 - R_0) - \\
&\quad - n \sigma_s \varphi_0 (R_3 - R_0) \left[\frac{h_3}{h} (R_3 + R_0) + \frac{\beta}{3h} (R_3^2 + R_3 R_0 + R_0^2) \right]
\end{aligned} \tag{14}$$

Деформационные параметры. Проекция вектора перемещения на ось z :

$$u_z = 2h(\ln|h| - 1) - 2h_0(\ln|h_0| - 1), \tag{15}$$

С учетом известных перемещений (7), (11), (14) по соотношениям Коши определены деформации:

$$\varepsilon_{rr} = -\frac{1}{2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} + 1 \right) \ln|h|; \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} - 3 \right) \ln|h|; \quad \varepsilon_{zz} = 2\ln|h|; \quad \varepsilon_{r\varphi} = -\varphi \ln|h|. \tag{16}$$

Обсуждение результатов. Математическим моделированием установлена взаимосвязь силы деформирования с геометрическими параметрами поковки, которые изменялись в некоторых пределах: $2,5 \leq h \leq 62$; $45 \leq D_3 \leq 105$; $20 \leq D_0 \leq 70$; $4 \leq n \leq 12$.

С увеличением толщины фланца в 10 раз (с 5 мм до 50 мм) сила деформирования снижается в 1,92 раза со значения 2300 кН до 1210 кН, как показано на рис. 3 (кривая 1), а при увеличении диаметра заготовки в 2 раза с 50 мм до 100 мм, наблюдается интенсивный рост силы деформирования в 7 раз со значения 500 кН до значения 3500 кН (кривая 2), что не противоречит механике процесса выдавливания поволоки с продольным оребрением, т.к. площадь контакта является квадратичной функцией от D_3 .

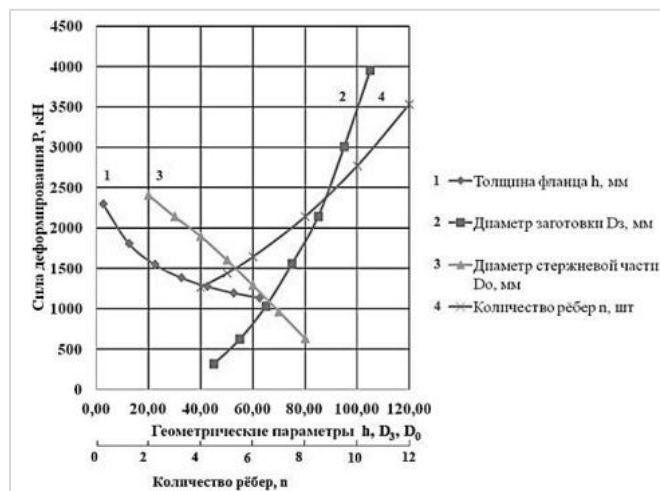


Рис. 3. Зависимость расчетной силы деформирования от геометрических параметров

Также на рис. 3 представлена зависимость силы прямого выдавливания от изменения диаметра стержневой части поковки, при увеличении которого в 4 раза в диапазоне $20 \leq D_0 \leq 80$ мм, сила прямого выдавливания продольных ребер убывает в 3,8 раза со значения 2407 кН до значения 630 кН (кривая 3). Это объясняется тем, что при фиксированных значениях других геометрических параметров поковки с увеличением диаметра стержневой части уменьшается ширина выдавливаемых ребер, что влияет на уменьшение площади контакта ребра с матрицей и, следовательно, на уменьшение силы трения. Количество ребер тоже оказывает влияние на силу прямого выдавливания поковки.

Представленный кривой 4 график (см. рис. 3) указывает на характерный рост силы выдавливания при увеличении количества ребер поковки. Так, например, для выдавливания 4-х ребер требуется сила 1250 кН, а при увеличении числа ребер поковки до 12, т.е. в 3 раза, сила, необходимая для прямого выдавливания, возрастает до значения 3500 кН, т.е. увеличивается в 2,8 раза. В этом случае характер изменения силы выдавливания также не вступает в противоречие с законами механики, т.к. с увеличением числа ребер поковки неизменно увеличивается площадь контакта металла с матрицей, что ведет к росту сил трения, на преодоление которых требуется увеличение суммарной силы прямого выдавливания.

Проанализируем изменение силовых параметров штамповки поковки, имеющей восемь ребер, т.е. $n=8$. Основные геометрические параметры включают: $R_3=84$ – радиус фланца, мм; $R_0=30$ – радиус стержневой части, мм; $h=2,5$ мм – толщина фланца; $\varphi, \varphi_0, \bar{\varphi}, \bar{\varphi}_0$ – угловые параметры пластических зон расчетной схемы. Материал поковки алюминиевый сплав марки АК7, у которого при температуре 450°C предел прочности $\sigma_b = 21$ МПа. Для этой конкретной поковки сила деформирования в конце рабочего хода составила $P=2140$ кН (см. рис. 2). Проведенная параллельно оси абсцисс горизонтальная линия при указанном фиксированном значении силы прямого выдавливания, пересекая кривые, образует точки пересечения, которые, будучи снесенными на ось абсцисс, определяют соответствующие геометрические параметры рассматриваемой в примере поковки.

Влияние геометрических параметров поковки на силу трения показано на графиках рис. 4. Знак «минус» показывает, что сила трения направлена противоположно действию внешней силы и для учета сопротивления от трения ее нужно добавить к силе прямого выдавливания.

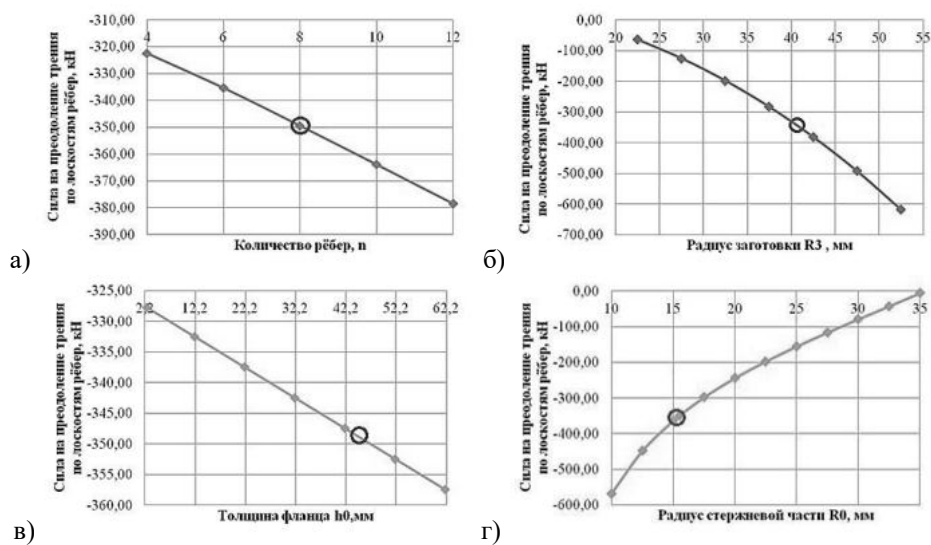


Рис. 4. Связь силы трения с геометрическими параметрами поковки

При увеличении количества ребер с 4 до 12и сила трения убывает от значения $-322,44$ кН до $-378,47$ кН. Увеличение радиуса заготовки в интервале $22,5 \leq R_3 \leq 52,5$ мм ведет к уменьшению силы трения от значения $-64,23$ кН до $-617,92$ кН.

Если увеличивать толщину фланцевой части поковки в диапазоне $2,5 \leq h_0 \leq 62,0$, сила на преодоление трения убывает с $-327,71$ кН до значения $-357,44$ кН, а при увеличении радиуса стержневой части поковки в диапазоне $10 \leq R_0 \leq 35$ мм сила возрастает от $-568,37$ кН до значения $-5,90$ кН. Для конкретной поковки с 8-ю ребрами и известными геометрическими размерами значение силы трения $349,44$ кН (выделено на графиках) увеличивает силу прямого выдавливания 2140 кН до значения $2489,44$ кН.

Выводы. Предложен вариант решения краевой задачи прямого выдавливания тонких ребер поковки стабилизатора с получением аналитических зависимостей для расчета силовых и деформационных параметров.

Установлена взаимосвязь между силой выдавливания и геометрическими параметрами поковки.

Библиографический список

1. Мастяжарт – ГСКБ-47 – ФГУП «ГНПП «Базальт». М.: Изд-во НО «Ассоциация «Лига содействия оборонным предприятиям», 2011. 264 с.
2. Володин А. М., Сорокин В. А., Петров Н. П., Артеc А. Э., Сосенушкин Е. Н., Третьюхин В. В. Разработка инновационных технологий горячей объемной штамповки. // Кузнечно-штамповочное производство // Обработка металлов давлением. 2010. №7. С. 11 – 15.
3. Пасько А. Н. Холодная объемная штамповка осесимметричных заготовок. Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. 252 с.
4. Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. Х.: Вища школа, 1987. 144 с.
5. Сосенушкин Е. Н. Прогрессивные процессы объемной штамповки. М.: Машиностроение, 2011. 480 с.
6. Володин И. М. Моделирование процессов горячей объемной штамповки: Монография. М.: Машиностроение-1, 2006. 253 с.

7. Воронцов А. Л. Технологические задачи теории пластичности. Т.2. М.: Машиностроение-1, 2006. 397 с.

8. Ильюшин А. А. Труды (1946 – 1966). Т.2. Пластичность. М.: Физматлит, 2004. 480 с.

9. Кадымов В. А., Сосенушкин Е. Н., Яновская Е. А. Некоторые точные решения эволюционного уравнения растекания пластического слоя на плоскости // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. №3. 2016. С. 61 – 65.

УДК 621.73

QFORM 9 – ПРОГРАММА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

С. А. Стебунов, Ю. А. Гладков

ООО «КванторФорм»

Новейшая версия программного комплекса QForm [1] получила ряд новых инструментов, позволяющих пользователям эффективно обнаруживать, анализировать и исправлять ошибки технологических процессов деформирования металла. Интуитивно понятный интерфейс QForm в сочетании с новыми функциями многооконного анализа процессов, опциями многозадачности и многопроцессорности позволяет с большей эффективностью наладить разработку новых технологических процессов обработки металлов давлением и оптимизацию существующих процессов, исключить проведение пробных штамповок.

Специальные расчетные возможности [2], такие как использование двойной сетки, расчет совместной механической и совместной тепловой задач, модели исчерпания ресурса пластичности заготовки и предсказание разрушения инструмента вследствие малоциклового усталости, предоставляют новые возможности для точного и быстрого анализа и оптимизации сложных процессов деформирования.

QForm включает в себя специальные модули для моделирования процессов горячей и холодной штамповки, прокатки, раскатки колец и колес, прессования профилей, термообработки и эволюции микроструктуры сталей, алюминиевых, титановых и никелевых сплавов.

Новые модули термообработки и микроструктуры теперь позволяют рассчитывать фазовый состав, остаточные напряжения, остаточные деформации и предсказывать такие механические свойства, как твердость и предел прочности.

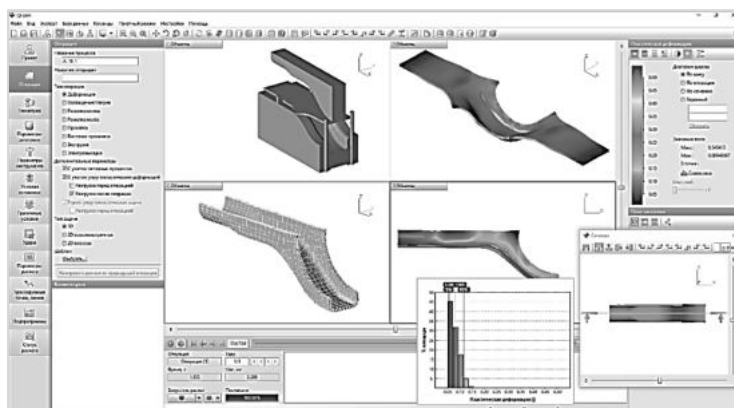


Рис. 1. Интерфейс QForm 9

QForm Ring Rolling получил новые инструменты: базу данных кольцераскатных машин, цилиндрическую систему координат и электромеханический тип привода. Теперь возможно задание параметров движения инструментов любых известных кольцераскатных машин.

Несколько функций для автоматизации добавлено в модуль прокатки: автоматическое определение необходимых граничных условий, автоматическое использование метода двойной сетки, автоматическая адаптация сетки в зоне деформации. Реализован квазивращающийся инструмент с прецизионной сеткой в зоне контакта с заготовкой.

QForm Extrusion теперь позволяет рассчитывать сектор вместо полной геометрии инструмента для быстрого и точного анализа матриц с симметрией. Добавлены новые расчетные возможности: моделирование нескольких заготовок, анализ контакта профиля с распушкой, учет воздействия гравитации на течение металла, новые подпрограммы для оценки износа инструмента, анализа полосчатости, моделирования эволюции микроструктуры при прессовании.

QForm 9 поддерживает гексаэдральную конечно-элементную сетку и имеет несколько специальных функций для моделирования процессов толстолистовой штамповки. Произведено более 50 улучшений функционала QForm, в том числе оптимизирован алгоритм генерации сетки, улучшен пользовательский интерфейс, реализован многовариантный анализ для оптимизации технологии, расширены базы данных.

Библиографический список

1. Сайт разработчика ПО QForm. М.: ООО «КванторФорм», 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qform3d.ru> (дата обращения: 13.08.2019).

2. Власов А. В., Стебунов С. А., Евсюков С. А., Биба Н. В., Шитиков А. А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки / под ред. А. В. Власова. М.: Из-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. 383 с.

УДК 673.2

ВЛИЯНИЕ ИДЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОРИЕНТИРОВОК НА КОЭФФИЦИЕНТ ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. П. Удовенко¹, Я. А. Ерисов²

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва

² Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Одной из специфических характеристик, присущей большинству реальных материалов, является анизотропия их свойств, обусловленная кристаллическим строением вещества и последующим его текстурообразованием при больших пластических деформациях [1]. Для листовых материалов характерны определенные преимущественные кристаллографические ориентировки деформационного типа: $\{112\}\langle 111\rangle$ (медь), $\{110\}\langle 112\rangle$ (латунь), $\{123\}\langle 634\rangle$ (S) and $\{100\}\langle 011\rangle$ («куб на ребре»); и рекристаллизационного типа: $\{100\}\langle 001\rangle$ (кубическая) and $\{110\}\langle 001\rangle$ (Госса) [2]. В данной работе показано влияние указанных идеальных кристаллографических ориентировок на величину коэффициента поперечной деформации, характеризующего пластическую анизотропию листовых материалов.

При анализе листовых материалов практический интерес представляет коэффициент поперечной деформации в плоскости листа, формула которого выглядит следующим образом:

$$\mu_{ij} = -\frac{d\varepsilon_i}{d\varepsilon_j}, \quad (1)$$

где $d\varepsilon_i$ – приращение поперечных пластических деформаций сжатия при линейном растяжении плоского образца; $d\varepsilon_j$ – приращение продольных пластических деформаций растяжения ($i, j = 1, 2, 3$; 1 – направление прокатки, 2 – поперечное направление; 3 – направление нормали).

Для расчета коэффициента поперечной деформации в различных направлениях плоскости листа воспользуемся критерием пластичности, учитывающем в явном виде константы кристаллической решетки и параметры кристаллографической ориентации структуры [3]. Для случая плоского напряженного состояния критерий пластичности запишется следующим образом:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\eta_{12} + \eta_{31})\sigma_{11}^2 + (\eta_{12} + \eta_{23})\sigma_{22}^2 - 2\eta_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + 6\bar{\eta}_{12}\sigma_{12}^2}; \quad (2)$$

где σ_{eq} – интенсивность напряжений; σ_{11} и σ_{22} – нормальные напряжения вдоль направления прокатки и поперечного направления соответственно; σ_{12} – касательное напряжение; η_{ij} и $\bar{\eta}_{ij}$ – обобщенные показатели анизотропии:

$$\eta_{ij} = 1 - \frac{15(A'-1)}{3+2A'} \left(\Delta_i + \Delta_j - \Delta_k - \frac{1}{5} \right); \quad \bar{\eta}_{ij} = \frac{2}{3} \left(\frac{5}{2} - \eta_{ij} \right); \quad (3)$$

A' – параметр анизотропии кристаллической решетки:

$$A' = \frac{S'_{1111} - S'_{1122}}{2S'_{2323}}; \quad (4)$$

S'_{ijkl} – константы кристаллической решетки; Δ_i – ориентационные факторы кристаллографической ориентировки:

$$\Delta_i = \frac{h_i^2 k_i^2 + k_i^2 l_i^2 + l_i^2 h_i^2}{(h_i^2 + k_i^2 + l_i^2)^2}; \quad (5)$$

h_i, k_i, l_i – индексы Миллера, определяющие i -е направление в кристалле относительно системы координат, связанной с листом.

Рассмотрим образец, расположенный под углом θ к направлению проката. В этом случае выражение (1) можно записать следующим образом:

$$\mu_\theta = - \frac{d\varepsilon_\theta + \pi/2}{d\varepsilon_\theta},$$

где $d\varepsilon_\theta$ – компоненты тензора деформаций, записанные в главных направлениях:

$$d\varepsilon_\theta = d\varepsilon_{11} \cos^2 \theta + d\varepsilon_{22} \sin^2 \theta + d\varepsilon_{12} \sin \theta \cos \theta. \quad (7)$$

Компоненты тензора напряжений записываются следующим образом:

$$\sigma_{11} = Y_\theta \cos^2 \theta; \quad \sigma_{22} = Y_\theta \sin^2 \theta; \quad \sigma_{12} = Y_\theta \sin \theta \cos \theta, \quad (8)$$

где Y_θ – предел текучести под углом θ к направлению прокатки.

Подставляя уравнения связи деформаций и напряжений [3]:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{11} &= \frac{1}{2} \frac{d\varepsilon_q}{\sigma_{eq}} [\eta_{12}(\sigma_{11} - \sigma_{22}) + \eta_{31}\sigma_{11}], \\ d\varepsilon_{22} &= \frac{1}{2} \frac{d\varepsilon_q}{\sigma_{eq}} [\eta_{23}\sigma_{22} - \eta_{12}(\sigma_{11} - \sigma_{22})], \quad (9) \\ d\varepsilon_{12} &= 3 \frac{d\varepsilon_q}{\sigma_{eq}} \bar{\eta}_{12}. \end{aligned}$$

в (6) с учетом уравнений (7) и (8), получим:

$$\mu_\theta = 1 - [\eta_{23} \sin^2 \theta + \eta_{31} \cos^2 \theta] [(\eta_{12} + \eta_{23}) \sin^4 \theta + (\eta_{12} + \eta_{31}) \cos^4 \theta + 6 \left(\frac{5}{3} - \eta_{12} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta]^{-1}.$$

Используя зависимость (10), можно определить величину коэффициента поперечной деформации в любом направлении плоскости листа, если известны обобщенные показатели анизотропии материала.

Рассмотрим лист из меди, для которого компоненты тензора податливости S'_{ijkl} равны: $S'_{1111} = 15.0 \text{ ТПа}^{-1}$; $S'_{1122} = -6.30 \text{ ТПа}^{-1}$ and $S'_{2323} = 3.33 \text{ ТПа}^{-1}$ [5], тогда по формуле (3) имеем $A' = 3.203$. Используя зависимости (4) и (2), для указанных идеальных кристаллогра-

фических ориентировок рассчитаны ориентационные факторы и обобщенные показатели анизотропии (табл. 1). Влияние кристаллографических ориентировок на распределение коэффициентов поперечной деформации в плоскости листа изображено на рис. 1.

Таблица 1
Ориентационные факторы и обобщенные показатели анизотропии идеальных кристаллографических ориентировок

Кристаллографическая ориентировка		Ориентационные факторы			Обобщенные показатели анизотропии		
Наименование	$\{hkl\}\langle uvw \rangle$	Δ_1	Δ_2	Δ_3	η_{12}	η_{23}	η_{31}
Медь	$\{112\}\langle 111 \rangle$	0.333	0.250	0.250	0.533	1.116	0.533
Латунь	$\{110\}\langle 112 \rangle$	0.250	0.333	0.250	0.533	0.533	1.116
S	$\{123\}\langle 634 \rangle$	0.281	0.278	0.250	0.617	0.835	0.814
«Куб на ребре»	$\{100\}\langle 011 \rangle$	0.250	0.250	0.0	-0.054	1.703	1.703
Кубическая	$\{100\}\langle 001 \rangle$	0.0	0.0	0.0	1.703	1.703	1.703
Госса	$\{110\}\langle 001 \rangle$	0.0	0.250	0.250	1.703	-0.054	1.703
Изотропный случай		0.20	0.20	0.20	1.0	1.0	1.0

Как видно из рис. 1, для ориентировок деформационного типа предел текучести принимает максимальные значения в направлении прокатки и поперечном направлении и минимальное – под углом 45° к направлению прокатки, а для ориентировок рекристаллизационного типа – наоборот: максимальные значения предела текучести наблюдаются под углом близким к 45° к направлению прокатки, минимальные – в направлении прокатки и поперечном направлении.

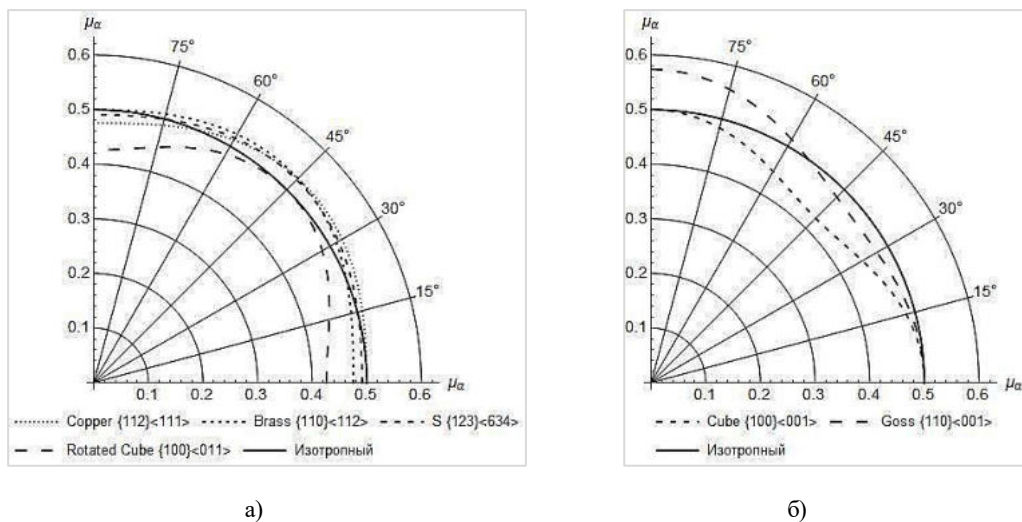


Рис. 1. Распределение коэффициентов поперечной деформации плоскости листа для идеальных кристаллографических ориентировок деформационного (а) и рекристаллизационного (б) типов

Как видно из рис. 1, для ориентировок деформационного типа предел текучести принимает максимальные значения в направлении прокатки и поперечном направлении и минимальное – под углом 45° к направлению прокатки, а для ориентировок рекристаллизационного типа – наоборот: максимальные значения предела текучести наблюдаются под углом близким к 45° к направлению прокатки, минимальные – в направлении прокатки и поперечном направлении.

Библиографический список

1. Гречников Ф. В. Деформирование анизотропных материалов: резервы интенсификации. М.: Машиностроение, 1998. 448 с.
2. S.H. Choi, J.H. Cho, F. Barlat, K. Chung, J.W. Kwon, K.H. Oh, Metallurgical and materials transactions, 1999, 30(A), 377 – 386.
3. Y. Erisov, F. Grechnikov, S. Surudin, Structural Engineering and Mechanics, 2016, 58, 677 – 687.
4. Адамеску Р. А., Гельд П. В., Митюшин Е. А. Анизотропия физических свойств металлов. М: Металлургия, 1985. 136 с.
5. Landolt-Bornstein. Numerical data and functional relationships in science and technology. New Series. Group III: Crystal and solid state physics. Volume 1: Elastic, piezoelectric, piezooptic and electrooptic constants of crystals, Berlin: Springer, 1966.

УДК 621.777.4

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНОЙ СИЛЫ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОГО ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С ИСТЕЧЕНИЕМ

Д. С. Филин, С. В. Трусъ

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Приведены результаты компьютерного моделирования процесса продольного обратного выдавливания с различной формой торца пуансона. Установлен общий характер влияния на технологическую силу и затраченную работу деформирования. Даны рекомендации для выбора значения коэффициентов расчетной зависимости.

В современных условиях производства широкое распространение получают многопозиционные холодновысадочные или горячевысадочные станки. Такое оборудование обладает высокой производительностью и относительно простотой оснасткой по сравнению с отдельным оборудованием. Переход на многопозиционные станки также сопряжен с заменой исходного материала для операций штамповки и переходом на применение прутков или проволоки вместо листов, полос или лент. Такой переход позволяет уменьшить отход металла при раскросе до 5...7%.

Одной из основных и наиболее нагруженной операцией, которые выполняют на таком оборудовании, является продольное обратное выдавливание. Продольное выдавливание с наружным истечением (рис. 1) является наиболее исследованным видом процесса выдавливания. Его исследованию посвящены многочисленные работы Губкина С. И., Унксова Е. П., Смирнова-Аляева Г. А., Шофмана Л. А., Прозорова Л. В., Степанского Л. Г., Ренне И. П., Кузнецова Д. П., Воронцов А. Л., Евратова В. А., Гуменюка Ю. И. и других.

Ограничением при реализации процесса является предельная удельная сила, действующая на пуансон и способная его разрушить. Это является главным недостатком процесса,

препятствующим его внедрению в производство. К преимуществам этого способа можно отнести простоту реализации, высокую точность размеров (8...9 квалитет) и низкую шероховатость поверхности ($Ra_{1,25} \dots 0,63$) полуфабрикатов.

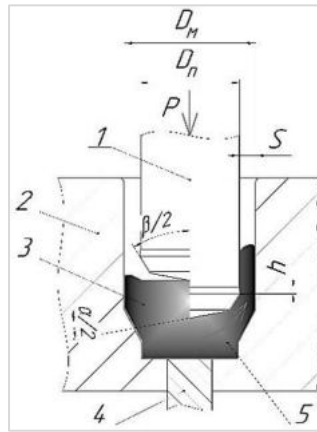


Рис. 1. Схема процесса продольного выдавливания с истечением металла:
1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – выталкиватель; 5 – полуфабрикат

Для процесса выделены и описаны характерные стадии (рис. 2), имеются сведения о размере и форме ОПД, влиянию на размеры и форму ОПД размеров заготовки и формы торца пуансона.

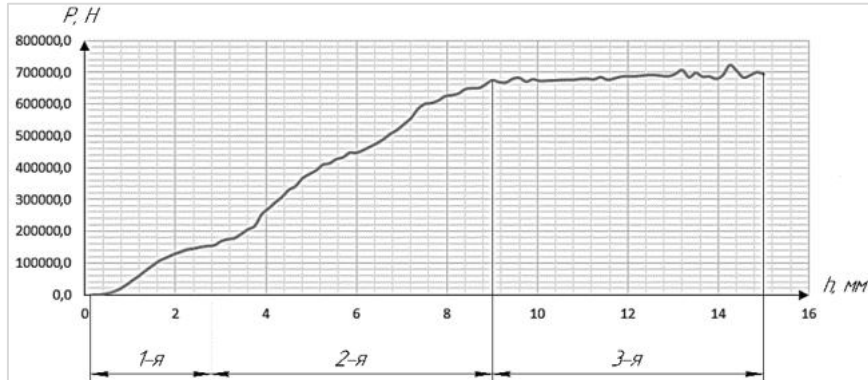


Рис. 2. Характерный график P-h «Сила – пути инструмента» с выделенными стадиями деформирования

В процессе выдавливания выделены три стадии:

- внедрение пуансона;
- формирование ОПД, начало этапа выдавливания стенки;
- условно-стационарный этап.

Разработано большое количество формул для определения максимальной силы деформирования. Наличие большого числа формул объясняется сложностью решения и разностью позиций при подходе к нему. Из-за этого разработано большое количество зависимостей для определения силы деформирования [2]. Большая часть зависимостей дает крайне завышенные или крайне заниженные результаты. Из зависимостей, которые дают значения, близкие к фактическим, следует выделить:

1) Ренне И. П.

$$P = \left[(2,74 - 0,37\beta) + (0,73 - 0,45\beta) \ln \frac{F_0}{F_k} \right] \cdot \sigma_{sm} \cdot F_{II}, \quad (1)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения заготовки; F_k – площадь поперечного сечения выдавливаемого изделия; σ_{sm} – среднее значение предела текучести металла, определяемое по упрощенным уравнениям кривых истинных напряжений (кг/мм^2).

2) Фельдман Г. Д.

$$P = \left\{ \sigma_{S0} - \left(1 + \frac{f \cdot d_{II}}{3 \cdot l_0} \right) + \sigma_{SK} \cdot \left[1 + \frac{l_0}{s_K} \cdot \left(0,25 + \frac{f}{2} \right) \right] \right\} \cdot F_0, \quad (2)$$

где σ_{S0} – предел текучести металла заготовки (кг/мм^2); σ_{SK} – предел текучести металла, выдавленного изделия (кг/мм^2); l_0 – высота заготовки (мм); s_K – толщина стенки выдавленного изделия (мм).

Эти зависимости не имеют поправочных коэффициентов, т.е. дают результат, который зависит только от технологических параметров процесса. Стоит отметить, что в представленных зависимостях не учтено влияние размеров ОПД и толщины дна полуфабриката на силовой режим. Так же большинство формул (к ним относится и формула Фельдмана) не учитывают влияние формы инструмента.

В связи с этим интерес представляет так же и формула (3) предложенная Кузнецовым Д. П. [4]:

$$P_{max} = 0,75n\sigma_i \left[\pi d_{II}^2 / 4 \cdot (4,14 + 4,65f + 1,25fh/S) + 10d_M hf \right], \quad (3)$$

где h – высота цилиндрического (рабочего) пояса на пуансоне; S – толщина стенки полуфабриката.

Зависимость (3) получена аналитически с использованием линий скольжения и принятием следующего допущения: осесимметричная деформация уподоблена плоской. В формуле учтено влияние формы инструмента ($n=0,85 \dots 1$), сопротивления деформации ($\sigma_i(\epsilon_i)$), контактных условий, толщины стенки, потери на трение. Коэффициент 0,75 учитывает неравномерность напряженного состояния ОПД.

Зависимость дает гарантированное завышенные значения максимальной силы, что в целом не является критичным. Основной сложностью является отсутствие четких рекомендаций на выбор величины коэффициента n при назначении той или иной формы торца пуансона.

Влияние торца пуансона на удельную силу изучалось ранее во многих работах, но результаты достаточно противоречивы. Так на пример деформирование пуансоном со сферой на торцевой поверхности пуансона требует больше затрат сил на деформирование нежели пуансон с плоским торцом, однако, теоретические исследования говорят об обратном. В целом сделан вывод, что в независимости от условий деформирования, одна форма рабочей части пуансона оптимальнее другой. Например, в качестве оптимальной рабочей части пуансона рекомендуют применение конусности рабочей части в $60 \dots 75$ градусов с плоской площадкой равной половине диаметра рабочего пояса. Другие данные информируют о том, что оптимальным будет пуансон с углом конусности 85 градусов. Однако, в ряде работ существует зависимость от такого показателя как обжатие. Например, если обжатие менее 58% , то более рационально будет использовать пуансон с рабочей частью в виде сферы, а в случае если обжатие более 58% , то рекомендуется пуансон с конической рабочей частью. Тем не менее, эти результаты не согласуются с экспериментами, где при выдавливании нормализованных заготовок из стали 10 с обжатием $55 - 62\%$ и изменением угла конусности в диапазоне от $20 \dots 85$ градусов с последующим уменьшением удельной силы деформирования на $15 - 20\%$.

Также выявлено, что пуансоны с заостренной формой торца уменьшают силу деформирования, но при этом вызывают преждевременное истечение смазки из-под торца пуансона, что уменьшает глубину внедрения инструмента, так же при эксцентричной установке заготовки

происходит накернивание заостренной частью пуансона, это приводит к изгибу пуансона и дальнейшей поломке. Поэтому использование заостренных пуансонов не рекомендуется [3].

На удельную силу влияет и закругление кромки пуансона, но эти данные также противоречивы. В одних случаях говорится, что при увеличении радиуса закругления фаски сила уменьшается, в других – увеличивается.

Для зависимости (3) основной вопрос заключается в назначении величины коэффициента n . Так как конкретные рекомендации на такой выбор отсутствуют, то было проведено компьютерное моделирование ряда процессов продольного обратного выдавливания с истечением, в ходе которого варьировали следующие параметры (таблица 1):

- угол конусности (рис. 3а);
- радиус вписанной сферы (рис. 3б);
- радиус закругления рабочей кромки (рис. 3в);
- коэффициент трения f .

Схема пуансонов, применяемых в моделировании, представлена на рис. 3.

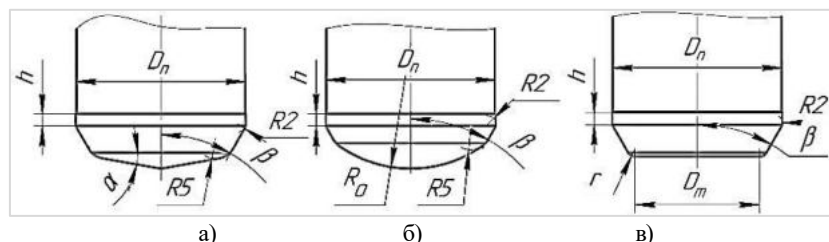


Рис. 3. Варианты исполнения пуансонов: а) конусность; б) сфера; в) плоский торец
(h – высота рабочего пояска пуансона; D_n – диаметр пуансона;
 β – угол конусности всех приведенных пуансонов, $\beta = 120^\circ$; D_m – диаметр плоского торца)

Варьируемые значения при моделировании приведены в таблице 1.

Таблица 1

Варьируемые значения размеров на пуансонах

Варьируемые значения	Конический торец				Сферический торец				Плоский торец		
	10	15	20	-	-	-	-	-	-		
Угол α , °	10	15	20	-	-	-	-	-	-		
Радиус вписанной сферы R_0 , мм	-	-	-	31,1	33,3	24,2	-	-	-		
Радиус закругления кромки r , мм	-	-	-	-	-	-	2	5	-		
Коэффициент трения	0,12	0,05	0,12	0,2	0,12	0,12	0,05	0,12	0,2	0,12	0,12

Сравнение максимальной силы моделирования с результатами расчетов по зависимости (3), произведенных при $n=0.85$, показало высокую достоверность получаемых результатов. Отклонение расчетного значения максимальной силы составляет $-4...3,5\%$ (таблица 2). Однако, отмечено, что применение плоского торца (рис.3в) при $n=0.85$ также имеет малое отклонение от расчетного значения. Из чего можно сделать вывод, что основное влияние на величину коэффициента n оказывает не сама форма торца, а форма перехода от рабочего пояска к торцу.

Таблица 2

Сравнение полученной максимальной силы P_{max} моделирования с расчетной

Пуансон	Коэффициент трения	$P_{max}, Н$ (моделирование)	$P_{max}, Н$ (расчетное значение по Кузнецову Д.П.)	Отклонения от расчетного значения, %
10 градусов	0,12	2893108	2877819	+ 0,5
15 градусов	0,05	2659908	2654797	+ 0,2
	0,12	2824552	2877819	- 1,8
	0,2	3063648	3132701	- 2,2
20 градусов	0,12	2786540	2877819	- 3,2
Окружность $r=31.1\text{мм}$	0,12	2918816	2877819	+ 1,4
Окружность $r=33.3\text{мм}$	0,05	2751408	2654797	+ 3,6
	0,12	2845216	2877819	- 1,1
	0,2	3035716	3132701	- 3,1
Окружность $r=24.2\text{мм}$	0,12	2976100	2877819	+ 3,4
Плоский торец с закруглением $r=2\text{мм}$	0,12	2759284	2877819	- 4,2
Плоский торец с закруглением $r=5\text{мм}$	0,12	2912416	2877819	+ 1,2

Так же произведен расчет затраченной работы на деформирование. Выявлено, что форма рабочей части пуансона и коэффициент трения напрямую влияют на этот показатель (таблица 3).

Таблица 3

Значения затраченной силы в зависимости от формы пуансона и коэффициента трения по возрастанию

№	Геометрия пуансона с коэффициентом трения	Затраченная работа, Дж
1	20 градусов (0,12)	5548401
2	Окружность $r=24.2$ (0,12)	5976621
3	15 градусов (0,05)	6023534
4	15 градусов (0,12)	6345789
5	Окружность $r=33.3$ (0,05)	6466991
6	15 градусов (0,2)	6731899
7	Окружность $r=31.1$ (0,12)	6776394
8	Окружность $r=33.3$ (0,12)	6794493
9	10 градусов (0,12)	7040272
10	Окружность $r=33.3$ (0,2)	7197167
11	Плоский торец с радиусом закругления 5 мм	8346735
12	Плоский торец с радиусом закругления 2 мм	8462573

Анализ результатов моделирования показал, что основное влияние варьируемые факторы оказывают на первую и вторую стадии, из-за чего количество требуемой для деформирования энергии может сильно отличаться. Минимальные результаты дает применение конусного пуансона. Естественной закономерностью является снижение количества затраченной работы при увеличении угла конусности.

При нормальных условиях трения ($f=0.12$) применение конусной формы торца дает снижение затраченной работы примерно на 7% при угле конусности $\alpha=15^\circ \dots 20^\circ$. При последующем уменьшении угла конусности разница в затраченной работе снижается до 3%. Что можно принять как погрешность моделирования и не считать достаточной весомой разницей. Поэтому можно говорить, что выбор формы торца зависит только от требований к форме или порядку последующей обработки выдавленных полуфабрикатов.

При этом из таблицы видно, что применение плоского торца дает рост количества затраченной работы на 24...50%. Такой рост существенно сказывается на интенсивности износа инструмента и разогреве заготовок и инструмента при длительной работе. Кроме того, плоская форма торца увеличивает и так существенную неравномерность степени деформации, формируемую при продольном обратном выдавливании с истечением.

Выводы:

- основное влияние на величину коэффициента «п» оказывает форма не самого торца, а перехода от рабочего пояса к торцу. Вне зависимости от формы торца, при наличии конусного перехода целесообразно применять значения $n=0.85$.
- для максимального снижения энергии, требуемой для деформации, следует применять пуансоны с конусной формой торца

Библиографический список

1. Кузнецов В. В., Ренне И. П., Рогожин В. Н. Холодное выдавливание полых цилиндрических изделий из малоуглеродистой стали // Тула: Тульский политехнический университет, 1976. 72 с.
2. Данилин Г. А., Филин Д. С., Лукин С. А. Возможность применения способов холодного выдавливания при изготовлении полых изделий ответственного назначения из прутка // Металлообработка. 2017. №6. С. 17 – 23.
3. Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: учебное пособие: в 2 т. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. Т. 1 – 396 с.; Т. 2 – 441 с.
4. Справочник по технологии патронного производства. Т. 2 / под ред. Агеева Н. П. СПб: БГТУ «Военмех», 2011. 345 с.

УДК 621.777.4.014

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ГЛУХИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУХСТОРОННИМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ

Д. С. Филин

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Приведены выводы по анализу компьютерного моделирования, экспериментальных данных и ранее полученных результатов оценки технологических возможностей процесса продольного двухстороннего выдавливания. Приведены основные факторы, влияющие на характер протекания процесса, и зависимости, отображающие характер этого влияния. Предложены два варианта формулировки условия прочности заготовок при реализации операции. Даны рекомендации по расчету размеров рабочего инструмента.

Из широкой номенклатуры изделий общего и специального машиностроения можно выделить отдельную группу полых изделий с относительно толстым дном и высокими тонкими

стенками. Такими изделиями, например, являются баллоны высокого и низкого давления, гильзы для стрелкового оружия или артиллерийских систем.

Такие изделия, как правило, изготавливают из материалов с относительно высокой пластичностью – низкоуглеродистые конструкционные стали обычного и высокого качества, медь, алюминий и их сплавы, а также другие материалы.

Так, например, баллоны в зависимости от объема и назначения изготавливают из стали или алюминия. При этом они могут быть как сварными, так и цельноштампованными. В первом случае может потребоваться применение специальных технологий сварки и контроля сварных швов.

Гильзы и другие металлические элементы патронов, как боевых, так и охотничьих, изготавливают цельноштампованными из-за высоких эксплуатационных требований. В ряде случаев более сложный и трудоемкий процесс изготовления цельноштампованного баллона также может быть обоснован особенностями материала или требованиями эксплуатации.

При этом номенклатура и разнообразие таких изделий и их элементов в современных условиях возрастают. Главным образом, это связано с увеличением количества гражданских и охотничьих стрелковых систем.

Производство широкой номенклатуры изделий на старых образцах оборудования, в качестве которого используют роторные линии не всегда удобно и рационально. Это приводит к тому, что растет актуальность вопроса перехода на применение раздельного оборудования или специальных многопозиционных станков.

Однако, вне зависимости от применяемого оборудования, изготовления подобных изделий требует применение большого количества операций вытяжки. Операции вытяжки имеют значительную теоретическую и практическую базу наработанную годами исследований и производственной реализации. Несмотря на это применение большого количества вытяжек может привести к формированию значительной разностенности у конечного изделия. Что необходимо учитывать, либо допусками на размеры и самими размерами изделий, либо при их конструкторском расчете.

Уменьшить количество операций возможно за счет применения широких технологических возможностей комбинированных процессов штамповки. Одним, из которых, является процесс продольного двухстороннего выдавливания (рис.1).

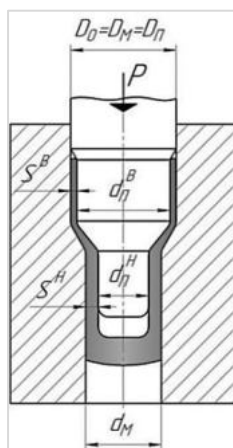


Рис. 1. Схема процесса продольного двухстороннего выдавливания

Процесс можно применять не только как комбинированную схему выдавливания полых заготовок, но и в качестве операции объемно-листовой штамповки. В этом случае будет про-

исходить реализация операции свертка-выдавливание [1]. В предлагаемой реализации зазор между матрицей и пуансоном будет выполнен не только в нижнем сечении, но и в верхнем. Однако, опыта применения операции в качестве объемно-листовой крайне мало.

Анализ компьютерного моделирования, экспериментальных данных и ранее полученных результатов оценки технологических возможностей процесса [2...4] показал, что из основных конструктивных факторов, наибольшее влияние при нормальных условиях трения (до $f=0,15$) имеют:

- коэффициент утонения в нижнем сечении (m_S^H);
- коэффициент утонения в верхнем сечении (m_S^B);
- соотношение коэффициентов утонения в верхнем и нижнем сечении;
- угол конусности матрицы и пуансона.

Также по результатам оценки имеющихся данных были установлены закономерности изменения удельной силы от относительной толщины стенки заготовки S/D при различных соотношениях коэффициентов утонения стенки верхнего и нижнего ОПД (рис. 2). Так при $m_S^H = 0,4$ с увеличением относительной толщины удельная нагрузка возрастает.

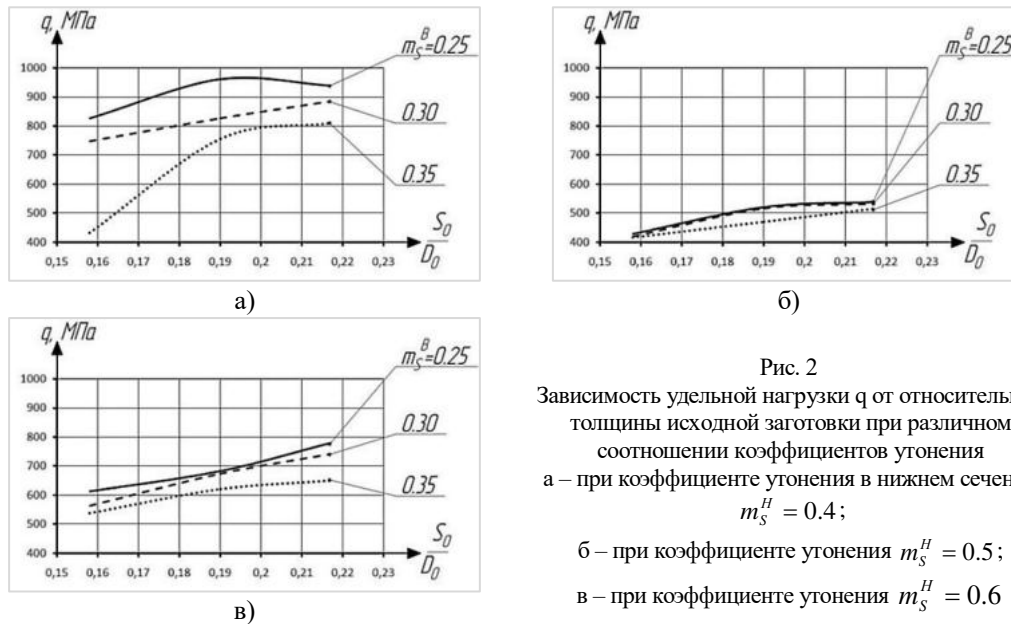


Рис. 2
Зависимость удельной нагрузки q от относительной толщины исходной заготовки при различном соотношении коэффициентов утонения
а – при коэффициенте утонения в нижнем сечении $m_S^H = 0,4$;
б – при коэффициенте утонения $m_S^H = 0,5$;
в – при коэффициенте утонения $m_S^H = 0,6$

Анализ графиков показывает, что в основном зависимость удельной нагрузки q от относительной толщины стенки в независимости от соотношения коэффициентов утонения в верхнем и нижнем сечении имеет линейный характер. При этом, с увеличением коэффициента утонения в нижнем сечении m_S^H степень влияния коэффициента утонения в верхнем сечении m_S^B значительно уменьшается. Так, при $m_S^H = 0,4$ разница удельной нагрузки при увеличении m_S^B от 0,25 до 0,35 составляет примерно 150...200 МПа и более, а при $m_S^H = 0,6$ уменьшается до 40...60 МПа.

Анализ графиков показывает, что в основном зависимость удельной нагрузки q от относительной толщины стенки в независимости от соотношения коэффициентов утонения в

верхнем и нижнем сечении имеет линейный характер. При этом, с увеличением коэффициента утонения в нижнем сечении m_s^H степень влияния коэффициента утонения в верхнем сечении m_s^B значительно уменьшается. Так, при $m_s^H = 0.4$ разница удельной нагрузки при увеличении m_s^B от 0,25 до 0,35 составляет примерно 150...200 МПа и более, а при $m_s^H = 0.6$ уменьшается до 40...60 МПа.

Следует отметить, что при малом коэффициенте утонения m_s^H и его небольшой разнице с коэффициентом утонения m_s^B до значения относительной толщины $S_0/D_0=0.20$ интенсивность изменения удельной нагрузки значительно больше, по сравнению с другими случаями, но при этом также имеет линейный характер.

Также отмечено, что при увеличении коэффициента утонения в нижнем сечении до $m_s^H = 0,8$ течение металла в верхний зазор почти полностью прекращается.

Анализ влияния угла конусности показал, что общий характер изменения силового режима остается неизменным и в целом соответствует ранее описанной последовательности с сохранением 3-х стадий деформирования. Из графиков зависимости удельной нагрузки от изменения коэффициента утонения при различных углах конусности (рис. 3) видно, что при уменьшении коэффициента утонения возрастает удельная нагрузка. В тоже время при одинаковых коэффициентах утонения удельная нагрузка возрастает с увеличением угла конусности с 60° до 90° , хотя это увеличение является относительно небольшим (до 100 МПа)

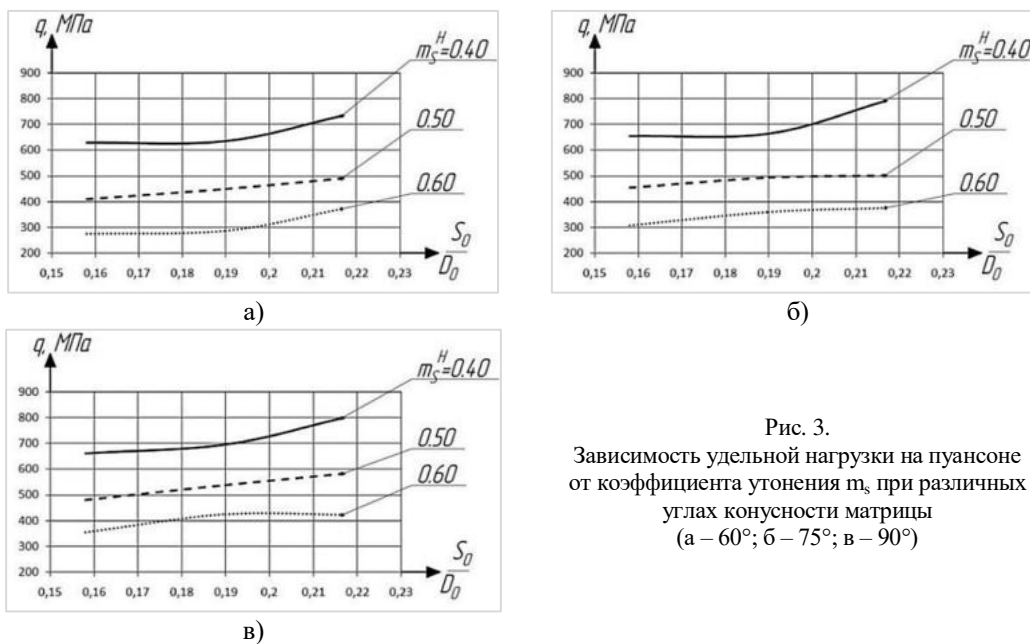


Рис. 3.
Зависимость удельной нагрузки на пуансоне от коэффициента утонения m_s при различных углах конусности матрицы (а – 60° ; б – 75° ; в – 90°)

В ходе анализа результатов был сделан вывод о том, что опасное сечение в зоне сопряжения стенки и дна разгружается на этапе вытяжки с подпором [3, 4]. Поэтому при разработке конструкции рабочего инструмента необходимо особое внимание уделить высоте нижней ступени пуансона, которая должна обеспечивать уменьшение продолжительности стадии вытяжки с утонением.

При обеспечении подпора необходимо учитывать возможность затекания металла под пуансон и вероятность его преждевременного выдавливания в момент, когда зазор для формирования стенки сам еще стабильно не сформирован. Кроме того, имеющейся информации не достаточно для определения рациональной величины подпора. При этом геометрию инструмента необходимо согласовывать таким образом, чтобы подпор не приводил к преждевременному выдавливанию металла и его затеканию под пуансон.

Поэтому, предварительно условие прочности заготовки на операции продольного двухстороннего выдавливания может быть сформулировано по двум вариантам:

1. Предельная степень деформации заготовки на операции продольного двухстороннего выдавливания может быть определена как предельная деформация нижнего сечения на операции вытяжки с утонением, что соответствует 1-й стадии операции. Деформация в среднем и верхнем сечении при этом может быть согласована с условием прочности инструмента, так как их формирование происходит на 2-й и 3-й стадиях, когда схема напряженного состояния соответствует всестороннему сжатию, а вероятность разрушения заготовки отсутствует.

2. При возможности обеспечить предварительную осадку стенки заготовки на 1-й стадии предельная деформация заготовки может быть задана по рекомендациям для процесса вытяжки-выдавливании (рис. 4) [1].

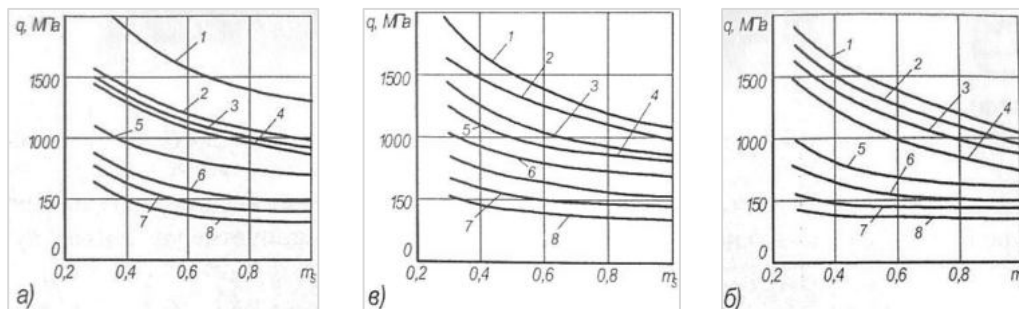


Рис. 4. Зоны допустимой деформации на операции вытяжка-выдавливании заготовок из стали 18ЮА (а), латуни Л70 (б) и биметалла 1 (в)

Расчетными исполнительными размерами рабочего инструмента (рисунок 5) на операции продольного двухстороннего выдавливания являются:

- диаметр приемной, выходной и рабочей части матрицы d_{M1} , d_{M2} и d_{M3} ;
- угол конусности приемной части матрицы α_M ;
- высота приемной и рабочей части матрицы h_{M1} и h_{M2} ;
- радиус закругления приемной части матрицы r_M ;
- радиусы перехода конусного участка в приемную и рабочую части матрицы R_{M1} и R_{M2} ;
- диаметр основания пуансона $D_{П}$;
- диаметр верхней рабочей ступени пуансона $d_{П1}$;
- диаметр перехода конусной части в нижнюю рабочую ступень пуансона $d_{П2}$;
- диаметр основания нижней рабочей ступени пуансона $d_{П3}$;
- высота верхней и нижней рабочей ступеней пуансона $h_{П1}$ и $h_{П2}$;
- радиусы переходов конического участка пуансона $r_{П1}$ и $r_{П2}$;
- радиус основания нижней ступени пуансона $r_{П3}$.

Исполнительные размеры рабочего инструмента назначают по соответствующим размерам заготовок до и после продольного двухстороннего выдавливания (рис. 6) с учетом допусков на точность изготовления (таблица 1).

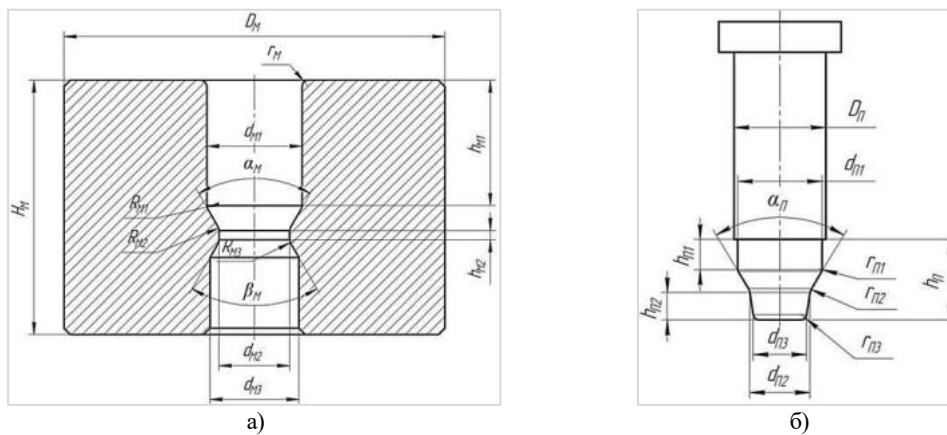


Рис. 5. Эскизы матрицы (а) и пуансона (б) процесса продольного двухстороннего выдавливания

Таблица 1
Расчет основных исполнительных размеров рабочего инструмента

Определяемая величина	Расчетная зависимость
диаметры матрицы: -приемный d_{M1} -рабочий, d_{M2}	$d_{M1} = D_0^H + (0.2 \dots 0.6) \text{ мм}$ $d_{M2} = D_2$
угол конусности приемной части матрицы α_M	$\alpha_M = 40 \dots 60^\circ$
высота приемной части матрицы h_{M1} высота рабочей части матрицы h_{M2}	$h_{M1} = 1.5 \cdot h_0 + r_M$ $h_{M2} = 0.5 \cdot d_{M2}$
Радиусы закругления: -приемной части матрицы r_M -переход приемной части в конусную R_{M1} -переход конусной части в рабочую часть R_{M2}	$r_M = 2 \dots 5 \text{ мм}$ $R_{M1} = 0.1 \cdot d_{M2}$ $R_{M2} = 0.1 \cdot d_{M2}$
диаметр основания пуансона $D_{П}$	$D_{П} = D_1 - \delta$
диаметр верхней рабочей ступени пуансона $d_{П1}$	$d_{П1} = d_1$
диаметр перехода конусной части в нижнюю рабочую ступень пуансона $d_{П2}$	$d_{П2} = d_2$
диаметр основания нижней рабочей ступени пуансона $d_{П3}$	$d_{П3} = d_3$
Высота ступеней пуансона: -верхней $h_{П1}$ -нижней $h_{П2}$	$h_{П1} = 1.5 \cdot h_0$ при $m_s^B \leq 0.6$ $h_{П1} = h_0$ при $m_s^B \geq 0.6$ $h_{П2} = 2 \cdot h_0^B - h_0^H + \frac{D_0^H - D_2}{2 \cdot \text{ctg}(\alpha/2)}$
радиусы переходов конического участка пуансона $r_{П1}$ и $r_{П2}$	$r_{П1} = R_{M1} - S_1$ $r_{П2} = R_{M2} + S_2$
радиус основания нижней ступени пуансона $r_{П3}$	$r_{П3} = r_1$

Примечание: допуски на размеры назначать по 5...8 качеству без учета допуска на износ

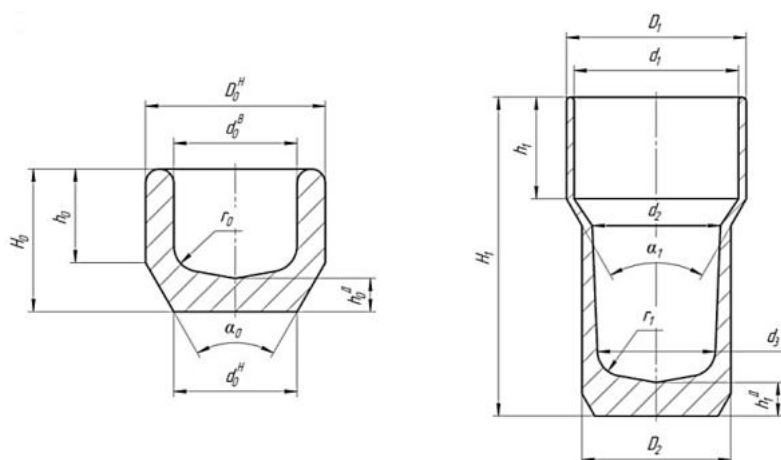


Рис 6. Эскиз заготовки (а) и полуфабриката (б) продольного двухстороннего выдавливания

Следует учитывать, что предлагаемые зависимости отвечают случаю, когда стадия вытяжки с утонением при реализации процесса продольного двухстороннего выдавливания направленно не ограничивается за счет предварительной осадки стенки заготовки.

Библиографический список

1. Данилин Г. А., Огородников В. П. Теория и расчеты процессов комбинированного пластического формоизменения. СПб: БГТУ «Военмех», 2004. 304 с.
2. Данилин Г. А., Филин Д. С., Лукин С. А. Возможность применения способов холодного выдавливания при изготовлении полых изделий ответственного назначения из прутка // Металлообработка. 2017. №6. С. 17 – 23.
3. Данилин Г. А., Филин Д. С., Волжин С. Г. Технологические особенности процесса продольного двухстороннего выдавливания полых деталей // Металлообработка. 2017. №2. С. 11 – 16.
4. Филин Д. С., Киселев Д. А. Определение технологической силы операции продольного двухстороннего выдавливания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. №8. С. 302 – 307.

УДК 621.7.043

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТУРБИНОЙ ЛОПАТКИ

Е. О. Фролова, В. А. Лобов

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Лопатки являются основными рабочими деталями турбины и эксплуатируются в условиях агрессивной среды, под действием высоких температур и давлений. Во время работы они испытывают большие нагрузки, значительные статические и динамические температурные напряжения. Рабочая часть лопатки имеет изогнутую форму и переменный по длине профиль нетехнологичные с точки зрения обработки давлением (сочетание тонкого полотна пера с массивным хвостовиком).

В результате анализа предлагаемого технологического процесса можно выделить основные операции: подготовка мерных заготовок, нагрев перед штамповкой, два перехода горячей обработки давлением, обрезка облоя, термическая обработка, отделочные операции, контроль.

Поковка штампуется перпендикулярно оси заготовки, следовательно, в соответствии с классификацией поковок приведенной в [2] (таблица 4) она относится к первой группе – штамповка плашмя. Выбор облойной канавки при штамповке сплава 08X13 определен по нормативам, рекомендуемым для сталей [1]. Для определения размеров исходной заготовки построена эпюра поперечных сечений и эпюра диаметров.

В соответствии с полученным значением диаметра исходной заготовки по ГОСТ 2411-77 «Прутки из сплавов горячекатаные и кованые. Сортамент» определен ближайший диаметр исходной заготовки, который составил 180 мм. Разработанный технологический процесс изготовления поковки позволил обеспечить коэффициент использования материала равный 0,88.

Операции объемной штамповки можно разделить на предварительное формоизменение и окончательное формоизменение, при котором поковка приобретает форму и размеры готового изделия. Предварительные операции используют для распределения металла в заготовке, для придания ей нужной конфигурации. При дальнейшем формоизменении такая заготовка будет штамповаться с меньшими усилиями, и будет обеспечиваться заполнение сложных участков ручья штампа. При разработке технологического процесса изготовления турбинной лопатки были определены силы деформирования по переходам штамповки.

В рассматриваемом технологическом процессе изготовления поковки направляющей лопатки нагрев заготовок перед операциями штамповки производится в РКМ, следовательно, не потребуется дополнительное оборудование (методическая печь). Однако, любой нагрев, вне зависимости от оборудования, при помощи которого он осуществляется, включает в себя три этапа: первый этап – возникновение температурных напряжений; второй этап – форсированный нагрев, когда металл перешел в пластичное состояние; третий этап – выдержка, то есть выравнивание температур по сечению заготовки.

После проведения основных штамповочных операций проводится термическая обработка с целью формирования требуемых механических свойств изделия, устранения остаточных напряжений, восстановления пластических свойств материала после штамповки. Режим закалки: нагрев 980-1000°C; выдержка: 55 минут; охлаждение: в масле. Режим отпуска: нагрев 680-720°C; выдержка: 1 час 20 минут; охлаждение: в масле.

Сложность термической обработки данного изделия заключается в разнице площадей поперечных сечений в 1,7 раз. Потому при применении стандартных режимов термообработки неизбежно возникновение дефектов, таких как коробление. Вследствие этого следует проводить термическую обработку в штампе с большим количеством отверстий для проникновения закалочных сред к изделию. В таких условиях лопатка будет достаточно жестко зафиксирована, что позволит избежать коробления, а термическая обработка будет осуществлена в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Библиографический список

1. Ковка и объемная штамповка стали: Справочник. В 2-х т./ Под ред. Сторожева М. В. Изд. 2-е. Том 2. М.: Машиностроение, 1968. 448 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Под ред. Семенова Е. И. Том 2. Горячая штамповка. М.: Машиностроение, 1986. 592 с.



УДК 621.373

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ В СТРУКТУРЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ШИРОКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. В. Акапьев

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

В настоящее время актуальной задачей является разработка малошумящих и стабилизированных по частоте радиочастотных генераторов. Высокочастотные устройства, обладающие широкой спектральной линией перестройки необходимы для модернизации современных и построения новых радиолокационных систем, линий связи, создании новой измерительной техники.

Существующие в настоящее время традиционные генераторы СВЧ не могут использоваться для решения вышеизложенных задач. Большинство используемых генераторов СВЧ имеют ограничения по уровню собственных шумов и рабочему диапазону частот.

Устранить указанные недостатки можно с помощью оптоэлектронного генератора как одного из наиболее перспективных функциональных элементов сверхвысокочастотной электроники. Такое устройство представляет собой новый класс высокостабильных генераторов СВЧ в диапазоне от мегагерц до гигагерц.

Главным отличием оптоэлектронного генератора от традиционных генераторов СВЧ сигнала является преодоление зависимости между шириной полосы и уровнем собственных шумов. Верхний предел частоты генерации ограничен полосой пропускания компонентов, что составляет сотни гигагерц.

Классическая схема оптоэлектронного генератора была предложена Яо и Малеки в 1994 г. Генератор состоит из двух структурных узлов: оптического и радиотехнического. В состав оптического узла входят полупроводниковый лазерный модуль, модулятор интенсивности излучения, волоконно-оптический тракт и фотодиодный модуль, а в состав радиотехнического узла – предварительный электрический усилитель, полосно-пропускающий фильтр, усилитель мощности и делитель мощности.

Непрерывное лазерное излучение поступает на вход модулятора. В данной схеме в качестве модулятора используется электрооптический модулятор на основе интегрального интерферометра Маха-Цендера. Далее модулированное СВЧ-сигналом излучение поступает через волоконный тракт на вход фотодиода. СВЧ-сигнал усиливается с помощью электрического усилителя и попадает на полосовой фильтр. Фильтр выделяет частоту генерации оптоэлектронного генератора, отсекая колебания на других частотах. После усилителя мощности сигнал попадает на делитель, где одна часть идет в выходной порт, а другая на управляющий вход электрооптического модулятора, замыкая цепь положительной обратной связи.

Данный генератор СВЧ колебаний имеет более низкие собственные шумы и большую по ширине полосу спектральной перестройки, что делает его незаменимым для использования в перспективных линиях связи, измерительной технике.

Библиографический список

1. Белкин М. Е., Сигов А. С. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. №8. С. 901 – 914.
2. Жалуд В., Кулешиов В.Н. Шумы в полупроводниковых устройствах / Под общ. ред. А. К. Нарышкина. М.: Советское радио, 1977. 416 с.
4. Уткин Г. М. Автоколебательные системы и волновые усилители. М.: Советское радио, 1978. 272 с.
5. D. Elyahu and L. Maleki. Low phase noise and spurious level in multiloop optoelectronic oscillator. Proc. IEEE Int. Frequency Control Symp., 2003. p.405.
6. L. Maleki. Recent Progress in Opto-Electronic Oscillator. Microwave Photonics International Topical Meeting, 12–14 Oct. 2005, p. 81 – 84.

УДК 621.396.969

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПРИЕМНОГО СИГНАЛА В СИСТЕМЕ «БОРТ–БОРТ» С УЧЕТОМ СФЕРИЧНОСТИ ЗЕМЛИ

Е. А. Антохин, Н. В. Апанасенко, П. С. Иваненко, Д. Л. Мурсалов,
В. А. Сеницын, А. А. Топилин, В. Т. Яковлев

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
ОАО «ВНИИРА»*

При проектировании радиолокационной системы (РЛС) существенное внимание уделяется вопросу функционирования системы с учетом отражения собственных сигналов от земной поверхности. Интерференция отраженного сигнала с сигналом, распространяющимся прямым путем, как правило, оказывает негативное влияние на характеристики создаваемой системы. В частности, в результирующей диаграмме направленности (ДН) приемной антенны появляются провалы, а дальность действия в провалах снижается. В связи с этим, влияние отражения должно быть учтено еще на ранних стадиях проектирования, что повышает вероятность снижения затрат различного вида для достижения требований, предъявляемым к разрабатываемой РЛС.

Для анализа характера и степени воздействия отражения широко применяется моделирование [1]. Известен и представлен в литературе подход решения геометрической задачи построения пути отраженного от земной поверхности луча при допущении о том, что она плоская и ровная [2].

Решение задачи в аналитическом виде при условии сферичности поверхности и того, что расстояние между передающей и приемной антеннами много больше высот подъема антенн, а

также излучаемый сигнал является монохроматическим и непрерывным, представлено в [3, 4]. Пример расчета зоны действия РЛС в вертикальной плоскости для этого случая приведен на рис. 1.

Вопросу отражения от статистически неровных поверхностей посвящена специализированная литература, например, [5, 6].

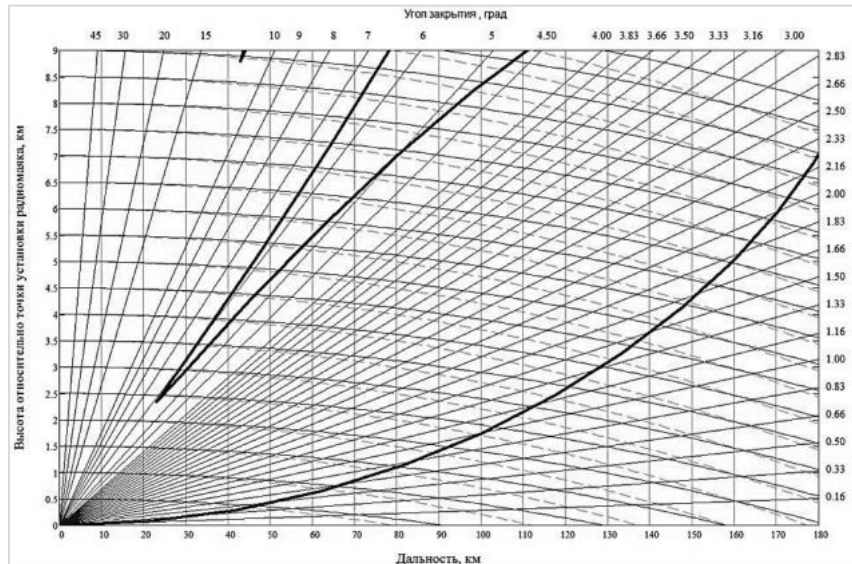


Рис. 1. Зона действия РЛС в вертикальной плоскости

В данной работе рассматривается расчет мощности приемного сигнала в системе «борт -- борт». Расчет мощности осуществляется с учетом отражения сигнала от сферической земной поверхности без ограничений, накладываемых определенным отношением высот антенн и монохроматичностью сигнала. Решение геометрической задачи построения пути отраженного луча достигается за счет применяемого авторами подхода.

Применяемый подход:

- основан на методе прямого перебора;
- разработан с учетом материалов [3 – 5, 7];
- характерен простотой и доступностью при реализации и использовании на ПЭВМ.

Следует отметить, что профиль моделируемой поверхности может быть задан произвольным образом исходя из конкретных условий расположения проектируемой РЛС.

Расчет мощности используется для построения полунатурной модели, позволяющей исследовать влияние отражения от земной поверхности на характеристики проектируемой РЛС. Радиолокационный канал образован аппаратурой формирования и обработки сигналов двух летательных аппаратов (ЛА) («борт-борт»).

На рис. 2 иллюстрирована геометрическая модель распространения прямого и отраженного лучей в РЛС «борт-борт».

На основе [4, 7] представим выражение для расчета мощности сигнала, принимаемого ЛА-1 (здесь и далее при схожем контексте будем подразумевать аппаратуру формирования и обработки ЛА):

$$P_{\text{прм}}(\alpha, \beta) = \xi^2 \frac{P_{\text{прд}} \lambda^2}{(4\pi D)^2} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} f_{\text{прд}}^2(\alpha, \beta) f_{\text{прм}}^2(\alpha, \beta), \quad (1)$$

где ξ – коэффициент потерь, характеризующий условия распространения сигнала между передатчиком ЛА-2 и приемником ЛА-1; $P_{\text{прд}}$ – мощность передатчика ЛА-2; λ – длина волны;

D – длина пути распространения сигнала; $G_{\text{прд}}$ – коэффициент усиления передающей антенны ЛА-2; $G_{\text{прм}}$ – коэффициент усиления приемной антенны ЛА-1; $f_{\text{прд}}^2(\alpha, \beta)$ – значение ДН передающей антенны ЛА-2 в заданном направлении; $f_{\text{прм}}^2(\alpha, \beta)$ – значение ДН приемной антенны ЛА-1 в заданном направлении.

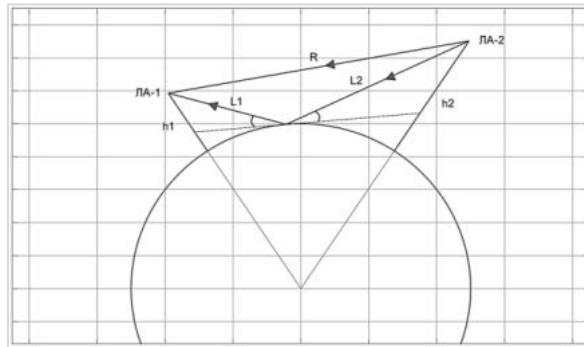


Рис. 2. Геометрическая модель распространения прямого и отраженного лучей: ЛА-1 и ЛА-2 – первый и второй ЛА, соответственно, R – длина пути прямого луча (расстояние прямой видимости между ЛА-1 и ЛА-2), h_1 и h_2 – высоты ЛА-1 и ЛА-2, соответственно, $(L_1 + L_2)$ – длина пути отраженного луча

На рис. 3 представлены зоны действия РЛС при различных высотах подъема антенны ЛА-1 при длительности импульса 0,1 мкс.

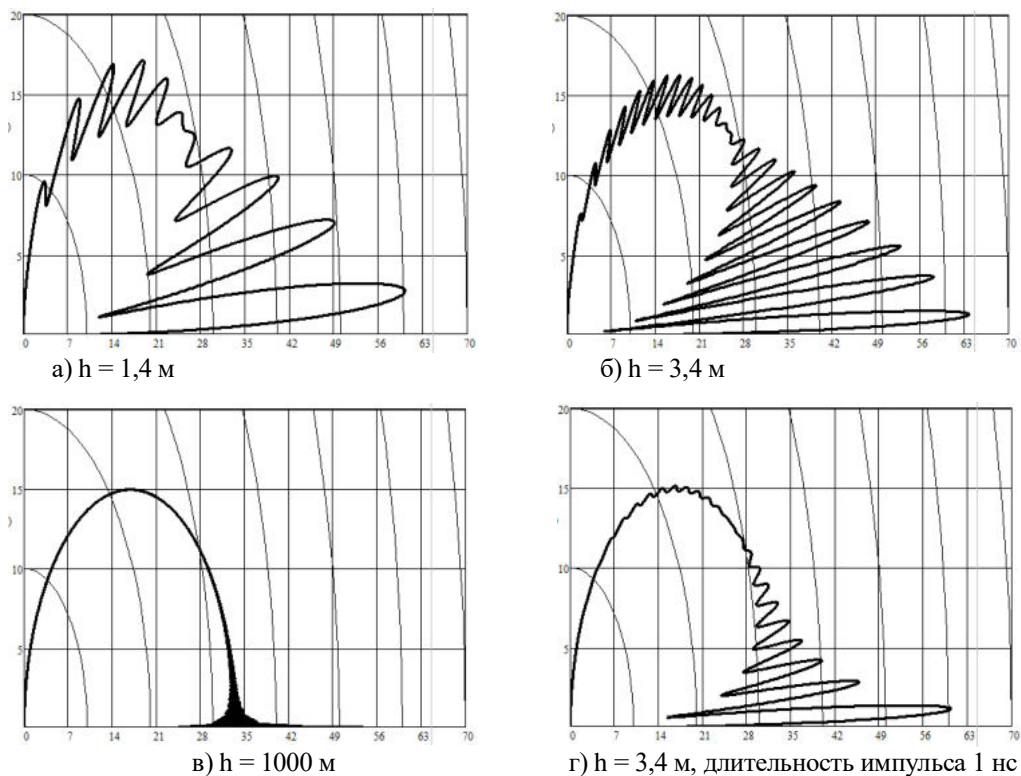


Рис. 3. Зона действия РЛС при различных высотах подъема антенны h (оси X и Y в км)

С помощью выражения (1) последовательно рассчитываются мощность принимаемого ЛА-1 сигнала, распространяющегося по прямому пути, а затем мощность сигнала, распространяющегося по пути с отражением от земли. Отметим, что для первого случая $D = R$, а для второго $D = L1 + L2$.

Рассчитанные значения мощностей используются в качестве параметров для полунатурного моделирования. Структурная схема стенда, позволяющего выполнить моделирование, приведена на рис. 4. Представленный стенд позволяет исследовать влияние отражения сигнала от земной поверхности на характеристики проектируемой РЛС.

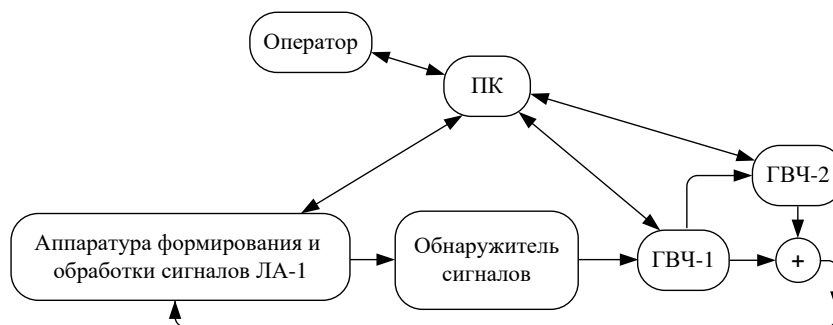


Рис. 4. Структурная схема стенда для полунатурного моделирования воздействия отражения на характеристики РЛС. ГВЧ-1 и ГВЧ-2 – первый и второй генераторы высокой частоты, соответственно

При полунатурном моделировании аппарата формирования и обработки сигналов ЛА-1 функционирует штатным образом. Комплекс из ПК, обнаружителя сигналов и ГВЧ-1 имитирует сигнал, излучаемый ЛА-2 и распространяющийся по прямому пути, а комплекс из ПК, обнаружителя сигналов и ГВЧ-2 – сигнал, распространяющийся по пути с отражением.

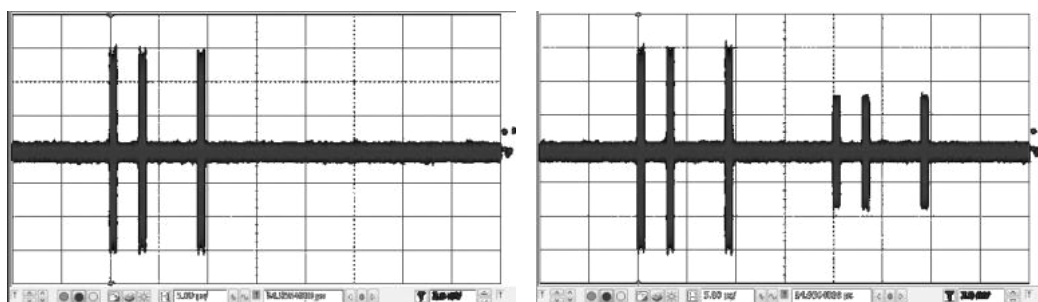
Формирование имитированных прямых и отраженных сигналов достигается за счет разработанного и функционирующего на ПК программного комплекса управления моделированием, а также за счет использования ГВЧ, поддерживающих функцию воспроизведения waveform-файлов (Dual-Arb Subsystem).

На рис.5 приведены результаты полунатурного моделирования влияния отраженного сигнала на принимаемый сигнал.

Выводы:

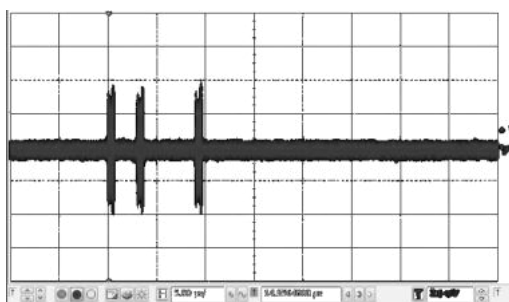
1. Предложенный подход решения геометрической задачи отражения характерен простотой и доступностью при реализации и использовании на ПЭВМ. Необходимо отметить, что при использовании данного подхода профиль моделируемой поверхности может быть задан произвольным образом, исходя из конкретных условий расположения разрабатываемой РЛС.

2. Расчет мощности приемного сигнала в системе «борт-борт», сделанный по предложенному авторами подходу, может использоваться для дальнейшего полунатурного моделирования воздействия отражения на характеристики РЛС. Рассмотренный стенд для полунатурного моделирования предоставляет возможность исследовать поведение проектируемой системы в условиях воздействия внешних факторов, варьируемых в широких диапазонах. Использование стенда может позволить существенно сократить расходы финансовых, временных, трудовых и интеллектуальных ресурсов при разработке и испытаниях изделий. Кроме этого, за счет доступности адаптации алгоритмов программного комплекса управления моделированием к новым требованиям, стенд может быть применен для создания схожих радиолокационных систем и средств как специального, так и гражданского назначения.



а) принимаемый сигнал при отсутствии отраженного сигнала

б) принимаемый сигнал с отраженным сигналом с задержкой 20 мкс



в) принимаемый сигнал с отраженным сигналом с задержкой 0 мкс

Рис. 5. Результаты полунатурного моделирования

Библиографический список

1. Системный анализ в фундаментальных и прикладных исследования / Под ред. В. В. Кузнецова. СПб: Политехника, 2014. 378 с.
2. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Советское радио, 1970. 560 с.
3. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов. М.: Связь, 1972. 336 с.
4. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Сколника. Перевод с англ. под общей ред. К. Н. Трофимова. Том 1. Основы радиолокации. М.: Советское радио, 1976. 456 с.
5. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: 1972. 424 с.
6. Ахияров В. В. Рассеяние на статистически неровной поверхности с произвольными корреляционными свойствами // Журнал радиоэлектроники. 2012. №2.
7. Монаков А. А. Теоретические основы радионавигации: Учебное пособие. СПб, ГУАП, 2002. 70 с.

УДК 621.37

АНАЛИЗ ПОМЕХ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА СИСТЕМУ НАВИГАЦИИ И ПОСАДКИ РСБН/ПРМГ, С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСНОГО СТЕНДА ИСПЫТАНИЙ

Г. А. Ершов, Ю. Т. Криворучко, Е. А. Сеницын, В. А. Сеницын, А. А. Марингос

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
ОАО «ВНИИРА»*

Интегрированный комплексный стенд испытаний (КСИ) должен быть инструментом Главного конструктора системы по обеспечению заданного набора требований ТТЗ, обеспечению сроков создания системы, конкурентоспособности и сокращения дополнительных финансовых и временных затрат. КСИ также может обеспечить эффективный анализ помех, действующих на радиоэлектронную систему (РЭС) навигации и посадки.

Под помехами, действующими на РЭС в настоящее время принято понимать всевозможные излучения, дополнительные к рабочему излучению РЭС, наводки в цепях приемников и изменения рабочего излучения, снижающие качество (эффективность) функционирования РЭС. Предполагается, что негативные изменения характеристик рабочего излучения производятся различного рода воздействиями на источник излучения, среду его распространения, а также на приемник РЭС. В таком понимании радиоэлектронные помехи весьма разнообразны, это делает актуальной задачу их систематизации, одним из важных элементов которой является классификация. Предлагаемая классификация помех представлена в таблице 1.

Таблица 1

Классификационный признак	Классы и подклассы помех
1	2
1. Вид используемых волн	1.1 Электромагнитные помехи
2. Диапазоны частот	2.1 Радиопомехи различных стандартизованных диапазонов частот, лежащих ниже частоты 9 ГГц
3. Происхождение	3.1 Естественные помехи 3.1.1 Собственные шумы антенны и приемников РЭС 3.1.2 Излучение окружающей среды и космических объектов 3.1.3 Отражения рабочего излучения РЭС от земной поверхности, местных предметов, метеорообразований, скоплений птиц и т.п. 3.2 Искусственные помехи 3.2.1 Преднамеренные (от специальных средств и мер создания) 3.2.2 Непреднамеренные (от других РЭС, взаимные помехи) 3.2.3 Индустриальные (от электрооборудования и других установок)
4. Путь проникновения в приемник РЭС	4.1 Наводимые в приемной антенне 4.2 Наводимые в цепях приемника через кожух, минуя антенну 4.3 Наводимые по цепям питания
5. Энергия, затрачиваемая на создание помехового излучения	5.1 Активные помехи 5.2 Пассивные помехи 5.3 Полуактивные (активно-пассивные) помехи

Таблица 1 (продолжение)

1	2
6. Объекты и задачи воздействия	6.1 Помехи средствам локации и навигации в различных режимах функционирования 6.1.1 Помехи обнаружению 6.1.2 Помехи следящему измерению 6.2 Помехи линиям связи в различных режимах функционирования 6.2.1 Помехи передаче сообщений 6.2.2 Помехи передаче служебных сообщений 6.2.3 Помехи вхождению в связь 6.2.4 Помехи синхронизации связи
7. Характер взаимодействия с рабочим излучением РЭС	7.1 Аддитивные помехи 7.2 Мультипликативные (модулирующие) помехи 7.3 Аппликативные (аддитивно-мультипликативные помехи)
8. Эффекты воздействия	8.1 Помехи скрывающие (маскирующие) сигнал 8.2 Помехи, ослабляющие сигнал 8.3 Помехи, имитирующие сигнал 8.4 Искажающие характеристики тракта приема и обработки сигналов
9. Вид модулируемого помехового или рабочего излучения (последнее при создании помех пассивной локации и разведки)	9.1 АМ, ИМ, прерывистые 9.2 ЧМ 9.3 ФМ 9.4 Поляризационно-модулированные 9.5 Модулированные по направлению излучения 9.6 Модулированные по положению фазового центра излучения (направлению прихода излучения)
10. Статистическая структура помехового излучения	10.1 Помехи в виде случайных процессов 10.1.1 Прямошумовые помехи 10.1.2 Модулированные шумом по одному или нескольким параметрам 10.1.3 Хаотические импульсные помехи 10.2 Помехи в виде колебаний со случайными параметрами 10.3 Детерминированные помехи
11. Степень пространственной когерентности	11.1 Некогерентные 11.2 Частично когерентные 11.3 Когерентные
12. Степень статистической связи с сигналом	12.1 Независимые от сигнала 12.2 Коррелированные с сигналом 12.3 Жестко связанные с сигналом
13. Способ формирования	13.1 Генерируемые по априорным данным о сигнале 13.2 Ответно-генерируемые по данным непосредственной разведки излучений подавляемых РЭС 13.3 Формируемые из излучаемого рабочего сигнала РЭС с использованием ретрансляторов 13.3.1 Помехи – копии сигнала 13.3.2 Помехи – преобразованные копии сигнала

Таблица 1 (окончание)

1	2
14. Вид используемого канала приема излучений в подавляемых РЭС	14.1 Помехи по основным каналам приема излучений (по главному лепестку ДНА, на несущей частоте, по главному лепестку функции неопределенности сигнала (ФНС), на основной поляризации и т.п.) 14.2 Помехи по побочным каналам приема 14.2.1 Помехи по боковым лепесткам ДНА 14.2.2 Помехи по боковым лепесткам ФНС 14.2.3 Ортогонально поляризованные помехи 14.2.4 Внеполосные помехи: по скатам АЧХ приемника, по зеркальному каналу, по промежуточной частоте, гетеродинные, интермодуляционные и т.п.

Структура КСИ рассмотрена в [1]. Прием информационных сигналов и помех осуществляется на выдвижную телескопическую электромеханическую мачту КСИ с высотой подъема до 18 метров (рис. 1.), где устанавливается самолетная антенна АП-018Т.

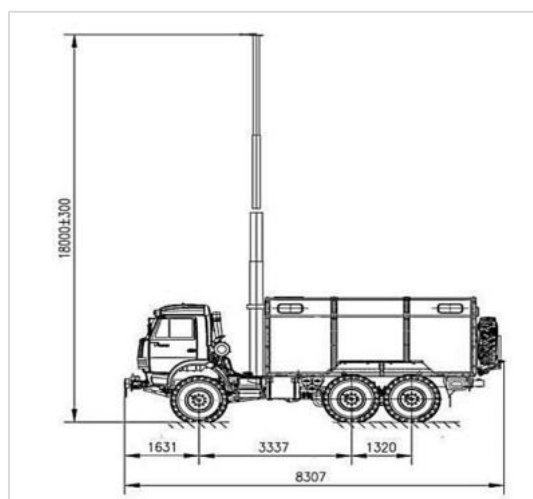


Рис. 1. Схема автомобиля «КАМАЗ» с выдвижной электромеханической мачтой

Основными функциональными блоками КСИ являются комплекты бортового оборудования А-331-06М и РСБН-НП, позволяющие взаимодействовать с радиомаяками ближней навигации (ТРОПА-СМД) и посадочной радиомаячной группой (ПРМГ-ОМД), как в отечественном, так и в международном диапазоне частот [1].

Прибор ПЭВМ «ТЕСТ-МКК», входящий в КСИ (рис. 2) выступает в качестве приемника, обработчика и индикатора навигационной информации и воздействующих помех, поступающей от бортового оборудования А-331-06/РСБН-НП и анализатора спектра (рис. 3). В качестве средства определения положения и пеленга применяется спутниковый навигационный приемник GPS/ГЛОНАСС, входящий в анализатор спектра.

Характерные для последних лет высокие темпы развития бортового электронного оборудования вошли в противоречие с длительными сроками разработки и эксплуатации дорогостоящих военных ЛА. Частично разрешить это противоречие поможет принятие комплексной концепции создания аппаратурно-интегрированного комплекса радиоэлектронной аппарату-

ры в виде базового комплекса бортового оборудования (БК БО), который не привязан к конкретному типу ЛА [3,4]. Идеология построения такого комплекса предусматривает создание демонстрационного образца БК БО в виде набора низкочастотных и высокочастотных ФКМ и программно-математических модулей, стыкуемых в стендово-имитационной среде (СИС) КСИ [4]. СИС должен обеспечивать единый технологический цикл исследований, разработки, производственного изготовления и различных видов испытаний и преемственности программно-аппаратных средств обработки КБ БО на всех этапах жизненного цикла, включая модернизацию ЛА. Составной частью СИС является бортовой навигационно-посадочный комплекс (БНПК) и поэтому на него распространяется предлагаемая идеология создания СИС.



Рис. 2. Внешний вид ПЭВМ «ТЕСТ-МКК»

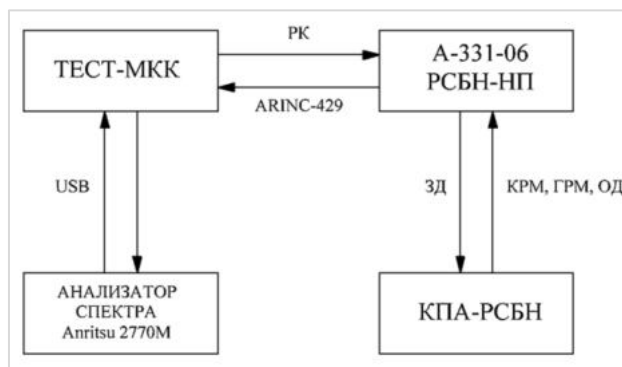


Рис. 3. Структурная схема информационного обмена ПЭВМ, бортовой аппаратуры и анализатора спектра сигналов и помех

При проектировании бортовой аппаратуры ЛА пятого поколения, в частности бортовых навигационно-посадочных комплексов (БНПК) задача создания СИС по сложности сравнима с задачей создания БНПК. Одним из важнейших аспектов создаваемой СИС является разработка математических моделей и алгоритмов моделирования внешних сигналов, поступающих на входы приемных устройств БНПК. Аппаратура навигации и посадки самолетов пятого поколения проектируется на основе новых концептуальных подходов:

- когнитивная структура системы обработки радионавигационных сигналов;
- магистрально-модульная архитектура аппаратного и программного обеспечения БНПК.
- аппаратная интеграция бортовых навигационно-посадочных датчиков, включая РСБН/ПРМГ, MLS, GPS/GLONASS, TACAN, ILS, VOR, DME[2], позволяющая динамически

перераспределять ресурсы при обработке сигналов в условиях возможных информативных конфликтов.

Необходимость создания моделей внешней среды, в частности моделей электромагнитных сигналов, непреднамеренных и преднамеренных помех диктуется новой концепцией проектирования аппаратуры. При проведении ОКР стендово-имитационной среде КСИ отводится важнейшая роль, поскольку она используется на протяжении всего жизненного цикла системы – от замысла до испытаний и серийного выпуска. Синтезу математических моделей электромагнитных сигналов, присутствующих на входах приемных устройств бортового радионавигационного оборудования посвящено большое количество научных работ, которые можно разделить на две группы:

- работы, в которых используются теоретические подходы к построению математических моделей сигналов [5, 7];
- работы, основанные на экспериментальных данных, полученных во время натурных испытаний радионавигационного оборудования.

Первая группа работ дает возможность построить или использовать разработанные ранее математические модели входных сигналов для широкого диапазона их наблюдения.

Вторая группа работ, основанная на экспериментальных данных, позволяет синтезировать математические модели для конкретных условий наблюдения сигналов (как информационных, так и мешающих). Эти модели, являясь результатом эксперимента, со статистической точки зрения не являются противоречивыми. Некоторым недостатком такого подхода является необходимость проведения большого числа экспериментов для представляющих интерес для разработчика условий наблюдения сигналов.

При разработке БНПК самолетов нового поколения представляется целесообразным использовать работы второй группы, позволяющие проверить проектируемую аппаратуру с помощью КСИ в процессе натурных испытаний. В процессе создания стендово-имитационной среды на базе КСИ при отработке БНПК (А-331-06М, РСБН-НП) с наземным оборудованием (Тропа-СМ, ПРМГ-ОМД) представляется целесообразным формирование банка математических моделей внешних сигналов, присутствующих на входах приемных устройств БНПК в условиях конкретного аэродрома.

По аналогии с работой [6] рассмотрим вероятностную оценку поражения типового приемника радионавигационных сигналов. В общем случае, будем считать, что радионавигационные системы в гражданской и военной авиации являются системами сбора, обработки и передачи информации. С точки зрения обеспечения безопасности и регулярности полетов их функционирование должно оцениваться достоверностью информации [6]. Требования к достоверности информации, получаемой в бортовой радионавигационной аппаратуре, определяются действующими нормативными документами. К нормируемым показателям относятся максимальные ошибки измерения навигационных параметров, которые в первую очередь определяются отношением мощности принятого полезного сигнала P_c к мощности мешающих сигналов (помех – P_n и собственного шума $P_{ш}$):

$$q_{\text{вых}} = \frac{P_c}{P_n + P_{ш}}. \quad (1)$$

Этот показатель может быть принят критерием качества функционирования радионавигационной аппаратуры в условиях воздействия помех.

В общем случае параметр $q_{\text{вых}}$ может быть представлен в виде некоторого функционала, который описывает алгоритм обработки входного сигнала в приемнике:

$$q_{\text{вых}} = \Phi(\vec{X}_c, \vec{X}_n, \vec{A}), \quad (2)$$

где \vec{X}_c – вектор параметров сигнала, \vec{X}_n – вектор параметров помех, \vec{A} – вектор параметров, характеризующих техническое состояние

Условием работоспособности является выражение:

$$q_{\text{вых}} > q_{\text{вых, доп}}. \quad (3)$$

При этом $q_{\text{вых.доп}}$ определяется назначением системы. Исходя из соотношений (1,2,3), можно по аналогии с [6] сформулировать основные методы обеспечения требуемого качества функционирования РЭС при воздействии помех. Качество функционирования РЭС, в частности радионавигационных систем, зависит от технического состояния радиосредств. При этом предусматривается подход [6], позволяющий свести влияние помех к эквивалентному изменению параметров, которое отражается в следующем виде:

$$q_{\text{вых}} = \{ \vec{A}(\vec{X}_c, \vec{X}_n) \}. \quad (4)$$

Зная прогноз изменения параметров сигнала и помех, можно выделить область $\vec{A}_{\text{доп}}$ такую, которая при выполнении условия $\vec{A} \in \vec{A}_{\text{доп}}$ выполняет неравенство (3).

Таким образом, учесть влияние помех в рамках сложившегося варианта эксплуатации можно, например, за счет выбора номинальных значений и эксплуатационных допусков на параметры РЭС.

Решение этих задач требует наличия анализа и долговременного прогноза параметров помех. Параметры сигнала и помех определяются множеством случайных факторов, влияние которых рассредоточено в пространстве и во времени. Поэтому прогнозирование помеховых ситуаций является сложной задачей, требующей большого объема статистических исследований, результаты которых быстро устаревают из-за ввода в эксплуатацию новых радиосредств. Кроме того, статистические характеристики помех могут изменяться в широких пределах за время, сравнимое с продолжительностью полета. Следовательно, в каждом случае будет своя область $\vec{A}_{\text{доп}}$, в пределах которой обеспечивается заданное качество функционирования. Учитывая, что основными источниками электромагнитных помех являются РЭС, входящие в комплекс радиосредств УВД, можно добиться улучшения электромагнитной обстановки с помощью рационального распределения рабочих частот между отдельными РЭС комплекса. Таким образом, снизится вероятность поражения радионавигационного приемника помехой, оперируя частотными параметрами сигнала \vec{X}_c и помех \vec{X}_n .

Экспериментальные данные доказывают, что основной причиной влияния помех на качество функционирования радиосредств является низкая помехоустойчивость радиоприемных устройств. При этом помехоустойчивость приемника в первую очередь определяется алгоритмом обработки входного воздействия. Наиболее перспективными в этом качестве являются оптимальные методы обработки в магистрально-модульных системах обработки радионавигационных сигналов.

Требования к характеристикам радионавигационного приемника, удовлетворение которых необходимо для обеспечения заданного качества приема, изменяются в соответствии с изменением параметров сигнала и помех. Поскольку параметры сигнала и помех изменяются относительно быстро, то наиболее перспективным является метод, направленный на разработку алгоритмов оперативного управления параметрами приемника в соответствии с изменением характеристик сигнала и помех непосредственно во время применения РЭС по назначению. Для решения этой задачи необходимо оценить влияние помех и параметров приемника на качество функционирования РЭС с целью выбора таких параметров приемного устройства, оперативное управление которыми позволяет улучшить качество приема при воздействии электромагнитных помех. Оценка влияния помех требует знания как частотных, так и амплитудных параметров электромагнитных помех. Учитывая, что основой снижения взаимовлияния РЭС является частотная селекция, наиболее существенным является соотношение между частотными параметрами помехи и приемника [6]. В первую очередь необходимо знание расстроек каждой из помех относительно частоты настройки приемника. То есть необходимо проведение анализа параметров помех, воздействующих на БНПК, с помощью анализатора спектра и ПЭВМ «ТЕСТ-МКК», входящих в КСИ (рис. 3).

Кроме перечисленных параметров, вероятность поражения приемника помехой в значительной мере определяется полосой пропускания приемника, то есть чем меньше полоса, тем меньше вероятность поражения.

В работе Куклева Л.П. [8] подробно рассмотрено влияние шумовых и импульсных помех на точность определения равносигнального направления в курсоглиссадной системе посадки ПРМГ дециметрового диапазона. Полученные в статье соотношения позволяют установить допустимый уровень интенсивности помех по заданной ошибке измерения и будут использованы при разработке ПО анализа помех от сотовой связи [8,9].

В работе Чокоей В.З. [10] рассмотрены математические подходы к первичному анализу статистических данных по наблюдаемым процессам и подбора для них адекватных теоретических распределений, а также оценки параметров подобранных распределений. Это позволит сформировать пакет анализа помех в ПЭВМ «ТЕСТ-МКК» КСИ.

Заключение. Комплексный стенд испытаний является перспективным инструментом для оценки параметров работы наземного и бортового оборудования навигации и посадки и анализа помех, воздействующих на радионавигационные системы навигации и посадки. Применение КСИ при проведении испытаний систем таких как ТРОПА-СМД, ПРМГ-ОМД, MLS, так и других систем повысит эффективность и снизит затраты на проведения наземных испытаний РЭС, в том числе при поиске, обнаружении и устранении неисправностей, анализе помех, включая помехи от мобильной сотовой связи GSM-900. При проектировании стенда были применены принципы когнитивности, магистрально-модульности и унификации аппаратных и программных составных частей. Немаловажной особенностью КСИ выступает способность к быстрому развертыванию и модернизации в части расширения функций и решения новых задач, включая функции:

- обнаружение и анализ источников преднамеренных и непреднамеренных радиопомех;
- определение местоположения источников преднамеренных и непреднамеренных радиопомех, а также оценка степени их влияния на систему РСБН/ПРМГ;
- контроль функционирования системы РСБН/ПРМГ в части использования радиочастотного спектра, включая отечественный и международный диапазон.

Современное радиотехническое бортовое оборудование (А-331-06М и РСБН-НП) совместно с вычислительными мощностями ПЭВМ «ТЕСТ-МКК», специализированным ПО и аппаратурой контроля (КПА-РСБН) делает КСИ удобным инструментом разработчиков как бортовых, так и наземных систем на этапах испытаний и эксплуатации систем навигации и посадки.

Библиографический список

1. Ершов Г. А., Король В. М., Криворучко Ю. Т., Максименко М. Д., Переломов В. Н., Синицын Е. А., Шатраков Ю. Г. Радиомаячная система инструментального захода воздушных судов на посадку категории II для работы в дециметровом отечественном и международном диапазонах волн ПРМГ-ОМД // *Новости навигации*. 2017. №1. С. 16 – 19.
2. Криворучко Ю. Т., Музелин Ю. Н., Пономаренко Б. В. Совершенствование систем и средств посадки высокоманевренных летательных аппаратов классов 4++ и 5 // *Новости навигации*. 2018. №3. С. 17 – 26.
3. Исаев С. А., Кондратенков Г. С. Цифро-натурные и летно-модельные методы испытаний КБО // *Радиотехника*. 1996. №9. С. 124 – 128.
4. Андросов В. А., Епатко И. В. Задачи и принципы построения стендово-имитационной среды для отработки интегрированных комплексов бортового оборудования // *Радиотехника*, 1996. №9. С. 120 – 123.
5. Изранцев В. В., Шенета Д. А. Моделирование внешних сигналов бортовых приборных комплексов летательных аппаратов пятого поколения // *Научное приборостроение*. 2000. Т. 10. №2. С. 14 – 19.
6. Стаднюк А. П. Вероятностная оценка поражения помехами приемника радионавигационных сигналов // *Научный Вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиотехника*. 2009. №139. С. 17 – 22.

7. Пахолков Г. А., Збрицкая Г. Е., Криворучко Ю. Т., Пономаренко Б. В., Шатраков Ю. Г. Обработка сигналов в радиотехнических системах ближней навигации. М.: Радио и связь, 1992. 256 с.

8. Куклев Л. П. Влияние помех на точность определения равносигнального направления в курсоглиссадной системе посадки дециметрового диапазона // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОВР. 1989. Вып.2. С. 36 – 42.

9. Занозин А. В., Миханов Н. П., Сай П. А. Повышение защищенности бортового приемника радиотехнической системы ближней навигации и посадки от помех подвижной радиосвязи стандарта GSM-900 // Радиотехника. 2009. № 1. С. 113 – 116.

10. Чокой В. З. Компьютерные средства описательной статистики-первичного анализа и подбора теоретических распределений для наблюдаемых процессов // Международный информационно-аналитический журнал «CredeExperto: транспорт, общество, образование, язык». № 1(12). Март 2017 (<http://ce.if-mstuca.ru>).

УДК 621.37

АЛГОРИТМЫ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТНОЙ ИНФОРМАЦИИ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ВТОРИЧНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

В. А. Завьялов, В. Г. Котельников, В. А. Сеницын, Е. А. Цыбра, В. Т. Яковлев

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
ОАО «ВНИИРА»*

Рассмотрен алгоритм определения координат летательных аппаратов во вторичной многопозиционной системе наблюдения (МПСН) и определена потенциально достижимая точность оценивания координат летательных аппаратов в ней.

В МПСН имеется возможность определения трех координат за счет измерения трех или более дальностей до цели. В общем случае дальность для каждой позиции в декартовой системе координат:

$$D_n(t_i) = \sqrt{(x - x_n)^2 + (z - z_n)^2 + (y - y_n)^2}, \quad (1)$$

где (x, y, z) , (x_n, z_n, y_n) – координаты цели и n -ной позиции.

Задача определения координат летательного аппарата по совокупности измерений дальностей в МПСН является нелинейной задачей оценивания.

Оценка координат летательного аппарата уточняется исходя из выражения (2)

$$\hat{X}(t_i) = X_{Л}(t_i) + \left(\sigma_x(t_i) \quad \sigma_z(t_i) \quad \sigma_y(t_i) \right)^T, \quad (2)$$

где t_i – момент дискретного времени, $\hat{X}(t_i) = \left(\hat{x}(t_i) \quad \hat{z}(t_i) \quad \hat{y}(t_i) \right)^T$ – оценка вектора состояния, $X_{Л}(t_i) = \left(x_{Л}(t_i) \quad z_{Л}(t_i) \quad y_{Л}(t_i) \right)^T$ – координаты точки линеаризации, $\sigma_x(t_i)$, $\sigma_z(t_i)$, $\sigma_y(t_i)$ – соответствующие ошибки оценивания вектора состояния. Точка линеаризации задается в начале алгоритма, перебираются наиболее вероятные координаты летательного аппарата, при наличии информации о предыдущем корректном местоположении ЛА принимаются координаты этого места.

Вектор измерения $Z(t_i) = (D_1(t_i), D_2(t_i), \dots, D_n(t_i))^T$, содержащий дальности, полученные для каждой позиции МПСН, связан с вектором состояния ЛА $X(t_i)$ соотношением (3)

$$Z(t_i) = h[X(t_i)] + \omega(t_i), \quad (3)$$

где h – нелинейное преобразование вектора состояния ЛА в вектор измерения, $\omega(t_i)$ – вектор ошибки измерений с $E[\omega(t_i)\omega^T(j)] = R'(t_i) = \text{diag}(\sigma_{D_1}^2, \sigma_{D_2}^2, \dots, \sigma_{D_n}^2)$. Исходя из выражения дальности (1) и выражения (3) получаем (4).

$$\begin{pmatrix} D_1(t_i) \\ D_2(t_i) \\ \vdots \\ D_n(t_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(x(t_i) - x_1)^2 + (z(t_i) - z_1)^2 + (y(t_i) - y_1)^2} \\ \sqrt{(x(t_i) - x_2)^2 + (z(t_i) - z_2)^2 + (y(t_i) - y_2)^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(x(t_i) - x_n)^2 + (z(t_i) - z_n)^2 + (y(t_i) - y_n)^2} \end{pmatrix} + \omega(t_i) \quad (4)$$

Зная ошибку измерения позиции МПСН, можно получить ошибку оценивания состояния ЛА, используя нелинейные преобразования из пространства вектора измерений (псевдодальности) в пространство вектора состояния ЛА (координаты). Векторы $Z(t_i)$ и $X(t_i)$ связаны функциональной зависимостью

$$Z(t_i) = h[X(t_i)]. \quad (5)$$

Дифференцируя (5), получим

$$dZ(t_i) = \frac{\partial h[X(t_i)]}{\partial X(t_i)} dX(t_i). \quad (6)$$

Обозначив Якобиан $J_h(t_i) = \left(\frac{\partial h(X)}{\partial X} \Big|_{X=X(t_i)} \right)$ и переходя к приращениям получим

$$\Delta Z(t_i) = J_h(t_i) \cdot \Delta X(t_i) \quad (7)$$

В случае существования матрицы Мура-Пенроуза $J_h^+(t_i)$ псевдообратной к $J_h(t_i)$, для каждой из координат местоположения ЛА в качестве критерия оценки потенциально достижимой точности ее определения по результатам одиночной группы измерений дальности, приведенной к моменту дискретного времени t_i , можно принять квадратный корень из соответствующего диагонального члена матрицы $R(t_i)$, определяемой из выражения

$$R(t_i) = \begin{pmatrix} \sigma_x(t_i) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_z(t_i) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_y(t_i) \end{pmatrix} = J_h^+(t_i) \cdot R'(t_i) \cdot (J_h^+(t_i))^T. \quad (8)$$

Зная дисперсии ошибок определения каждой координаты ЛА, можно определить среднеквадратическую ошибку оценивания координат ЛА относительно заданной геометрии МПСН в соответствии с выражением (9).

$$\sigma_{\text{ноз}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 + \sigma_y^2}, \quad (9)$$

где $\sigma_x^2, \sigma_z^2, \sigma_y^2$ – диагональные члены матрицы $R(t_i)$.

Значения среднеквадратической ошибки оценивания координат ЛА относительно заданной геометрии в горизонтальной и в вертикальной плоскости определяются исходя из выражений (10)–(11).

$$\sigma_{\text{поз гор}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2} \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{поз верт}} = \sqrt{\sigma_y^2} \quad (11)$$

На рис. 1 и рис. 2 приведен результат расчета среднеквадратической ошибки оценивания координат ЛА в горизонтальной плоскости (XoZ) для $\sigma_D = 3 \text{ м}$ для заданного расположения позиций.

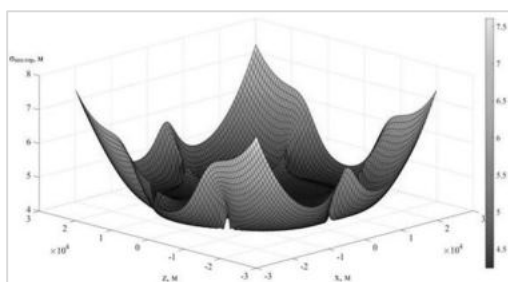


Рис. 1. SKO оценивания координат ЛА для МПСН

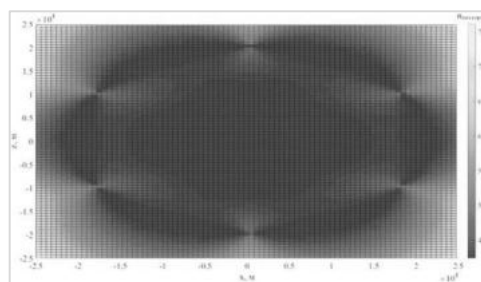


Рис. 2. SKO оценивания координат ЛА для МПСН (вид в плоскости XoZ)

Анализ приведенных результатов позволяет сделать вывод о приемлемой потенциальной точности оценивания координат местоположения ЛА средствами МПСН в зоне ее ответственности, даже по результатам одиночной группы измерений.

УДК.929

160 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ А. С. ПОПОВА

С. И. Исляев, А. А. Козлов, А. Г. Отцовский

ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

«Я русский человек, и все свои знания, весь свой труд, все свои достижения имею право отдать только своей Родине И если не современники, то, может быть, потомки наши поймут, сколь велика моя преданность Родине и как счастлив я, что не за рубежом, а в России открыто новое средство связи».

А. С. ПОПОВ (1859 – 1906)

В 2019 г. исполнилось 160 лет со дня рождения изобретателя радио *Александра Степановича Попова*.

Александр Степанович Попов родился 4 (16) марта 1859 г. на Урале в поселке Турьинские Рудники. В семье его отца, местного священника, кроме Александра было еще 6 человек детей. Отец его, Степан Петрович, был священником; впоследствии он открыл «домашнюю школу» для всех желающих. Мать Саши, Анна Степановна, помогала мужу по школе.

В 1870 г. одиннадцатилетний Саша продолжает обучение в духовном училище в Екатеринбурге. Окончив четыре класса семинарии, Александр принял решение переехать в Петербург, где уже учился его брат Рафаил, и поступить в университет.

31 августа 1877 г. А. С. Попов был зачислен в Петербургский университет на физико-математический факультет. В университете преподавали такие известные личности, как Д. И. Менделеев, Ф. Ф. Петрушевский, П. Л. Чебышев и др. Ректором университета был ученый-ботаник А. Н. Бекетов, стремившийся к улучшению жизни студентов. Первые годы учебы в университете сложились для А. С. Попова тяжело. Александр, не желая оставаться на попечительстве у брата, который, окончив университет, работал журналистом, помогал ему в издательстве.



Вскоре Александр тяжело заболевает, и провалил экзамен на второй курс. Александр поселился отдельно от брата, а деньги решил зарабатывать, давая частные уроки, как делали тогда многие студенты. Средств не хватало, и Александр был вынужден подрабатывать электромонтером в конторе «Электротехник». В эти годы окончательно сформировались научные взгляды Попова: его особенно привлекали проблемы новейшей физики и электротехники.

Успешно окончив университет в 1882 г., А. С. Попов получил приглашение остаться там для подготовки к профессорской деятельности по кафедре физики. Но молодого ученого больше привлекали экспериментальные исследования в области электротехники, и он поступил преподавателем физики и электротехники в Минный офицерский класс в Кронштадте, где имелся хорошо оборудованный физический кабинет. В 1890 г. получил приглашение на должность преподавателя физики в Техническое училище Морского ведомства в Кронштадте. В этот период все свое свободное время он посвящает физическим опытам, главным образом изучению электромагнитных колебаний. В 1901 г. А. С. Попова назначили профессором Петербургского электротехнического института, а в 1905 г. его избрали ректором этого института. Попов был почетным инженером-электриком (1900) и почетным членом Русского технического общества (1901).

Работы А. С. Попова были высоко оценены его современниками в России и за рубежом: так, его приемник был удостоен Большой золотой медали на Всемирной выставке (1900) в Париже. Особым признанием заслуг А. С. Попова явилось постановление Совета министров СССР, принятое в 1945 г., которым установлен День радио (7 мая) и учреждена золотая медаль имени А. С. Попова, присуждаемая АН СССР за выдающиеся работы и изобретения в области радио. В том же году было основано Всесоюзное научно-техническое общество радиотехники и связи им. А. С. Попова (ныне РНТОРЭС). Имя А. С. Попова носят: Школа связи в Кронштадте, Военно-морской институт радиоэлектроники (ВМИРЭ) им. А. С. Попова, в Санкт-Петербурге (Петродворец) Одесский электротехнический институт связи, Центральный музей связи, Научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи, улица в Санкт-Петербурге, где он жил, и др. Научные исследования А. С. Попова относятся к различным проблемам электротехники и радиотехники. А. С. Попов повторил опыты Г. Герца и впервые предложил использовать их для радиосвязи (рис. 1, 2).

Искровой разрядник (передатчик) возбуждал электромагнитные колебания в антенне под действием радиоволн, принятых антенной; металлические опилки в когерере сцеплялись, и он начинал пропускать электрический ток от батарей. Срабатывало реле, включался звонок, а когерер получал встряску от молоточка звонка; сцепление между опилками ослабевало, и когерер был готов принять следующий сигнал.

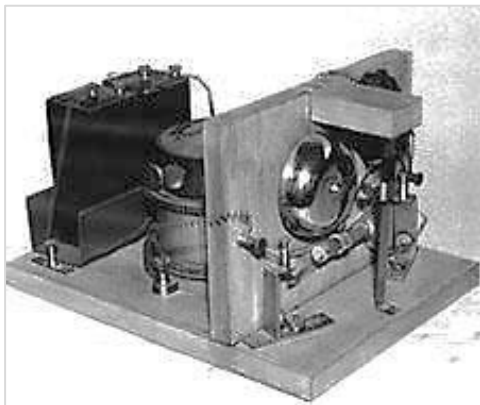


Рис. 1. Первый приемник

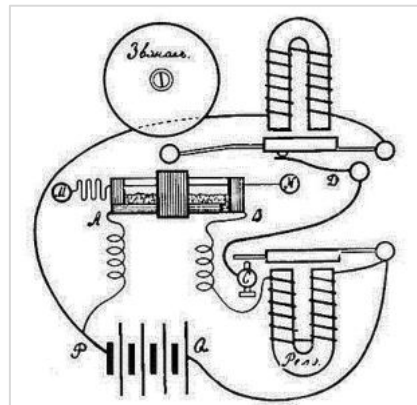


Рис. 2. Схема радиоприемника, сделанная А. С. Поповым: *N* – контакт звонка; *A, B* – выводы когерера; *C* – контакт реле; *P, Q* – выводы батареи; *M* – контакт антенны

25 апреля (7 мая) 1895 г. А. С. Попов продемонстрировал «грозоотметчик» – прибор для приема сигналов от грозовых разрядов. 24 марта 1896 г. передал первую в мире радиограмму, состоящую из двух слов: «Генрих Герц». А. С. Попов дружил с Г. А. Любославским, который в то время работал в Лесном институте и заведовал метеорологической обсерваторией. Здесь Попов установил свой прибор, называемый грозоотметчиком (рис. 3). С его помощью грозоотметчика ученый собирался изучить естественный источник сигналов, т. е. грозовые разряды. В схеме грозоотметчика (рис. 4) при приеме сигнала уменьшается сопротивление когерера и замыкается цепь вспомогательного реле, которое, сработавшая, замыкает цепь электрического звонка; молоточек последнего не только создает звук, ударяя в колокольчик, но одновременно, ударяя по когереру, встряхивает последний и делает его готовым для приема дальнейших сигналов.



Рис. 3. Внешний вид грозоотметчика

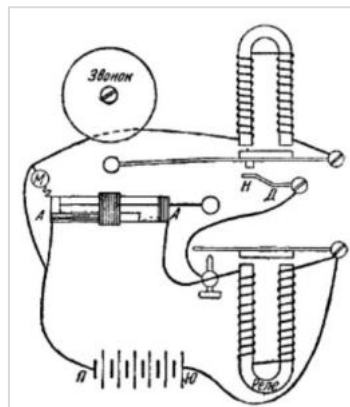


Рис. 4. Схема грозоотметчика

Приемный грозоотметчика контур содержит также длинный провод – прообраз современной антенны, обеспечивающий извлечение значительной энергии из поля проходящей электромагнитной волны. Таким образом, в схеме грозоотметчика имеются важнейшие элементы радиоприемной схемы: антенна, обратная связь (принимаемый сигнал автоматически приводит когерер в рабочее состояние) и реле, в котором отражен современный принцип уси-

ления. В грозоотметчике не использован лишь принцип резонанса; но, поскольку речь шла о приеме грозových разрядов, спектр которых недостаточно изучен даже в наше время, явление резонанса не могло быть использовано. Да и впоследствии, когда начала развиваться радиосвязь, явлением резонанса воспользовались далеко не сразу, так как в те времена учет влияния антенны на излучаемую (или принимаемую) частоту был невозможен, а методов измерения частоты не существовало. Итак, схема грозоотметчика содержала все важнейшие элементы приемной схемы, а потому ее и следует считать первым в мире радиоприемником, а осуществляемый с ее помощью прием – первой в мире радиосвязью; дальность действия этой радиосвязи составляла 25 – 30 км.

В 1897 г. А. С. Попов начал работы по беспроволочному телеграфированию. В 1901 г. достиг дальности радиосвязи около 150 км. На Всемирной выставке в Париже А. С. Попов был награжден золотой медалью (1900).

Прибор А. С. Попова возник из установки для учебной демонстрации опытов Герца, построенной с учебными целями еще в 1889 г.; вибратор Герца служил Попову передатчиком.

В начале 1895 г. А. С. Попов заинтересовался опытами Лоджа (усовершенствовавшего когерер и построившего на его основе радиоприемник, с помощью которого в августе 1894 г. сумел получить радиосигналы с расстояния 40 м), и попытался воспроизвести их, построив собственную модификацию приемника Лоджа.

Главное отличие приемника Попова от приемника Лоджа состояло в следующем: когерер Бранли–Лоджа представлял собой стеклянную трубку, наполненную металлическими опилками, которые могли резко – в несколько сотен раз – менять свою проводимость под воздействием радиосигнала. Для приведения когерера в первоначальное состояние для детектирования новой волны его нужно было встряхнуть, чтобы нарушить контакт между опилками. У Лоджа к стеклянной трубке приставлялся автоматический ударник, который бил по ней постоянно; А. С. Попов ввел в схему автоматическую обратную связь: от радиосигнала срабатывало реле, которое включало звонок, и одновременно срабатывал ударник, ударявший по стеклянной трубке с опилками. В своих опытах А. С. Попов использовал заземленную мачтовую антенну, изобретенную в 1893 г. Н. Теслой. Впервые он представил свое изобретение 25 апреля (7 мая по новому стилю) 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества (РФХО) в Петербургском университете. В опубликованном описании своего прибора, А. С. Попов отмечал его пользу для лекционных целей и регистрирования пертурбаций, происходящих в атмосфере; от также выразил надежду, что «мой прибор, при дальнейшем усовершенствовании его, может быть применен к передаче (на деле – к приему) сигналов на расстоянии при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающий достаточной энергией» (позднее, с 1945 г. это событие будет отмечаться в СССР, а затем в Российской Федерации как **День радио**).

А. С. Попов соединил свой прибор с пишущей катушкой братьев Ришар и таким образом получил прибор для регистрации электромагнитных колебаний в атмосфере. Однако, когда в печати появились первые сведения об изобретении радиотелеграфа Маркони, продемонстрировал передачу радиogramм на 3 км.

2 сентября 1895 г. А. С. Попов начал утверждать, что приоритет в радиотелеграфировании принадлежит ему, и что его прибор идентичен прибору Г. Маркони. Тем не менее 19 (31) октября 1897 г. А. С. Попов докладывал в электротехническом институте: *«Здесь собран прибор для телеграфирования. Связной телеграммы мы не сумели послать, потому что у нас не было практики, все детали приборов нужно еще разработать»*.

С 1897 г. А. С. Попов проводил опыты по радиотелеграфированию на кораблях Балтийского флота. Летом 1899 г., когда А. С. Попов был в Швейцарии, его ассистенты – П. Н. Рыбкин и Д. С. Троицкий – при проведении работ между двумя кронштадтскими фортами случайно обнаружили, что когерер при уровне сигнала, недостаточном для его возбуждения, преобразует амплитудно-модулированный высокочастотный сигнал в низкочастотный, так что его сигналы принимаются на слух. При известии об этом, А. С. Попов модифицировал

свой приемник, поставив вместо чувствительного реле телефонные трубки. Летом 1901 г. была получена русская привилегия № 6066, группа XI, с приоритетом 14 (26) июля 1899 г. на новый (линейно-амплитудный) тип «телеграфного приемника депеш, посылаемых с помощью какого-либо источника электромагнитных волн по системе Морзе». После этого фирмой Дюкрете, уже выпускавшей в 1898 г. приемники его конструкции, был налажен выпуск телефонных приемников.

В 1880 г. А. С. Попов вступил в товарищество «Электротехник». Тогда же он женился на Раисе Алексеевне Богдановой. Репетиторством было трудно заработать на содержание семьи, да и времени оно отнимало много. Товарищество «Электротехник» также испытывало материальные трудности и в конце концов, в 1883 г. прекратило свое существование. Но тут «подвернулась» работа в Минном офицерском классе. Сначала А. С. Попов был лаборантом, а впоследствии он – еще молодой специалист – стал преподавать сам.

В 1887 г. А. С. Попов едет в Красноярск в составе экспедиции для наблюдения солнечного затмения 7 августа 1887 г. Работа прошла без особых затруднений, и через шесть месяцев экспедиция вернулась назад. Семья Поповых пополнялась. В 1884 г. у Александра и Раисы родился первенец Степан, а через три года – второй сын, Александр. Вместе с семьей росли и расходы. В 1889 г. А. С. Попову предложили место директора электростанции в Нижнем Новгороде (она обслуживала местную ярмарку). Он дал согласие.

Работа Попова была напряженной: с октября по май – преподавание в минном классе, летом – работа на электростанции. И все же он находил время и силы для научной работы. Нередко за полночь засиживался ученый в физическом кабинете, где ставил опыты.

В 1892 г. А. С. Попов едет в Чикаго на выставку, открытую в честь 400-летия открытия Америки Колумбом. Он путешествует по Америке и безгранично удивляется культуре и обществу иностранцев.

Здесь мы и подходим к самой главной части жизни изобретателя радио. Многим видам деятельности человека нужна была связь. Особенно в этом нуждались моряки, которые не могли пользоваться проводной связью.

Идея беспроволочного телеграфа не одно десятилетие, как говорится, носилась в воздухе. Очень заманчивой была мысль отказаться от дорогостоящих проводов. Многие ученые в XIX в. пытались передать сигнал на расстоянии. Некоторые пытались сделать это, например, с помощью индуктивности. Время, однако, показывало, что правильный путь лежал совсем в другом направлении. Но успехов добился русский физик А. С. Попов. Он собрал механизм, который заставил сигнал приводить в действие декогерер, т. е. устройство, предназначенное для приема электромагнитных сигналов.

В 1894 г. А. С. Попов расстается со своим ассистентом Георгиевским, который уезжает в Москву на работу в один из московских вузов.

1 мая 1894 г. в Минный офицерский класс был принят на должность лаборанта Петр Николаевич Рыбкин. Ему было поручено ассистировать А. С. Попову на лекциях и практических занятиях. Скоро Петр Николаевич увидел, как может быть увлечен работой настоящий ученый. С раннего утра и до позднего вечера следовал опыт за опытом. Менялась конструкция когерера – пробовались различные материалы в качестве электродов, изменялась форма трубки. Но главной заботой были, конечно, порошки.

7 мая 1895 г. А. С. Попов читает доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям» в Петербургском университете для Русского физико-химического сообщества. Свой доклад ученый начал издали. Потом он объяснил устройство своих приборов: приемника и передатчика. И наконец, продемонстрировал действие приборов на практике: на главном демонстрационном столе стоял приемник, а возле стенки в аудитории находился передатчик. При включении передатчика в приемнике начинал звенеть звонок. После окончания заседания многие ученые подходили к А. С. Попову, но никто так и не смог объективно оценить значение открытия.

Лето 1896 г. А. С. Попов проводит в Нижнем Новгороде. Забот было много. Город на Волге принимал Всероссийскую промышленно-художественную выставку. Электростанция работала на пределе. Не было даже времени посмотреть газеты. В один из напряженных дней работы в кабинет директора электростанции буквально ворвался лейтенант Е. В. Колбасьев¹. А случилось следующее: лейтенант прочитал в газете заметку о том, что в Лондоне уроженец Италии Г. Маркони нашел способ телеграфирования без проводов. Это известие, конечно же, не обрадовало А. С. Попова, но заставило подумать над другими вопросами о передаче сигнала на расстоянии. Оказалось, что Г. Маркони учился по трудам тех ученых, которые добивались успехов в беспроводной телеграфии, в частности на работах А. С. Попова. 18 декабря 1897 г. преподаватель Минного офицерского класса выступил в Русском физико-химическом обществе с очередным докладом. В этот день собравшиеся в зале физического кабинета столичного университета стали свидетелями передачи первой за всю историю электротехники радиограммы. Ее текст был кратким и выразительным: «Heinrich Herz» (Генрих Герц). Приемник размещался в физической лаборатории Петербургского университета, а передатчик – в здании химической лаборатории на расстоянии 250 м. В литературе, тем не менее, утверждается, что этот опыт был произведен 24 марта 1896 г. (то есть до заявки Г. Маркони). Летом 1897 г. были проведены первые опыты радиосвязи на кораблях Минного отряда. Все это лето А. С. Попов проработал над усовершенствованием своего детища. Также были проведены испытания приемной станции с присоединением пишущего аппарата Морзе. 14 июля 1899 г. ученый подал заявки в патентные бюро Англии, Франции и России. В скором времени ученому были присланы патенты, и наладилось производство телефонных приемников электромагнитных волн.

Выдающийся флотоводец, исследователь морей и океанов, создатель первого в мире мощного ледокола «Ермак» и изобретатель радио – крупнейшего научно-технического достижения конца XIX в., давшего начало применению электромагнитных волн сыграли важную роль в жизни человечества с его большими социальными и интеллектуальными последствиями. Разные сферы деятельности, разный круг интересов, но они сблизились, и это сближение было плодотворно. Их дружеским отношениям способствовало нечто общее в их судьбе. Оба родились в отдаленных уголках России, в незнатных семьях: А. С. Попов – в горно-заводском поселке Турьинские Рудники на Северном Урале, в семье священника, а С. О. Макаров – в городе Николаеве, на побережье Черного моря, в семье поручика, вышедшего из матросов. Оба показали высокую познавательную активность в годы учения: С. О. Макаров – в морском штурманском училище в Николаевске-на-Амуре, нередко благодаря выдающимся способностям. А. С. Попов – в Далматовском и Екатеринбургском духовных училищах, в Пермской духовной семинарии и Петербургском университете. Оба в напряженном труде достигли высокого положения: А. С. Попов – статским советником², директором Электротехнического института. С. О. Макаров стал вице-адмиралом, командующим флотом на Тихом океане.

¹ – Колбасьев Евгений Викторович [3(15).6.1862, Одесса, – 20.11.1918, Инкерман, близ Севастополя, ныне Крымской области], русский изобретатель в области морского дела. Капитан 1-го ранга (1916). В 1883 г. окончил петербургское Морское училище. С 1891 г. преподаватель Кронштадтской водолазной школы. В 1880-х гг. создал корабельный и подводный телефоны и разработал систему телефонной связи с водолазом, а также способ подводного освещения. В 1893 г. организовал в Кронштадте мастерскую по производству водолазного снаряжения и телефонных установок для кораблей (позже в этой мастерской строились радиостанции системы А. С. Попова). Е. В. Колбасьев – автор оригинальной конструкции плавающей мины и нескольких проектов подводных лодок, в одном из которых предусматривалась установка торпедных аппаратов системы Колбасьева, обеспечивавших залповую стрельбу.

² – Статский советник в России, гражданский чин 5-го класса по Табели оо рангах, соответствовал должности вице-директора департамента, вице-губернатора, председателя казенной палаты, чином бригадира армии, капитана-командора флота и др. С 1856 г. давал право на личное дворянство, ранее – на потомственное. Титуловался «ваше высокородие».



Вице-адмирал
С. О. МАКАРОВ
(8.1.1849–13.4.1904)



Рис. 5. Броненосец береговой обороны
«Генерал-адмирал Апраксин» на камнях
у о. Гогланд, апрель 1900 г.

После изобретения беспроводной электрической связи А. С. Попов приступил к ее совершенствованию, к повышению дальности и надежности ее действия. Далее нужно было пропагандировать новую технику с целью скорейшего ее внедрения в жизнь. Обращает на себя внимание его лекция «О возможности телеграфирования без проводов», прочитанная им в Кронштадте 31 марта 1897 г. В заметке о ней кронштадтская газета «Котлин» сообщала, что лекция была прочитана *«При большом стечении публики, состоящей из г. г. адмиралов, генералов и офицеров всех родов оружия...»*.

Летом 1898 г. А. С. Попов провел серию опытов радиосвязи между кораблями, достигнув дальности передачи в три мили (5,5 км). Там же, где проводились эти опыты, находилась практическая эскадра Балтийского флота, которой командовал С. О. Макаров. Можно предположить, что в этих лекциях и опытах открывалась основа, на которой происходило сближение С. О. Макарова и А. С. Попова.

13 ноября 1899 г. ночью, при плохой видимости, из-за навигационной ошибки наскочил на подводную скалу возле юго-восточной оконечности о. Гогланд броненосец береговой обороны «Генерал-адмирал Апраксин» следовавший из Кронштадта в Либаву на зимовку (рис. 5). Для спасения броненосца необходима была связь между о. Гогланд и материком длиной более 40 км. Необходимо было построить две радиостанции с мачтами-антеннами высотой около 50 м, одну близ побережья Финляндии на о. Кутсало, связанного с материком (г. Котка) телеграфом, другую на о. Гогланд. Общее руководство работой возложили на исполняющего обязанности помощника главного инспектора минного дела капитана 2 ранга И. И. Залевского. В группе был и П. Н. Рыбкин. Научным руководителем стал А. С. Попов. Непосредственными помощниками были одиннадцать военных моряков. В этот период А. С. Поповым впервые были разработаны временные правила действия и содержания в исправности станции беспроводного телеграфа. В них предусматривалось ежедневное включение станций в 8 часов 55 минут утра. Постройка радиостанции на о. Кутсало не вызывала особых затруднений, но как доставить оборудование на о. Гогланд – Финский залив уже покрылся льдом, выручило детище С. О. Макарова – ледокол «Ермак». Он доставил на о. Гогланд составную мачту, разборный домик, аппаратуру, команду радиотелеграфистов и плотников. Установленная радиосвязь оказалась регулярной, надежной, по ней передавались запросы, указания, справки. Броненосец был снят с камней. О работе радиотелеграфа А. С. Попов известил С. О. Макарова. В ответной телеграмме С. О. Макаров приветствовал А. С. Попова с блестящим успехом его изобретения и говорил об установленной связи как о крупнейшей научной победе.

А. С. Попов умер от инсульта 31.12.1905 (13.01.1906). Ему было всего 46 лет. А. С. Попов был похоронен на Волковом кладбище Петербурга. В 1972 г. на могиле был установлен его бюст, созданный по модели М. Т. Литовченко – жены скульптора М. К. Аникушина.

24 января 1906 г. в Санкт-Петербургском университете прошло заседание физического отделения Русского физико-химического общества, посвященное памяти А.С. Попова. Присутствовали члены общества и многочисленные гости во главе с семьей ученого. На заседании было принято «Положение о премии имени изобретателя беспроволочного телеграфа А. С. Попова», присуждаемой за лучшие отечественные оригинальные исследования и изобретения по электричеству и его применению. Первое присуждение премии состоялось в октябре 1906 г. В. Ф. Миткевичу, впоследствии академику АН СССР.

При жизни А. С. Попов пользовался славой знаменитого ученого и изобретателя. Ему была присуждена премия Русского технического общества (РТО) имени наследника цесаревича (1898), высочайше пожалована единовременная премия в 33 000 руб. «за непрерывные труды по применению телеграфирования без проводов на судах флота» (1900), он был награжден Большой золотой медалью Всемирной промышленной выставки в Париже (1900), орденами Св. Анны 2-й и 3-й степеней и Св. Станислава 2-й степени (1895, 1902, 1897), избран почетным членом РТО и президентом Русского физико-химического общества (1905). Именем А. С. Попова названы малая планета (№ 3074), объект лунного ландшафта с обратной стороны Луны, Центральный музей связи и улица в Петербурге, НИИ радиоприема и акустики, теплоход. Ему воздвигнуты памятники в городах Петербурге, Екатеринбурге, Красногурьевинске, Котке (Финляндия), Петродворце, Кронштадте, на о. Гогланд. Открыты мемориальные музеи в Петербурге, Кронштадте, Красногурьевинске.

В 1945 г. в стране установлен государственный праздник – День радио, отмечаемый ежегодно 7 мая, учреждены знак «Почетный радист» и Золотая медаль имени А. С. Попова, присуждаемая Российской Академией наук.

С 1948 по 2000 гг. 20 выдающихся ученых были удостоены звания лауреата Золотой медали имени А. С. Попова.

В 2000 г. звания лауреата Золотой медали имени А. С. Попова получил академик – Нобелевский лауреат по физике 2000 г. Ж. И. Алферов.

В 2005 г. исполнилось 110 лет со дня изобретения «Радио» А. С. Поповым. В этом же году на здании ЛЭТИ была установлена памятная доска «Milestone» (веха) американского общества IEEE³. Установка памятной доски – знак признания того, что в 1895 г. А. С. Попов впервые в мире продемонстрировал систему радиосвязи.

Тем не менее, не подвергая сомнению заслуги А.С. Попова, для полноты информации, необходимо осветить такой факт, что на протяжении более 100 лет мировое сообщество не может определиться – кем изобретено радио?! Дело в том, что на небольшом временном промежутке, это гениальное открытие сделали несколько ученых из разных стран: А. С. Попов, Г. Маркони, Г. Герц, Э. Резерфорд, Н. Тесла. Не так важно кого из них первого посетила гениальная мысль, все ученые внесли в развитие науки неоценимый вклад.

Если спросить россиянина, европейца или американца, кем изобретено радио, то ответы будут разные. Кто же прав? Дело в том, что А. С. Попов продемонстрировал публично беспроводную передачу сигналов в марте 1886 г. и то же самое сделал за несколько месяцев до этого Г. Маркони, правда в отсутствие публики и специалистов.

³ – 13 мая 1884 г. в США был создан Институт (или Общество – в английском языке эти понятия выражаются одним термином) американских инженеров-электриков (*IEE*). В 1912 г. образован Институт (Общество) американских радиоинженеров. Деятельность обоих обществ непрерывно расширялась, в них вступали ученые, инженеры и специалисты из разных стран. Постепенно из названий этих обществ исчезло слово «американские». 1 января 1963 г. два общества слились в одно под названием *Институт инженеров электротехники и электроники* (*The Institute of the Electrical and Electronics Engineers*, аббревиатура *IEEE*).

Какой же вывод можно из этого? А вывод нельзя сделать однозначно, т.к. присутствует некий дуализм. Изобретение А. С. Попова заслуживает абсолютное признание и обладает несомненным приоритетом на изобретение, что и признано в мире, но он не подавал никаких заявок на патент. В то же время для дальнейшего развития техники решающим является то, кто воплотил идею в практику, а эта заслуга без сомнения принадлежит Г. Маркони, который к тому же зарегистрировал патент на изобретение и позже был отмечен Нобелевской премией.

Наш народ с гордостью и благодарностью хранит память о замечательном ученом-патриоте Александре Степановиче Попове, его деятельность была оценена современниками – он получил Большую золотую медаль на Всемирной выставке в Париже в 1900 году. Иностранные фирмы не раз пытались переманить талантливого ученого в свои лаборатории, предлагая ему огромные деньги и обещая прекрасные условия работы. Но великий патриот – изобретатель неизменно отвечал: *«Я русский человек и все свои знания, весь свой труд, все свои достижения имею право отдать только моей Родине...»*.

Библиографический список

1. Послание Президента РФ Федеральному собранию от 20.02.2019.
2. *Берг А. И.* Изобретение радио А. С. Поповым. 1934.
3. 50 лет волн Герца / Отв. ред. В. К. Аркадьев М. – Л.: АН СССР, 1938. 156 с.
4. *Головин Г. И.* А.С. Попов – изобретатель радио. М.: Гос. изд-во лит-ры по вопросам связи и радио, 1945. 240 с.
5. *Меркулов Д. П.* Попов, Менделеев и радио // Радио. 2013. №5. С. 4 – 5.
6. *Меркулов Д. П.* Радио 100 лет // Наука и жизнь. 2005. №5. С. 52 – 55.
7. *Менделеев Д. И.* Подъем русской промышленности в царствование Императора Александра Александровича // Новое Время. 20 октября 1894 г.
8. *Зудков П. И.* А.С. Попов и его творческое наследие // Радиотехника. 1995. №4–5. С. 30 – 34.
9. *Золотинкина Л. И.* Краткий обзор развития радио // Радиотехника. 2009. №3. С. 14 – 19.
10. *Крылов А. Н.* Мои воспоминания. СПб: Политехника, 2003. 508 с.
11. *Витте С. Ю.* Избранные воспоминания. 1848 – 1911. М.: Мысль, 1991. 718 с.
12. *Веселаго Ф. Ф.* Краткая история Русского Флота. М. – Л.: Военно-морское издательство НКВМФ СССР, 1939. 304 с.
13. А. С. Попов в характеристиках и воспоминаниях современников / Сост. М. И. Радовский. М. – Л.: АН СССР, 1958. 454 с.
14. *Рыбкин П. Н.* Воспоминания о Попове. 1958.

УДК 621.396.969.12

МОДЕЛЬ СИГНАЛА НА ВЫХОДЕ МОНОИМПУЛЬСНОЙ АНТЕННЫ ВРЛ «АВРОРА»

В. Г. Котельников, В. А. Сеницын, А. А. Топилин, Е. А. Цыбра, В. Т. Яковлев

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
ОАО «ВНИИРА»*

Представлены расчетные соотношения для формирования сигналов на выходе суммарно-разностных каналов фазового моноимпульса, позволяющие наблюдать влияние нестабильностей и конструктивных неточностей антенны и приемного тракта.

ВРЛ предназначены для получения на земле азимута и дальности воздушного судна, что необходимо для обеспечения трассового сопровождения полетов гражданской авиации, с выдачей информации диспетчеру. ВРЛ играют важную роль в обеспечении безопасности полетов воздушных судов. В настоящее время в РФ находятся в эксплуатации ВРЛ Радуга, «Аврора» и др. ВРЛ «Аврора» состоит из антенного и аппаратного контейнеров, а также антенного полотно, расположенного на вышке. Антенное полотно разделено на две антенны, реализующих принцип фазового моноимпульса в азимутальной плоскости. Аппаратура ВРЛ «Аврора» должна обеспечивать измерение азимутальной координаты с достаточно высокой точностью (СКО не более 5 угловых минут). На этапе настройки и испытаний ВРЛ «Аврора», разработчики сталкиваются с трудностями, связанными с отысканием неисправности или конструктивных неточностей изготовления узлов антенны в натурных условиях. Разработанная компьютерная модель позволяет ускорить этот процесс и сократить этапы комплексной настройки и испытаний ВРЛ «Аврора» в целом. Основные математические соотношения, используемые для построения модели, приведены в [1, 2, 3]. В модели введены коэффициенты, позволяющие имитировать воздействие нестабильностей и конструктивных неточностей антенны и приемного тракта.

Сигнал суммарный, ненормированный, можно представить выражением:

$$\Sigma a(t, \alpha) = \left(U1a(t, \alpha) + k_1 U2a(t, \alpha) e^{-i\Delta\varphi M \frac{\pi}{180}} \right) k_2 e^{-i\varphi_1 \frac{\pi}{180}},$$

где t – время; α – азимутальный угол прихода сигнала относительно нормали к плоскости антенны; $U1a(t, \alpha)$ – сигнал на выходе первой антенны фазового моноимпульса; k_1 – коэффициент разбаланса по амплитуде в суммарном канале второй антенны относительно первой; $U2a(t, \alpha)$ – сигнал на выходе второй антенны фазового моноимпульса; $\Delta\varphi M$ – разбаланс по фазе между выходами двух антенн фазового моноимпульса; k_2 – коэффициент разбаланса по амплитуде суммарного приемного канала относительно номинала; φ_1 – фазовый набег на выходе суммарного приемного канала.

Сигнал разностный, ненормированный, можно представить выражением:

$$\Delta a(t, \alpha) = \left(U1a(t, \alpha) - k_3 U2a(t, \alpha) e^{-i\Delta\varphi M \frac{\pi}{180}} \right) k_4 e^{-i\varphi_2 \frac{\pi}{180}},$$

где φ_2 – фазовый набег на выходе разностного канала; k_3 – коэффициент разбаланса по амплитуде в суммарном канале второй антенны относительно первой; k_4 – коэффициент разбаланса по амплитуде разностного приемного канала относительно номинала.

Сигнал фазового детектора, соответствующий оценке угла прихода, можно представить выражением:

$$\Delta a\varphi(t, \alpha) = Re \left[\frac{\Delta a(t, \alpha) e^{i\frac{-\pi}{2}} \Sigma a(t, \alpha)^*}{(|\Sigma a(t, \alpha)|)^2} \right],$$

где * – оператор комплексного сопряжения.

Графики расчетов по приведенным выше выражениям представлены на рис. 1 и 2.

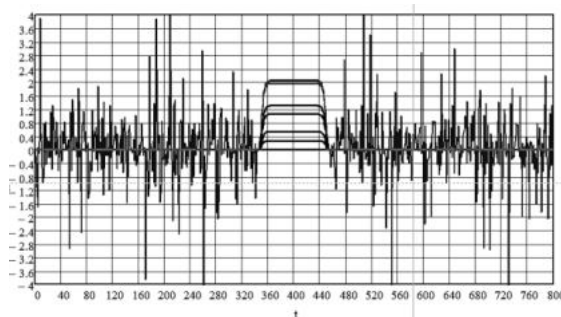


Рис. 1. Выход приемника суммарный (красный цвет) и разностный (черный цвет)

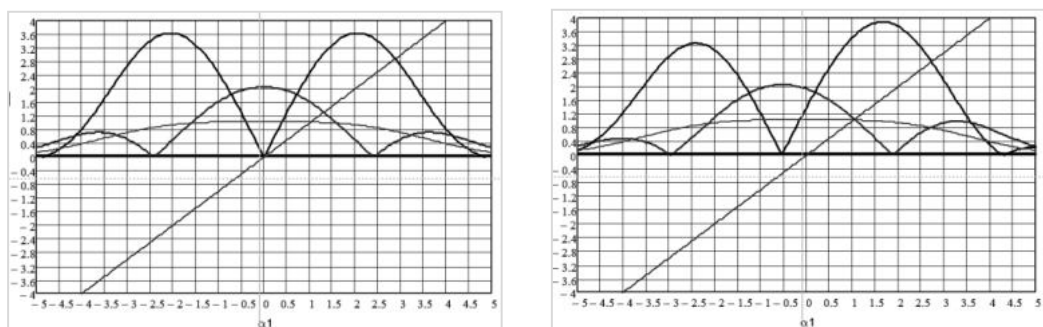


Рис 2. Пеленгационная характеристика ненормированная (черный цвет): слева – без неисправности, справа – с неисправностью (с недопустимым фазовым разбалансом входов моста)

Вывод: из анализа представленных материалов следует, что по поведению соответствующих кривых можно судить о характере неисправностей или конструктивных неточностях, допущенных при конструировании антенны.

Библиографический список

1. Сосновский А. А., Хаймович И. А. Авиационная радионавигация. Справочник. М.: Транспорт, 1980. 255 с.
2. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Сколника. Том 1. Основы радиолокации. М.: Советское радио, 1976. 456 с.
3. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Советское радио, 1970. 560 с.

УДК 621.373

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

Л. Б. Кочин, С. Ю. Страхов

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Рассмотрена возможность использования оптико-электронных средств для управления формой крупногабаритной антенны космического базирования. Рассмотрены основные теоретические положения. Описана экспериментальная установка. Приведены результаты экспериментов. Сформулированы практические рекомендации по применению оптико-электронных средств в составе системы управления антенной трансформируемой конструкции.

Один из перспективных путей совершенствования космических антенн трансформируемой конструкции – замена традиционных проводных линий передачи энергии и информации в системе управления на беспроводные и волоконно-оптические каналы [1, 2]. При передаче информации по открытому оптическому каналу и по волоконно-оптической линии связи возникает проблема электропитания удаленных терминалов. Традиционное решение – использование автономных химических источников тока или прокладка дополнительного электрического кабеля. Появление компактных полупроводниковых лазеров, обеспечивающих большую мощность и высокий КПД, а также высокоэффективных фотопреобразователей дает возможность

передавать по единому оптическому каналу наряду с информационным также и энергетический поток [3, 4]. Особенно актуально создание подобных энергоинформационных лазерных каналов для обеспечения работоспособности систем, находящихся в космосе, поскольку потери при распространении оптического излучения в безвоздушном пространстве малы.

Из-за отсутствия соединительных проводов повышается надежность, особенно при раскрытии антенны после вывода космического аппарата в заданную точку, снижается вероятность перепутывания соединительных линий, появляется возможность передавать энергию множеству удаленных потребителей.

Основные проблемы реализации предложенного нового подхода

1. Эффект затенения оптических приемников элементами конструкции антенны.
2. Сложность встраивания волоконно-оптических элементов в сетеполотно рефлектора антенны.

3. Необходимость оптимизации параметров лазерного пучка.

4. Необходимость системы обратной связи с множеством актуаторов.

5. Влияние внешних условий при работе в открытом космосе.

Решение перечисленных проблем являлось целью теоретических и экспериментальных исследований.

Обобщенная структурная схема предлагаемой системы приведена на рис. 1. Мы предлагаем использовать лазерный энергоинформационный канал для энергоснабжения и управления оконечными устройствами (актуаторами) трансформируемой антенны космического базирования. Лазерная система передачи энергии и информации сочетает как открытые, так и волоконно-оптические каналы передачи. Система организована по иерархическому принципу: из единого центра через несколько открытых лазерных каналов осуществляется передача энергии и информации на удаленные терминалы, с которых далее по волоконно-оптическим каналам энергия и информация поступает к оконечным исполнительным устройствам – актуаторам. Обратную связь с актуаторами предлагается реализовать посредством узкополосных радиоканалов, действующих по принципу кодового разделения.

Исходная информация об изменении формы антенны поступает в модуль энергоснабжения и формирования команд от вышестоящей системы управления. Для энергоснабжения актуаторов и управления ими предусмотрено два соответствующих канала. Информация, поступающая от актуаторов об исполнении (или неисполнении) команд, передается по отдельному каналу обратной связи. Данные о текущем состоянии поступают обратно в вышестоящую систему.

Задачи, решаемые структурными элементами системы:

- 1) декодирование информации, поступающей от вышестоящей системы;

- 2) передача энергии, достаточной для надежной работы актуатора в течение заданного времени;

- 3) выработка и передача команд управления на каждый актуатор по заданному алгоритму обслуживания;

- 4) мониторинг состояния актуаторов и прием данных от каждого из них;

- 5) отправка данных о текущем состоянии в вышестоящую систему управления.

Основные параметры и характеристики предлагаемой системы управления формой трансформируемой антенны:

1. Передаточная характеристика разомкнутой и замкнутой системы – характеризует процесс управления при отсутствии и наличии обратной связи.

2. Пропускная способность – характеризует предельные информационные возможности системы при решении задачи управления.

3. Надежность – характеризует способность выполнять заданные функции в течение определенного промежутка времени.

4. Быстродействие – характеризует возможность системы реагировать на изменение внешних условий.



Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы управления формой космической антенны с использованием оптико-электронных средств

Экспериментальная установка и результаты экспериментов. Структура экспериментальной установки приведена на рис. 2.

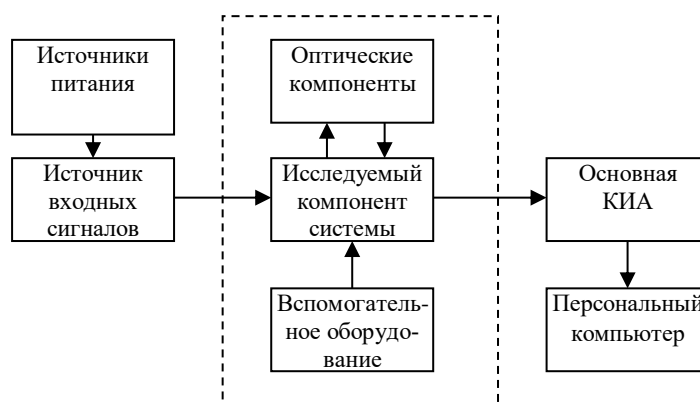


Рис. 2. Структура экспериментальной установки

Источник входных сигналов служит для имитации тестовых воздействий на исследуемый компонент системы управления. Выходной сигнал от исследуемого компонента поступает на контрольно-измерительную аппаратуру. Для накопления информации и анализа результатов эксперимента предусмотрен персональный компьютер. Кроме того, в составе установки присутствуют источники питания, оптические компоненты и вспомогательное оборудование (демпфирующие, крепежные и другие элементы).

Внешний вид экспериментальной установки приведен на рис. 3. Большинство компонентов размещено на оптическом столе (1), снабженном системой виброзащиты. Источником первичных входных воздействий (2) служит функциональный генератор типа UTG920DS. Источником оптического излучения является полупроводниковый лазер SSP-ST-1061-N-5W (9), работающий как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Управление режимом работы лазера осуществляется от блока накачки (3). В составе стенда были предусмотрены четырехсегментные фотоэлектрические преобразователи типа ФПМ-001/003, снабженные пассивной системой теплозащиты (7). В качестве эквивалента нагрузки (6) использованы магазины

сопротивления P326 и P33. Для анализа процессов, происходящих в ходе эксперимента, в состав стенда входит цифровой осциллограф АК ИП 4122/6V (3), цифровой мультиметр Fluke17B (4), измеритель оптической мощности Ophir Vega (5) с измерительной головкой L40(150)A-LP1-V2 (8) и персональный компьютер. Дополнительно в состав стенда входят вспомогательные компоненты: оптические элементы (коллимирующие линзы, светофильтры), крепежные элементы (держатели, фиксаторы и т.п.), а также соединительные кабели.

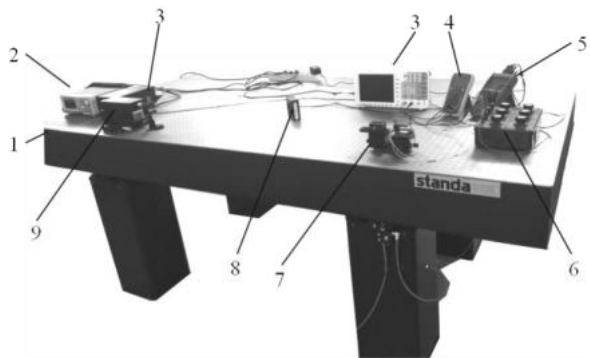


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки

В первой серии экспериментов исследовалась передача энергии при работе основного лазера в непрерывном режиме. При этом оптическая мощность на выходе лазера без коллиматора достигала 7,0 Вт, с коллиматором – 5,35 Вт. Таким образом, потери мощности на коллиматоре достигали 24%. Это можно объяснить сравнительно большим поглощением в стекле при прохождении оптического излучения ИК-диапазона и отсутствии просветляющих покрытий. В альтернативной схеме без коллиматора с линзой расширителем пучка потери на линзе составили 17%.

На дальности 0,5 м в схеме с оптическим коллиматором с фотопреобразователем ФПМ-001 напряжение на нагрузке 10 Ом составило 1,22 В, таким образом мощность в нагрузке равна 0,15 Вт, т.е. общий КПД макетного образца системы без учета потерь в драйвере накачки составляет 2,5%. Напряжение измерено цифровым мультиметром Fluke 17B.

На дальности 0,5 м в схеме с линзой-расширителем пучка и фотопреобразователем ФПМ-001 напряжение на нагрузке 10 Ом составило 1,585 В, таким образом мощность в нагрузке равна 0,25 Вт, т.е. общий КПД макетного образца системы без учета потерь в драйвере накачки составляет 4,2%.

Во второй серии экспериментов исследовалась передача энергии при работе основного лазера в импульсном режиме. Заданные параметры импульсной последовательности: длительность импульса 20 мкс, период следования 2 мс, амплитуда 5 В. Нагрузкой служил магазин сопротивлений P33, а также прецизионные резисторы C5-16B-8Вт $10 \pm 1\%$ Ом. Варьируемые параметры – скважность импульсной последовательности и сопротивление нагрузки. Было установлено, что увеличение сопротивления нагрузки свыше 50 Ом переводит работу фотопреобразователя в режим, близкий к холостому ходу. При малом значении сопротивления нагрузки (10 Ом) оптимальная скважность импульсной последовательности составляет около 25%, при среднем и большом сопротивлении нагрузки это значение увеличивается до 50%.

Заключение. В результате проведенных теоретических исследований подтверждена возможность и целесообразность использования оптико-электронных средств для управления формой крупногабаритной антенны космического базирования.

С помощью разработанной экспериментальной установки проведены серии экспериментов по исследованию оптико-электронных средств, входящих в состав беспроводного оптического канала передачи энергии и информации систему управления формой космической антенны.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что КПД полупроводникового лазера, предлагаемого для использования в системе управления близок к 50%, а КПД исследованных образцов четырехсегментных фотоприемных модулей достигает 25%.

Экспериментально установлена зависимость эффективности работы фотопреобразователя от скажности импульсной последовательности в пределах от 25 до 50%.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что выбор оптопары «полупроводниковый лазер – модульный фотопреобразователь» и длины волны передаваемого излучения 1064 нм является оптимальным и имеет теоретический предел КПД около 40 %. С увеличением протяженности линии передачи КПД системы будет снижаться, однако, он останется максимальным среди всех подобных систем. Передаваемая мощность для одного оптического волокна и пары «источник-приемник» будет превышать 10 Вт, для системы, в целом, она ограничена только оптической прочностью транспортной среды.

С учетом того, что КПД фотопреобразователя макетного образца был ниже его теоретического предела, а также присутствовали потери на вводе излучения в приемный модуль, эффективность последнего составляла порядка 25 %, это позволяет достичь общего КПД системы в 14,5 %. Несмотря на то, что это значение существенно меньше обозначенного выше теоретического предела, оно в несколько раз превышает КПД доступных на рынке систем, для которых последний составляет 1,7...2,6 %.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (идентификационный номер проекта RFMEFI 57715 X 0201).

Библиографический список

1. *Кочин Л. Б., Страхов С. Ю., Матвеев С. А.* Особенности структурно-параметрического синтеза системы управления трансформируемой антенной космического базирования при использовании оптических каналов энергоинформационного обмена // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 48–53.

2. *Кочин Л. Б., Страхов С. Ю., Матвеев С. А.* Особенности работы беспроводного канала передачи энергии в динамическом режиме // Вопросы радиоэлектроники. 2018. №78. С. 79–88.

3. *Андреев А. Ю., Зорина С. А., Лешко А. Ю.* [и др.] Мощные лазеры ($\lambda = 808$ нм) на основе гетероструктур раздельного ограничения AlGaAs/GaAs // ФТП. 2009. Т.43. Вып. 4. С. 543 – 547.

4. *Андреев В. М.* Мощные фотоэлектрические преобразователи монохроматического и концентрированного солнечного излучения // Современная электроника. 2014. № 6. С. 20 – 25.

УДК 351.814

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ В СИСТЕМУ АЗН-В ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ИНТЕРЕСАХ ГОСУДАРСТВЕННОЙ АВИАЦИИ

**Е. Е. Кривонос, Ф. П. Крылов, И. Д. Потоцкий,
В. А. Сеницын, Е. С. Щербakov, В. Т. Яковлев**

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
ОАО «ВНИИРА»*

Рассматривается направление развития системы АЗН-В по разрешению противоречий, существующих из-за диаметрально противоположенных требований к летательным аппаратам. Требования к летательным аппаратам государственной авиации в воздушном простран-

стве России и в международном воздушном пространстве разные. Для объединения в единое воздушное пространство необходимо добавить к АЗН-В новое качество.

Введение. АЗН-В (автоматическое зависимое наблюдение-вещание) – технология, позволяющая наблюдать движение воздушных судов (ВС) с большой точностью при малых затратах, а также получать аэронавигационную информацию. АЗН-В также передает наземным службам в реальном времени погодную информацию, полученную с борта ВС, расширяя их осведомленность о воздушной обстановке и повышая безопасность полетов. АЗН-В работает в открытом режиме на согласованной международным сообществом частоте..

АЗН-В является логическим продолжением развития системы ОрВД. Ее внедрение в ОрВД увеличивает качество работы и расширяет существующие возможности по управлению воздушным движением.

В статье рассматривается состояние системы АЗН-В на настоящий момент. Освещаются требования, которые входят в противоречие друг с другом и предлагается одно из направлений по разрешению существующих противоречий, которые мешают законному использованию международного воздушного пространства судами государственной авиации (при возникновении такой необходимости).

Вносится предложение дополнить функционал системы АЗН на ВС государственной авиации режимами работы, которые позволят выполнить все требования к ней.

В статье отмечены проблемные вопросы и предложен путь их разрешения:

1. Положение развития АЗН-В на настоящий момент;
2. Требования к АЗН-В в воздушном пространстве Российской Федерации;
3. Требования к АЗН-В в международном воздушном пространстве;
4. Определение организационных задач, стоящих в связи с противоречием в требованиях;
5. Определение технических вопросов по решению поставленной задаче.

Принцип работы системы АЗН. Оборудованное АЗН-В транспондером воздушное судно вещает в эфир свои координаты, курс, высоту, горизонтальная и вертикальная скорости, уникальный 24-битный номер ВС, номер рейса, тип ВС и другую информацию [5].

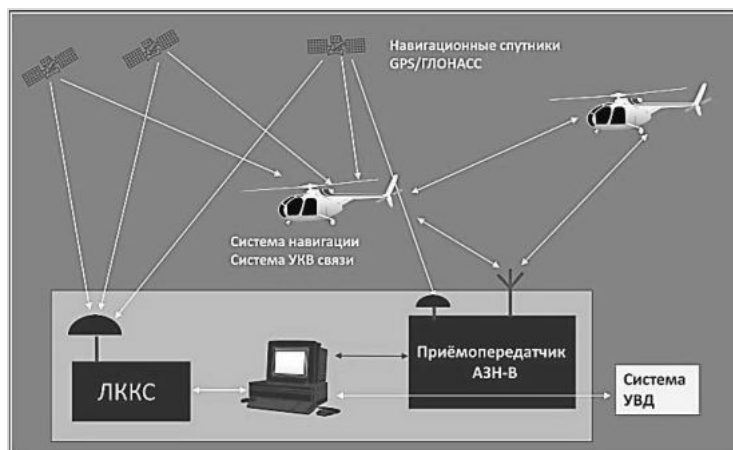


Рис. 1. Обобщенная схема работы АЗН-В [5]

Состояние по охвату системой АЗН-В на настоящий момент. В настоящее время международной организацией ИКАО (ICAO) установлен стандарт АЗН-В, обязательный для использования общего воздушного пространства. Россия является полноправным членом этой организации. Минтранс РФ 19 мая в 2011 году утверждена программа о внедрении АЗН-В в период с 2011 по 2020 годы.

При внедрении стандарта АЗН-В в эксплуатацию существуют противоречия.

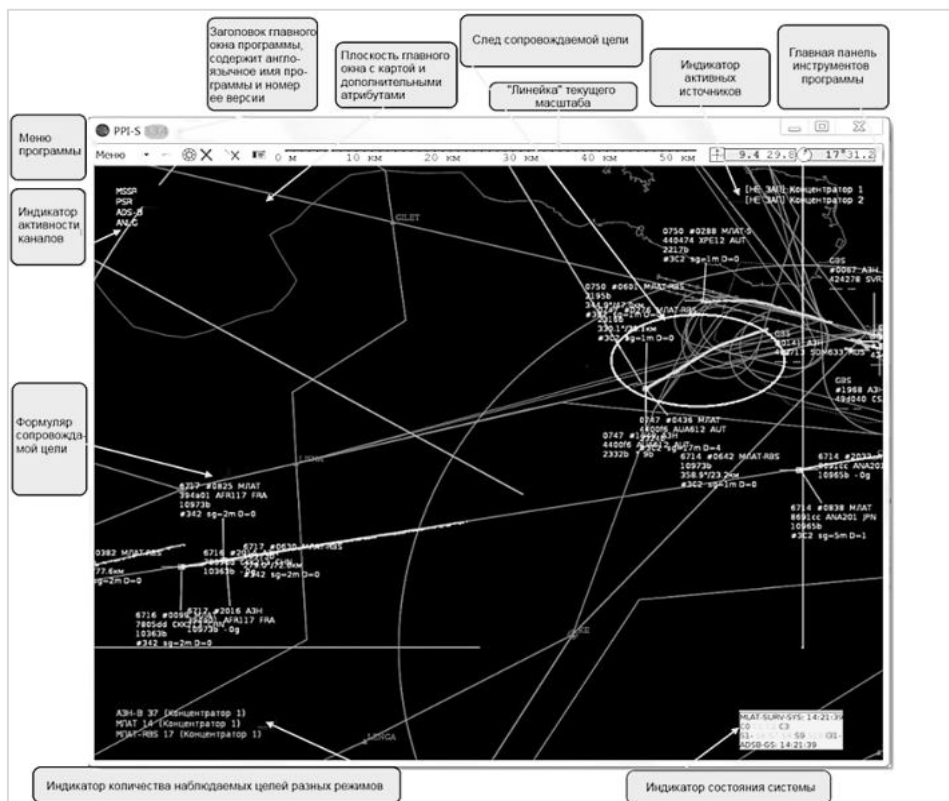


Рис. 2. Типовой вид рабочего экрана оператора

Недопустимость использования АЗН-В в государственной авиации. АЗН-В – открытый стандарт. Передача данных с борта летательного аппарата производится на установленной частоте 1090 МГц в открытом виде по открытому международному стандарту ИКАО [6]. В стандарте АЗН-В используются данные системы GPS. Владельцем системы GPS является министерство обороны США, для гражданских служб система GPS выдана в пользование без всяких гарантий «как есть». Также США развернули спутниковую группировку Iridium, которая собирает информацию о сформированной общей воздушной обстановке и хранит ее на серверах, расположенных на территории США. Это делает неприемлемым использование стандарта АЗН-В в государственной авиации как минимум на территории РФ.

Необходимость установки системы АЗН-В на судах государственной авиации. Для использования международного воздушного пространства наличие установленной системы АЗН-В является необходимым условием. Пролет летательных аппаратов без нее запрещен:

- Австралия – с 2012 г.;
- Европа – с 2017 г.;
- США – с 2020 г.

Для пролета над территорией иностранных государств, членов ИКАО, все воздушные суда, включая государственные, должны быть оборудованы работающей системой АЗН-В.

Для решения этого противоречия необходимо решить вопросы:

1. Организационного характера.
2. Технического характера.

Для ВС РФ необходимо разрабатывать и внедрять дополнительные режимы использования АЗН.

Организационные вопросы использования АЗН-В судами государственной авиации. Необходимо установить момент начала и прекращения работы АЗН-В на борту летательного аппарата государственной авиации. Этой отправной точкой может быть:

- Включение системы в момент пересечения государственной границы РФ;
- Включение системы в момент взлета летательного аппарата государственной авиации с последнего аэродрома, находящегося на территории РФ перед выходом в международное воздушное пространство;
- Иные варианты.

Аналогично обстоит дело с прекращением работы системы АЗН при вхождении в воздушное пространство РФ. Также необходимо определиться с концепцией переключения режимов. Оно может быть реализовано в программном виде – когда включение/выключение режимов будет производиться путем активации программно-реализованного переключения. В этом случае поднимается подзадача, как будет производиться переключение. Это будет программная функция, реализованная тем или иным способом, или переключение должен производить человек.

Также способ переключения режимов может быть выбран аппаратным, где человек должен будет их переключать в ручном режиме с помощью органов управления блоком АЗН-В.

Все эти вопросы требуют согласования с эксплуатирующими организациями судов государственной авиации. Вариант реализации должен быть определен при постановке задачи по добавлению необходимого функционала.

Технические вопросы. Технически, отключение системы АЗН-В на бортах **гражданской авиации** не предусмотрено – система работает постоянно.

При установке системы АЗН-В на борт летательного аппарата **государственной авиации** необходимо обеспечить ее совместимость с уже установленными радиотехническими системами.

Необходимо предусмотреть органы управления системой для доступа к ней пилота, либо обеспечить аппаратное автоматическое включение и выключение при пересечении установленных границ. Этот вопрос пересекается с организационной частью задачи.

Технические режимы работы системы АЗН-В также должны быть реализованы в соответствии с регламентами использования государственной авиации. Если необходимая нормативная база у эксплуатирующих организаций отсутствует, ее необходимо разработать и ввести в действие.

При введении дополнительных режимов необходима также проработка вопроса их влияния на систему ОрВД гражданской авиации и согласования их режимов работы. Это необходимо для исключения аварийных ситуаций в воздушном пространстве при начале работы дополнительных режимов.

Итоговое заключение. Включение дополнительных режимов позволит отключить автоматический сбор информации о судах государственной авиации спутниковой группировкой Iridium, а также наземными системами АЗН-В зарубежом, что исключает обработку информации автоматизированными комплексами стран НАТО. Необходимость разработки дополнительных режимов должны определить организации, которые отвечают за использование судов государственной авиации.

Для исключения сбоев в управлении воздушным движением над территорией России необходима разработка согласования внедряемых режимов с существующей системой ОрВД.

Библиографический список

1. *Алдюхов А. А.* Способ организации воздушного движения на основе бортового ГЛОНАСС/GPS-оборудования и GSM/GPRS сетей в воздушном пространстве классов С, G // *Электроника и электротехника.* 2018. № 1. С. 32 – 42. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=23287.
2. *Глейзер Б. Д.* История развития радионавигации. Спутниковые радионавигационные системы. [Электронный ресурс]. URL: http://liseev-ia.narod.ru/Circ/radiostory_Gleyzer.pdf.

3. *Евтушенко О. А.* Внедрение АЗН-В в Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: https://helicopter.su/assets/res/files/Профессионалам/Летные стандарты/2_4 июня 2015 НТК по БЛА/Евтушенко 1.pdf.

4. *Фальков Э. Я.* Автоматическое зависимое наблюдение радиовещательного типа (АЗН-В) и примыкающие коммуникационные технологии – перспективы развития и внедрения в Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.modern-avionics.ru/Files/09-GosNIIAS-Falkov-27.08.2015.pdf>.

5. Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды ОНПК. СПб: БГТУ «Военмех», 2019.

6. ИКАО Doc 9924. Руководство по авиационному наблюдению.

УДК 629.7.05

КОГНИТИВНЫЕ БОРТОВЫЕ МАГИСТРАЛЬНО-МОДУЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Ю. Т. Криворучко, Ю. Н. Музелин, Е. А. Сеницын, В. А. Сеницын

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
ОАО «ВНИИРА»*

Когнитивная система обработки радионавигационных сигналов основывается на двух уровнях:

- когнитивное управление;
- когнитивное исполнение.

Когнитивное управление предусматривает использование теоретических знаний и человеческого опыта в части построения и функционирования систем обработки радионавигационных сигналов. Когнитивное исполнение основано на применении вычислительных устройств и алгоритмической реализации функциональных систем обработки радионавигационных сигналов в бортовых комплексах навигации и посадки.

Анализ архитектур отечественных и зарубежных бортовых радиоэлектронных комплексов (БРЭК) показывает, что возможно выделение основных принципов организации БРЭК, а именно:

- **принцип когнитивности**, который определяет архитектуру, аппаратное и программное исполнение БРЭК на основе накопленных теоретических знаний и человеческого опыта;
- **принцип иерархической автономности**, который предусматривает многоуровневую структуру комплекса;
- **принцип магистрально-модульности**, обеспечивающий построение комплекса методом сборочного проектирования с применением базового набора аппаратных и программных модулей, которые объединены общей магистралью;
- **принцип открытости архитектуры**, который определяет возможность последующей модернизации комплекса путем наращивания или замены аппаратных и программных модулей;
- **принцип интеграции**, характеризующийся комплексированием данных от различных систем на аппаратном и алгоритмическом уровнях;
- **принцип унификации**, включающий замену аппаратных решений программными, стандартизацию помехозащищенных каналов информационного обмена, единство конструктивных и технологических решений для комплекса, включая построение унифицированного набора функционально-конструктивных низкочастотных и высокочастотных модулей.

Указанные принципы соответственно могут быть распространены на бортовой навигационно-посадочный комплекс (БНПК) на основе РСБН, являющийся нижним уровнем иерархии

авиационного РЭК [1,3,5,6]. Когнитивную составляющую БНПК определяет измерительно-вычислительная система, функциональная структура которой представлена на (рис. 1).

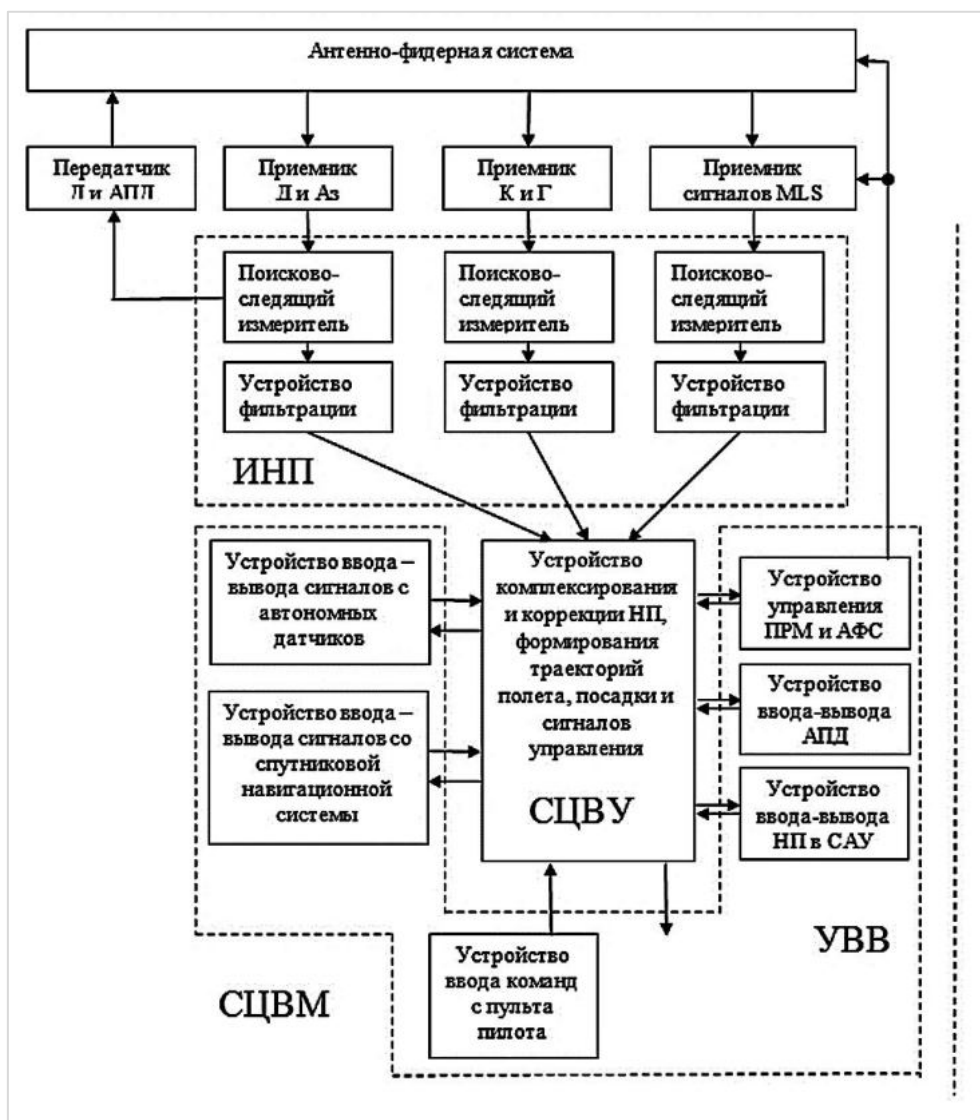


Рис. 1. Функциональная структура ИВС БНПК ЛА

Примеры когнитивных измерителей, входящих в состав ИВС БНПК, даны на рис. 2 – 4.

Структурная схема когнитивного измерителя КРС сигналов пеленга на взаимодействующий самолет в режиме «Встреча» приведена на рис.3. Измеритель работает на промежуточных частотах F1 и F2 с выходов приемного тракта от левой и правой антенн.

В БНПК может входить когнитивное устройство обмена данными с радиомаяками РСБН/ПРМГ по радиолинии АПД [1] (рис. 4). Источником данных на линии 1 АПД является азимутально-дальномерный маяк РСБН или ПРМГ-ОМД. Источником данных на линии 2 АПД является приемник межсамолетной связи ПМСС.

Обмен данными с СЦВУ-М обеспечивается по последовательным каналам ГОСТ 18977-79.

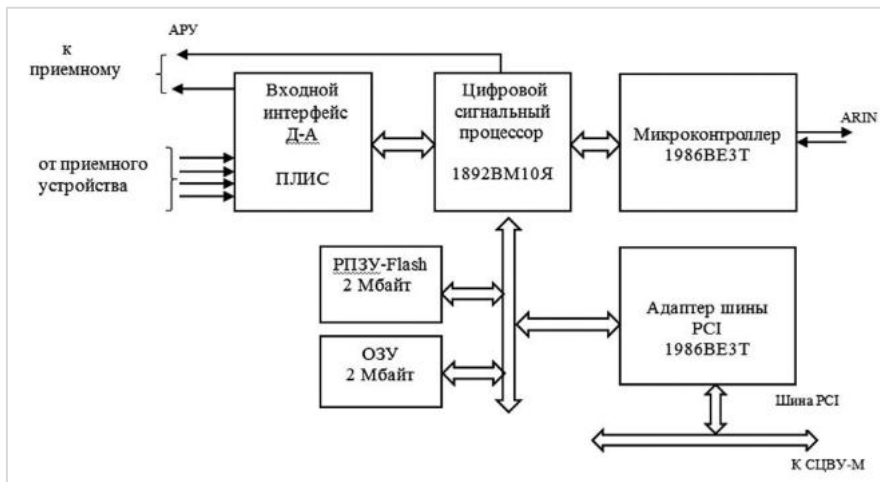


Рис. 2. Структурная схема когнитивного навигационно-посадочного измерителя

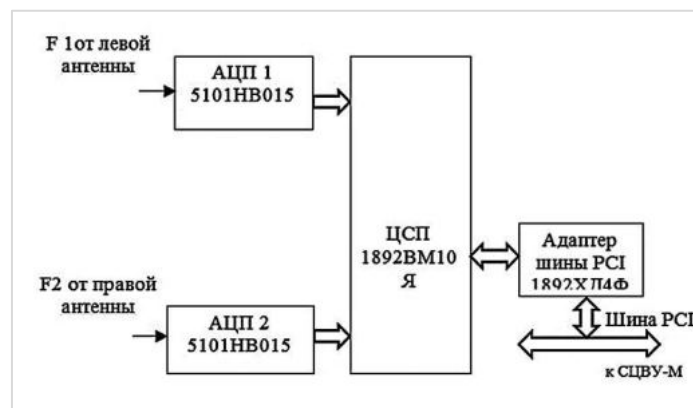


Рис. 3. Структурная схема когнитивного измерителя КРС пеленга на взаимодействующий самолет в режиме «Встреча»

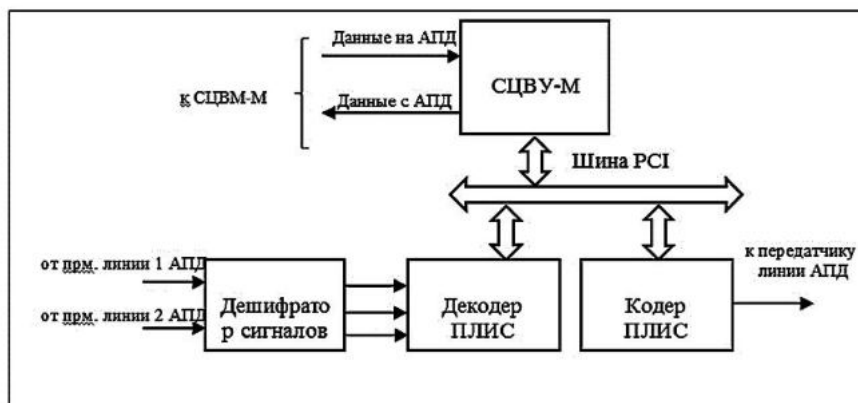
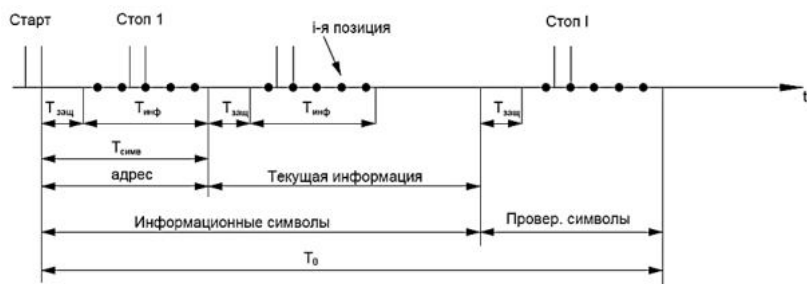


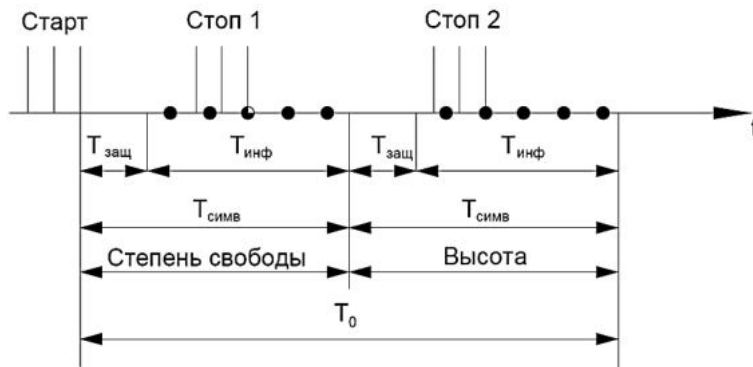
Рис. 4. Когнитивное устройство обмена данными с радиомаяками РСБН/ПРМГ по радиолинии АПД

В настоящее время широкое распространение получили радиотехнические системы (РТС) управления полетами, навигации, посадки и предупреждения столкновений летательных аппаратов (ЛА), в которых совмещено измерение параметров полета ЛА и обмен различного вида информацией. В этих РТС основными сигналами, используемыми для траекторных измерений и обмена информацией, являются одночастотные импульсно-временные коды (ИВК), представляющие собой простейшую разновидность составных (широкополосных) сигналов.

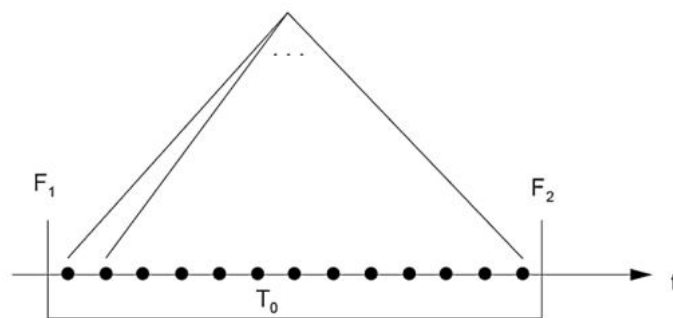
На рис. 6 показана структура информационных посылок РСБН, СПС и ВРЛ. Разработка современной микро-ЭВМ позволяет создать когнитивные устройства с улучшенными тактико-техническими характеристиками. Имея принципиально иную архитектуру построения, микро-процессорная реализация кодирующих устройств дает возможность проводить оперативное изменение структуры сигналов, способов их обработки и алгоритмов информационного обмена.



а) РСБН, $T_0=2500$ мкс



б) Система предупреждения столкновений, $T_0=1050$ мкс



в) Вторичный радиолокатор стандарта ИКАО, $T_0=20$ мкс

Рис. 6. Структуры информационных посылок в различных РТС

Рассмотрим микропроцессорную реализацию кодирующих устройств различных РТС.

Определение основных элементов структуры микропроцессорного кодирующего устройства (КУ) и установление связей между ними является важным этапом проектирования.

В качестве критерия оптимальности структурной схемы примем минимальный объем решаемых задач, выполняемых специализированными модулями сопряжения микро-ЭВМ с внешними устройствами. Производительность и емкость памяти микро-ЭВМ являются в основном теми ограничителями, которые влияют на распределение объема решаемых задач между аппаратной и программной частями микропроцессорного КУ.

Структура микропроцессорного КУ (рис. 7) состоит из следующих узлов:

- базовой микро-ЭВМ;
- УЦО;
- Предпроцессора (ПРПР) сопряжения микро-ЭВМ с комплексом.

Модули – микро-ЭВМ и УЦО – являются базовыми [3] и входят в ряд малых измерительно-вычислительных комплексов [5].

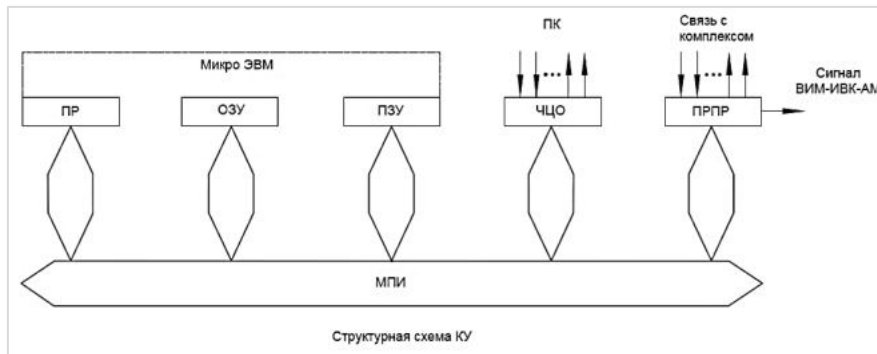


Рис. 7. Структурная схема КУ

Главные функции специализированного предпроцессора таковы:

- Сопряжение с передающими, измерительными и другими устройствами комплекса;
- Внешняя синхронизация момента передачи информационных посылок;
- Контроль аппаратной части КУ.

На рис. 8 представлена функциональная схема предпроцессора КУ.

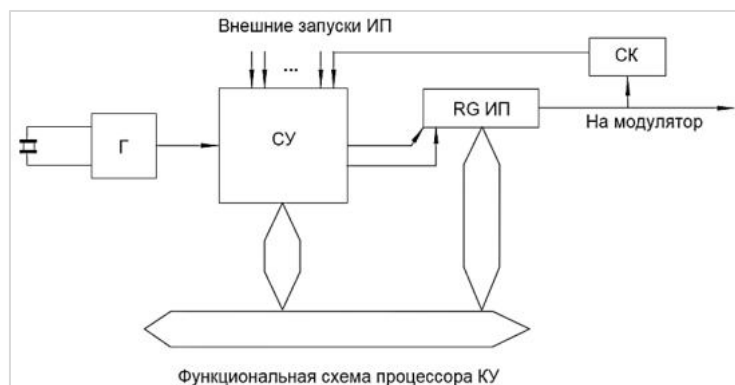


Рис. 8 Функциональная схема предпроцессора КУ

Основными элементами предпроцессора, связанного с микро-ЭВМ межмодульным параллельным интерфейсом, является сдвигающий регистр RG ИП. Данный регистр обеспечивает совместно со схемой управления предпроцессора с помощью поступающих синхросигналов (СИ) преобразование информационной посылки, состоящей из множества машинных слов, сформированных микро-ЭВМ в соответствии с передаваемым информационным сообщением, содержащие ИВК-сигналы, и поступающую в реальном масштабе времени на передающее устройство.

Библиографический список

1. Еришов Г. А., Король В. М., Криворучко Ю. Т., Максименко М. Д., Переломов В. Н., Синецын Е. А., Шатраков Ю. Г. Радиомаячная система инструментального захода воздушных судов на посадку категории II для работы в дециметровом отечественном и международном диапазонах волн ПРМГ-ОМД // *Новости навигации*. 2017. №1. С. 16 – 19.
2. Криворучко Ю. Т., Музелин Ю. Н., Пономаренко Б. В. Совершенствование систем и средств посадки высокоманевренных летательных аппаратов классов 4++ и 5 // *Новости навигации*. 2018. №3. С.17 – 26.
3. Криворучко Ю. Т., Громов Г. Н., Наливайко Д. А., Сахненко К. Д. Системная унификация бортовой радиоэлектронной аппаратуры // *Вопросы радиоэлектроники*. Серия ОВР. 1988. Вып.4. С. 3 – 10.
4. Пахолков Г. А., Збрицкая Г. Е., Криворучко Ю. Т., Пономаренко Б. В., Шатраков Ю. Г. Обработка сигналов в радиотехнических системах ближней навигации. М.: Радио и связь, 1992. 256 с.
5. Криворучко Ю. Т., Музелин Ю. Н. Методы модернизации БРНК для ЛА поколений 4+ и 5 // *Новые технологии*. Том 1 – Материалы XI Всероссийской конференции. М.: РАН, 2014. С. 109 – 120.
6. Криворучко Ю. Т., Дроздов Р. В., Лавриненко В. М. и др. Моделирование сигналов РСБН // *Вопросы радиоэлектроники*. Серия ОТ. 1983. Вып. 5. С. 3 – 10.

УДК 621.396.004.98

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА ВОЗДУШНОЙ СВЯЗИ ИСТРЕБИТЕЛЕЙ 4-ГО ПОКОЛЕНИЯ ВВС США

**Ф. П. Крылов, А. В. Митрофанов, В. А. Синецын,
А. А. Топилин, Е. С. Щербаков, В. Т. Яковлев**

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
ОАО «ВНИИРА»*

Рассматриваются современные концепции построения систем, в частности, воздушной связи, тенденции развития, отмечаются достоинства и недостатки их разновидностей.

Сетевая концепция системы (комплекса) предполагает функционирование компонентов сети в едином информационно-коммуникационном пространстве. Компоненты системы (комплекса) рассматриваются как устройства, подключенные к единой сети. В зависимости от выбора сетевой архитектуры и ее типа компонентами сети могут быть корабли или самолеты, средства управления, связи, разведки и наблюдения, узлы и блоки аппаратуры или их комбинации. Применение сетевой концепции порождает большой объем передаваемой информации, но при этом нерешенным остается вопрос с ограниченной пропускной способностью каналов передачи данных, что существенно влияет на показатели качества

функционирования системы в целом. Разделение таксономии интегрированных сетей, по принципам равноценности / неравноценности и однородности/неоднородности является одним из возможных подходов к детерминированному типу построения сетевых архитектур. Альтернативным подходом является подразделение таких архитектур на централизованные, запросные, стайные (в виде «роя») и их комбинации. Сетевая архитектура равноценна, если все подключенные средства идентичные и потеря одного из них равнозначна потере другого. И наоборот, архитектура сети неравноценна, если одно подключенное средство имеет большую ценность по отношению к другим. Термин «Сетевая война» употребляется Китаем, США и странами НАТО с первой половины 2000 годов для отражения сути подхода ведения боевых действий в едином информационно-коммуникационном пространстве.

Сетевая концепция ведения боевых действий в едином информационно-коммуникационном пространстве рассматривает вооруженные силы как устройства, подключенные к единой сети. В зависимости от выбора сетевой архитектуры и ее типа средствами сети могут быть носители (например корабли или самолеты), средства поражения, управления, связи, разведки и наблюдения, группа военнослужащих или отдельные солдаты или комбинация и тех, и других.

Применение сетевой концепции порождает большой объем передаваемой информации, но при этом нерешенным остается вопрос с ограниченной пропускной способностью каналов передачи данных, что существенно влияет на показатели качества функционирования системы в целом. Из опыта военных операций в Персидском заливе известно, что из-за ограниченной пропускной способности сетевой инфраструктуры, МО США собственными средствами осуществляло передачу до 20% информации (обслуженная нагрузка), а остальные 80% информации (избыточная нагрузка) передавались через системы связи общего пользования (альтернативные сети), в которых также наблюдались сбои из-за перегрузок.

Разделение таксономии интегрированных сетей, по принципам равноценности / неравноценности и однородности/неоднородности является одним из возможных подходов к детерминированному типу построения сетевых архитектур.

Альтернативным подходом является подразделение таких архитектур на централизованные, запросные, стайные (в виде «роя») и на их комбинации.

При выделении равноценности можно предположить, что сетевая архитектура равноценна, если все подключенные средства идентичные и потеря одного из них равнозначна потере другого. И наоборот, архитектура сети неравноценна, если одно подключенное средство имеет большую ценность по отношению к другим. Например, потеря самолета ДРЛО (AWACS) намного критичней, чем потеря одного контролируемого им истребителя или БПЛА. Следовательно, данная сетевая архитектура неравноценна и строится вокруг ключевого узла – AWACS.

При этом для обеспечения однородности архитектуры передачи данных и связи в интегрированных сетевых решениях используется (хаб).

В централизованной архитектуре используется один ценный хаб, окруженный множеством других средств меньшей ценности. Если же имеется несколько приоритетных хабов, то получается другая сетевая архитектура – типа «Hub Request» или типа «Joint».

Как правило, центральный хаб повышает возможности средств, которые он объединяет, но различные хабы дают и разное увеличение этих возможностей.

При применении сетевой архитектуры с центральным хабом, как правило, очень хорошо защищен, потому что боевые формирования не могут без него выполнять задачи. В свою очередь, уязвимость хаба требует отвлечения на его защиту определенных средств.

Вместе с тем полностью централизованная система управления и связи может быть только тогда, когда решены основные оперативные и тактические задачи, хаб имеет доступ ко всей требуемой информации и необходимые возможности для подготовки принятия решения и быстрого распределения информации.

Архитектура сети «по запросу» представляет собой комбинацию одинаковых по ценности, но неоднородных сил. Особенностью такой архитектуры является то, что она состоит из

средств, имеющих узкую специализацию (средство разведки, средство управления, средство огневого поражения и т. д.), но высокое качество выполнения конкретного типа задач.

Эта архитектура аналогична разрабатываемой сервис-ориентированной компьютерной технологии Jini и представляет собой расширение языка Java, благодаря чему цифровые устройства с программами на этом языке могут в компьютерной сети самоорганизовываться в сообщества без посредничества центрального компьютера.

При таком построении запросы и сигналы управления передаются по сети, при этом сама сеть определяет возможного потребителя, т. е. того, кто может выполнить поставленную задачу.

Например, запрос на уничтожение может быть направлен в секцию огневой координации (обеспечения), которая выбирает подходящее средство поражения. Средство огневого поражения, получив задачу, при необходимости запрашивает более точную информацию (координаты) от другого подключенного к сети средства разведки. По мере выполнения задачи формируется комплексная сеть запросов, которая требует наличия эффективной и устойчивой сети связи.

Наиболее сложным, но в то же время и наиболее перспективным считается сетевая архитектура роя, представляющая собой комбинацию полностью равноценных и однородных средств. Каждое из таких средств имеет свое (хотя и с ограниченными возможностями) средство разведки, средство поражения и средство связи и управления. Для эффективного выполнения задачи такие средства должны обмениваться между собой информацией, самоорганизовываться и самосинхронизироваться для повышения возможностей подключенных средств. Иногда рой идентичных средств дополняется специальным центральным хабом.

Архитектура «роя» свойственна и разведывательным сетям. Она применяется для организации обмена разведывательной информацией между отдельными средствами и ее распределения в интересах подготовки данных ситуационной осведомленности и синхронизации действий. При таком построении разведывательных сетей может применяться управляемый (Orchestrated Swarming), иерархический (Hierarchical Swarming) и распределенный (Distributed Swarming) рой.

При организации сети типа управляемый рой одно из средств выбирается в качестве временного «лидера» (разница с централизованной архитектурой в том, что все средства идентичны, т. е. равноценны и однородны). Выбор центрального узла (лидера) осуществляется с учетом обстановки на поле боя и других факторов.

Данные разведки посылаются средству-лидеру, где они обрабатываются и интегрируются в данные о ситуационной осведомленности и определяется дальнейший план действий. Затем эта сформированная информация о ситуационной осведомленности распределяется между другими потребителями. В случае каких-либо непредвиденных ситуаций сеть может быть реконфигурирована и появится новый «лидер». Эта архитектура ограничивает количество пользователей сети, но предоставляет большие возможности по эффективному управлению.

Архитектура типа иерархический рой также близка к традиционной централизованной архитектуре построения системы управления и наиболее подходит для решения комплексных задач. При использовании такой архитектуры построения общая картина данных ситуационной осведомленности и замысел операции (боя) подготавливаются центральным (командным) средством, спускаются вниз в тактическое звено, где они детализируются до необходимого командирам этого звена управления уровня. При отсутствии компьютеров такая архитектура была наиболее предпочтительной, но она не обеспечивала необходимую скорость принятия решения и управления подчиненными силами и средствами.

В архитектуре сети типа распределенный «рой» нет центрального узла (лидера), а все решения принимаются в результате достижения консенсуса или определенных договоренностей. Каждое средство подготавливает свои данные о ситуационной осведомленности. Такое построение требует большой пропускной способности сети, но если сеть ее обеспечит, то будет достигнута и высокая эффективность управления.

Архитектура сети типа распределенный «рой» свойственна и формированиям, выполняющим боевые задачи. Правда эффективность такой архитектуры вызывает много вопросов у военных экспертов.

В смешанной (гибридной) архитектуре (Mixed) используется одновременно и архитектура роя и архитектура сети «по запросу». Такой способ построения сети применяется при использовании равноценных и неоднородных средств. Например, подразделения сил специальных операций имеют общие возможности, но одновременно с этим разную специализацию.

Принято выделять два подтипа гибридных архитектур. Первый применяется для объединения нескольких типов неоднородных, но равноценных средств. При таком объединении средств архитектура роя применяется, когда средства объединяются для распределения данных ситуационной осведомленности («иерархический рой»). Рой также может применяться и среди перспективных наземных комплексов для выполнения боевой задачи (распределенный рой), а между неоднородными средствами может использоваться и метод формирования сети «по запросу».

Средства, объединенные вторым подтипом смешанной архитектуры, имеют несколько общих характеристик. Например, средства имеют важную общность в виде средств разведки, программного обеспечения, средств связи, но в то же время – различные радиолокационные системы. Широко применяются и другие типы архитектур, которые можно отнести к смешанным. Архитектура сети типа рой с управляющим узлом (Hub-Swarm) – это результат объединения архитектуры и добавления хаба высокой ценности, который функционирует как множитель сил, хотя сама архитектура и имеет особенности роя.

Архитектура сети по запросу с центральным узлом (Hub-Request) формируется при введении в сеть высокоценного хаба.

Последний и самый сложный вариант архитектуры сети – объединенная сеть (Joint). Такой тип объединяет в себе все имеющиеся сетевые архитектуры и присущ в первую очередь операциям объединенных сил. Высокоценный хаб в такой объединенной архитектуре сети будет выполнять задачи именно хаба, т. е. коммутатора. Группы равноценных и равнозначных средств будут объединяться архитектурой сети «рой» и использовать методы запроса, приемлемые для неоднородных сетей.

Применение такой архитектуры позволит добиться всесторонней вертикальной и горизонтальной интеграции всех участников боевых действий и обеспечить необходимый уровень «бесшовности» систем управления, связи, передачи данных и огневого поражения объединенных сил.

Как правило, каждый тип сетей имеет свои уязвимые элементы в виде ключевых узлов (хабов), линий связи и платформ, независимо от того, что это за сети – коммуникационные, организационные или биологические. В этой связи для изучения перспективных сетевых архитектур, применяемых при формировании единого информационно-коммуникационного пространства, а также для планирования и организации мероприятий противодействия будет целесообразным разработать специализированную методологию с использованием теории, базирующейся на определении центров тяжести сетей (centers of gravity – COG) и выявлении критически важных уязвимых элементов таких сетей (critical vulnerabilities – CV).

На рис. 1 представлена схема построения сетецентрической сети обмена тактическими данными ВВС, применяемая США и НАТО, а в таблице 1 сравнение их основных ТТХ.

Авионика интегрированная на данных принципах имеет следующие основные компоненты:

- объединительная плата с модулями;
- единая шина данных (ARINC 629 (MIL-STD-1553, ГОСТ Р 52070-2003), ARINC 665, ARINC 653 (APEX), ARINC 664 Part 7 (AFDX)). Наиболее перспективной считается шина AFDX;
- датчики и исполнительные устройства, подключены к единой шине;
- устройство сбора и распределения данных также подключено к единой шине.

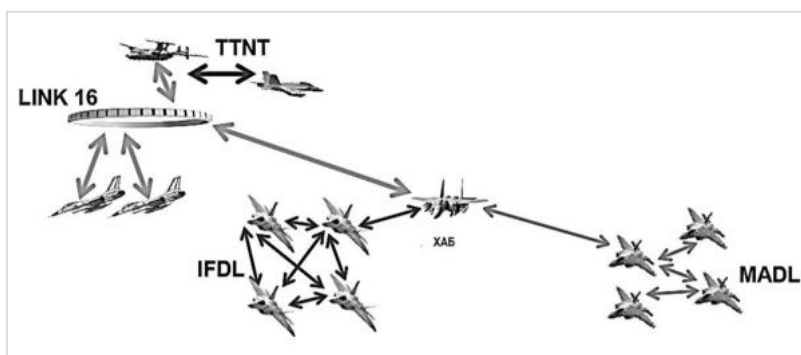


Рис. 1. Схема построения сетевидной сети обмена тактичскими данными ВВС, применяемая США и НАТО

Таблица 1
Протоколы, используемые в комплексах воздушной связи истребителей 4- го поколения ВВС США

Наименование	Скорость передачи данных	Частотный диапазон
Link 16	31,6, 57,6 или 115,2 кбит/с	960-1215 МГц
TTNT	10 Мб/с	1755–1850 МГц (планируется перенос на полосу 2025–2110 МГц)
IFDL		L
MADL	100 Мб/с	Ku

Оборудование по ИМА разрабатывается с учетом требований следующих стандартов - STANAG 4626, ARP 4754, ARP 4761, DO 178C, DO 254, DO 297, ARINC 650, ARINC 651, ARINC 653, ARINC 655, ARINC 661, ARINC 664, ARINC 629, ARINC 653, ARINC 664, MIL-STD-1553.

По данной концепции была построена авионика как, например гражданского Boeing 777, так и сетевидная авионика Rafale, подробнее на системе авионики многоцелевого истребителя пятого поколения F-22 «Раптор», построенную на принципах ИМА и сетевидной парадигме применения.

Центральной и наиболее творческой задачей является синтез облика системы, которая включает: перечень основных модулей; логико-временная диаграмма функционирования системы; принципиально важные соотношения параметров для системы в целом и для отдельных модулей.

Под программноопределяемыми радиосистемами (SDR) понимаются приемопередатчики радиодиапазона, основные режимы которых, такие как несущая частота, полоса приема, тип модуляции могут быть изменены путем обновления программ или настроек в конфигурируемых электронных устройствах, таких как ПЛИС.

Типичная схема реализации передающей части включает в себя формирование цифрового представления сигнала с заданными спектральными свойствами (обычно при помощи конфигурируемых фильтров на ПЛИС), перенос его в аналоговую форму (ЦАП, возможно, с интегрированными интерполирующими цифровыми фильтрами), квадратурный модулятор и генератор несущей частоты. Последние три блока могут быть выполнены на дискретных компонентах либо на схемах с различным уровнем интеграции (например, доступны интегрированные модуляторы и генераторы несущей частоты). Требования к разрядности ЦАП в передающем тракте определяются сложностью сигнала, для большинства стандартов связи достаточно 10-12 бит и частоты квантования порядка десятков МГц.

Приемный тракт в программно определяемых радиосистемах может быть выполнен в различных вариантах, среди которых наиболее распространены схемы с оцифровкой сигнала на промежуточной частоте и схема с прямым преобразованием. В первом варианте для оцифровки применяются АЦП с высокой разрядностью и широкой входной полосой

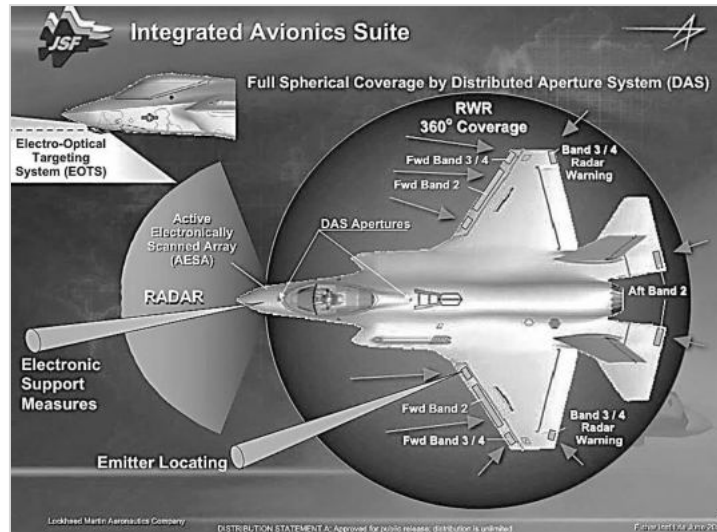


Рис. 2. АФС самолета F-35. АФС характеризуется встраиваемостью в обводы крыла, совместным использованием антенн для нескольких частотных диапазонов и задач и использованием ФАР с узкими лучами



Рис. 3. Аппаратура навигации и связи самолета F-35. Характеризуется использованием широкого спектра изделий, работающих в разных диапазонах волн

Выводы. При построении современных авиационных комплексов навигации и связи, наблюдается объединения всех аппаратных разработок в единую распределенную систему, что должно повышать их надежность, целостность и другие комплексные характеристики.

Библиографический список

1. Secure Network-Centric Aviation Communication/Paul H. Nelson, Mark A. Muha†, and Charles J. Sheehe <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20170008888> 2019-08-19T15:14:14+00:00Z.
2. F-35 Lightning II: Advanced electronics for stealth, sensors, and communications/ Steve Taranovich – EDN network ноябрь 2015.
3. Lockheed F-22 Raptor/Ronald W. Brower The Avionics Handbook, глава 32, CRC Press, 2001 г.

УДК 621.396

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ АКТИВНО-ПАССИВНЫХ ПЕРВИЧНЫХ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТАМИ И ПОСАДКИ ПИЛОТИРУЕМЫХ И БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. В. Нестерович, В. А. Сеницын, Е. А. Сеницын, А. Ю. Яблоков

*Научно-производственное предприятие «Цифровые радиотехнические системы»
Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова*

Современные тенденции совершенствования радиолокационных систем для управления полетами и посадкой летательных аппаратов (ЛА) на базовых и оперативных аэродромах государственной и гражданской авиации РФ и других государств ориентируется на следующие основные перспективные направления развития [1, 2]:

- достижение предельных вероятностных характеристик обнаружения малоконтрастных целей на фоне пассивных и активных помех,
- расширение зоны действия по дальности и угловым координатам,
- обеспечение максимальной решающей способности и точности измерения параметров положения (координат) и движения воздушных объектов,
- использование монохроматических, широкополосных и сверхширокополосных, коротких и сверхдлинных простых и сложных импульсных и непрерывных сигналов,
- создание многофункциональных модульных радиолокационных станций (РЛС) на основе простых и сложных антенн (комбинированных, на АФАР) с последующим интегрированием в многорежимные, многодиапазонные РЛС, адаптирующиеся к помехово-целевой обстановке,
- создание пространственно-распределенных радиолокационных систем в виде активно-пассивных многопозиционных радиолокационных станций (АПМРЛС) с формированием единого системного когерентного-синфазного пространственно-распределенного радиолокационного поля с совместной (кооперативной) обработкой радиолокационной информации.

1. Особенности построения АПМРЛС. АПМРЛС имеют следующие основные особенности:

- пространственный разнос мест расположения (позиций) передающих и приемных каналов РЛС,
 - объединение передающих и приемных каналов АПМРЛС единым системным когерентного-синфазным пространственно-распределенным радиолокационным полем,
 - совместная (кооперативная) обработка радиолокационной информации.
- Совместная (кооперативная) обработка радиолокационной информации состоит в том, что все приемные позиции АПМРЛС, в общем случае, способны принимать:
- отраженные от ЛА сигналы, сформированные в зоне действия при облучении ЛА передающей позицией,

- сигналы, которые излучаются самой целью в диапазонах рабочих частот АПМРЛС.

В АПМРЛС с совместной (кооперативной) обработкой результатов измерений существенно увеличивается объем сигнальной и координатной информации, что позволяет получить полные (возможно, избыточные) данные при измерении суммарных и разностных расстояний, в которых содержится полный объем информации о наклонных дальностях, угловых координатах и параметрах движения ЛА.

Кооперативная обработка радиолокационных сигналов в АПМРЛС является наиболее полной, что позволяет извлечь из сигнальной информации большой объем информационных радиолокационных данных, близкий к потенциально достижимой величине.

Применение кооперативной обработки в АПМРЛС позволяет:

- улучшить вероятностные характеристики обнаружения ЛА,
- повысить точность измерения прямоугольных (сферических) координат и параметров движения ЛА,
- обеспечить временной выигрыш и высокоточную оценку координат и параметров движения ЛА за один цикл (в ходе текущего обзора) обработки информации,
- повысить скрытность работы системы путем использования пассивных каналов измерений и адаптивного гибкого управления режимами излучений и приема передающих и приемных каналов.

2. Близкие аналоги АМРЛС. В настоящее время существуют многопозиционные системы наблюдения (МПСН), основанные на сигналах вторичной радиолокации и АЗН-В 1090 ES (вторичные МПСН). Для нормального функционирования вторичных МПСН летательные аппараты должны быть оснащены ответчиками вторичной радиолокации и транспондерами АЗН-В 1090 ES, что ограничивает область использования таких МПСН управлением воздушным движением гражданской авиации.

Другой известный вид МПСН - пассивные системы, использующие отражения сигналов сотовой связи, FM радио и цифрового телевидения. Недостатком таких пассивных МПСН является ограниченность зоны действия малыми высотами, невозможность гарантировать постоянно заданного уровня вероятности обнаружения ЛА, а зоны действия таких систем ограничены областью действия источников сигналов сотовой связи, радио и телевидения. Примерами таких пассивных МПСН являются системы Silent Guard (Era, Чехия) и Argus 3D (Selex, Италия).

Некоторые компании, такие как Era (Чехия) и Thales (Франция) ведут работы по созданию первичных мультистатических систем наблюдения MSPSR (Multistate Primary Surveillance Radar) с собственным передающим каналом (облучателем).

Системы MSPSR, создаваемые компаниями Era (Чехия) и Thales (Франция), являются ближайшими аналогами АПМРЛС, предлагаемой к разработке. АПМРЛС не имеет аналогов в РФ.

3. Принципы построения АПМРЛС. В основе построения АПМРЛС лежит организация пространственно распределенной наземной сети приема-передающих звеньев, каждое из которых состоит из одного передающего канала (передатчика L, S или X диапазона) и нескольких приемных каналов (приемников) всенаправленного действия (рис. 1) с единым пунктом (сервером) синхронизации, сбора, обработки и передачи информации на командном диспетчерском пункте (КДП).

Основное достоинство АПМРЛС состоит в том, что ЛА обнаруживаются одновременно по трем измерениям (координатам), а текущие оценки измерений возобновляются быстрее по сравнению с темпом оценки традиционных первичных аэродромных РЛС.

АПМРЛС предлагает ряд улучшений по сравнению со штатными первичными обзорными аэродромными РЛС:

- обнаружение ЛА по трем координатам (3D),
- более высокая скорость (темп) обновления информации (1 сек вместо традиционной величины 4-6 с),
- простота, устойчивость к ветровой нагрузке,
- низкое потребление энергии,

- возможность быстрого развертывания на оперативных аэродромах и временных площадках базирования ЛА.



Рис. 1. Пример трехпозиционной АПМРЛС с всенаправленным передатчиком (слева) и тремя приемниками

Конфигурация АПМРЛС легко адаптируется к окружающей среде и может быть оперативно перенастроена.

АПМРЛС может использовать существующие инфраструктуры, такие, например, как мачты базовых станций радиосвязи и передачи данных.

В целях удовлетворения различных потребностей (однаправленный, секторный или круговой обзор пространства) зона действия АПМРЛС может быть изменена, например, расширена путем подключения дополнительных приемных каналов или прямо-передающих звеньев (рис. 2, 3).

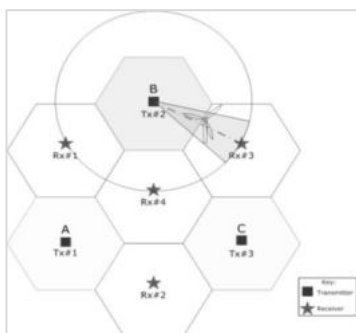


Рис. 2. Пример трехзвенной АПМРЛС, каждое звено которой содержит всенаправленные передатчик и три совместных приемника (передатчик – Tx, приемник – Rx)

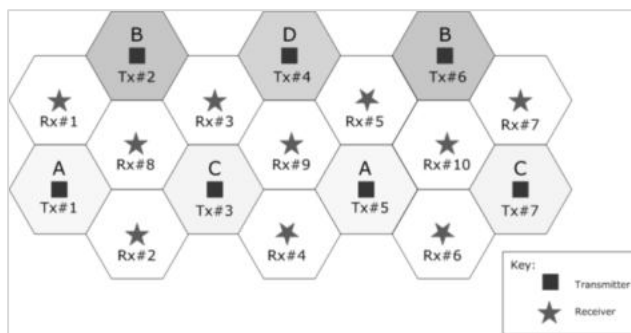


Рис. 3. Пример семизвенной АПМРЛС с расширенной зоной действия (передатчик – Tx, приемник – Rx)

4. Основные направления создания и совершенствования технических решений по построению АПМРЛС. Современные радиотехнические предприятия РФ располагают всеми необходимыми научными и инженерно-производственными ресурсами для разработки, изготовления и проведения испытаний новых перспективных радиолокационных средств для управления полетами и посадки ЛА, в т. ч. АПМРЛС.

Например, Научно-производственное предприятие «Цифровые радиотехнические системы» (НПП «ЦРТС») является держателем подлинников РКД и программно-математического обеспечения (ПМО), осуществляет серийное изготовление, поставку, развертывание, поли-

гонные испытания и сопровождение современных радиотехнических и радиолокационных средств управления полетами ЛА, среди которых можно выделить моноимпульсный вторичный радиолокатор (МВРЛ) «Аврора», аппаратуру зависимого наблюдения АЗН-В, вторичную многопозиционную систему наблюдения «Альманах» [3].

В НИИ «ЦРТС» проводятся работы по совершенствованию технических решений и разработок для их дальнейшего использования при разработке новых радиолокационных средств, а также для создания научно-технического задела с целью разработки АПМРЛС.

Основные направления совершенствования технических решений:

- разработка активных фазированных антенных решеток (АФАР) для антенных систем L, S и X диапазона,
- разработка аппаратуры и программного обеспечения формирования и когерентной обработки сигналов для первичной обзорной РЛС,
- разработка алгоритмов квазислучайного обзора и автоматического сопровождения, как пилотируемых ЛА, так и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА),
- повышение параметров электромагнитной совместимости, скрытности и помехоустойчивости,
- создание комбинированных многодиапазонных антенн,
- разработка линии передачи сигналов управления на борт ЛА и БПЛА с целью повышения уровня безопасности полетов и обеспечения возможности посадки в автоматическом режиме,
- повышение мобильности радиотехнических систем и комплексов путем снижения времени развертывания, горизонтирования и юстировки, внедрения безоблетных технологий ввода их в штатную эксплуатацию,
- повышение технологичности, снижение производственных затрат и сроков серийного изготовления,
- повышение эксплуатационной надежности путем упрощения конструкции и использования полностью твердотельной элементной базы.

Заключение. К основным ожидаемым технико-экономическим эффектам от создания и внедрения АПМРЛС можно отнести следующие достигаемые результаты:

- улучшение тактико-технических характеристик по сравнению с традиционными аэродромными первичными РЛС,
- увеличение полноты и достоверности информационных данных для внешних потребителей путем реализации дополнительных режимов наблюдения, сопровождения целей, оценки параметров метеообразований, позволяющих повысить достоверность обнаружения и измерения параметров положения и движения ЛА,
- обеспечение наблюдения и посадки как пилотируемых ЛА по стандартным линиям посадки (глиссадам снижения), так и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) по произвольным, оперативно планируемыми, линиям посадки,
- повышение уровня безопасности посадки путем реализации режима передачи оперативных данных (отклонений от линии посадки) команд управления по ЛПСУ на борт ЛА или БПЛА, идущих на посадку,
- улучшение параметров помехозащищенности и электромагнитной совместимости с радиоэлектронными средствами, расположенными на аэродроме и работающими в диапазонах частот, близких к рабочим частотам АПМРЛС,
- упрощение аппаратуры составных частей АПМРЛС,
- снижение затрат на серийное изготовление составных частей АПМРЛС.

АПМРЛС является новой перспективной многопозиционной радиолокационной системой, соответствующей современным тактико-техническим требованиям как отечественных, так и международных нормативных документов, соответственно «Федеральных авиационных правил» и International Civil Aviation Organization (ICAO).

АПМРЛС – радиолокационная система, конкурентоспособная как по цене, так и по тактико-техническим характеристикам, имеет важные технические преимущества, обеспечивающие

несомненный интерес со стороны потенциальных потребителей в области создания и эксплуатации радиолокационных средств для управления полетами и посадки летательных аппаратов на стационарных и оперативных аэродромах государственной и гражданской авиации.

Библиографический список

1. Корляков В. С. Радиолокация на современном этапе. URL: i.cons-systems.ru
2. Толкачев А. А. О некоторых тенденциях развития радиолокационных и связных систем/ URL: <http://nauchebe.net/2014/11/o-nekotoryx-tendenciyaх-razvitiya-radiolokacionnyx-i-svyaznyx-sistem/>.
3. npp-crts.ru.

УДК 621.37

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФУНКЦИИ ШЕПОТ–КРИК В БСПС ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗОНОЙ ЗАПРОСА И УМЕНЬШЕНИЯ СИНХРОННЫХ ПОМЕХ

А. В. Нестерович¹, В. А. Сеницын², А. Ю. Яблоков¹

¹Научно-производственное предприятие «Цифровые радиотехнические системы»

²Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Рассматриваются особенности использования функции «Шепот–Крик» в бортовых системах предупреждения столкновений (БСПС). Показано, что использование запросов с функцией Шепот-Крик является основным подходом уменьшения влияния переотражений запросных радиосигналов путем запроса бортовых ответчиков уровнями мощности, близкими к минимальной пороговой величине. Рассчитаны значения формируемых колец дальности в зависимости от соотношения мощностей импульсов запроса S_1 и P_1 .

Введение. Аппаратура бортовой системы предупреждения столкновений (БСПС) должна формировать запросы режима С в формате «общий вызов только режима С», который состоит из трех импульсов P_1 , P_3 и P_4 [1, с. 44]. Этим импульсам может предшествовать импульс S_1 подавления режима С «Шепот–Крик». Огибающая последовательности запросных импульсов режима С показана на рис. 1

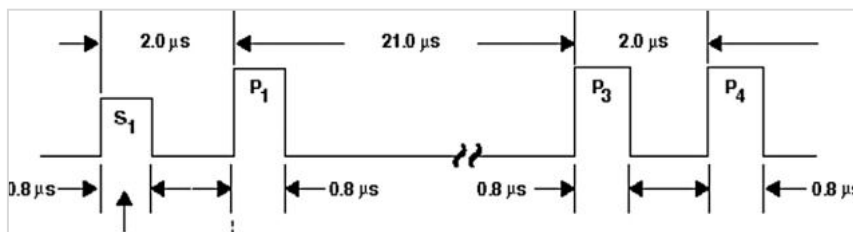


Рис. 1. Огибающая запроса режима С

Исследуемая модель. Использование последовательности импульсных запросов «Шепот–Крик» является одним из вариантов уменьшения влияния количества синхронных помех по линии запроса вверх с одной стороны путем запроса ответчиков летательных аппаратов уровнями мощности P_1 , P_3 и P_4 , соответствующими минимальному порогу обнаружения и

декодирования (MTL), а с другой стороны с уровнем мощности меньше величины, обеспечивающей подавление импульса S1.

Помехи могут контролироваться путем запросов «Шепот–Крик» и путем использования направленной передающей антенны.

Для управления количеством синхронных помех, а также для уменьшения влияния отраженных сигналов по линии запроса должна передаваться последовательность запросов при различных уровнях мощности в процессе каждого периода наблюдения. Каждому из запросов в данной последовательности, кроме запроса с наименьшей мощностью, предшествует импульс подавления S1, который выдается за 2 мкс до импульса P1. Сочетание уровней импульсов S1 и P1 служит мерой качества передачи признака подавления.

Импульс S1 должен передаваться при уровне мощности, меньшем уровня мощности импульса P1.

При излучении сигнала «Шепот–Крик» пространство вокруг запросчика условно можно разбить на три зоны.

Зона подавления сильных сигналов – это ближайшая к запросчику зона. Находящиеся в ней самолетные ответчики (СО) других летательных аппаратов (ЛА) обнаруживают импульсы S1, P1, P3 и не вырабатывают сигнал ответа, воспринимая импульс P1 как сигнал подавления боковых лепестков диаграммы направленности антенны (как импульс P2).

Зона приема является средней по дальности от запросчика областью. Находящиеся в ней самолетные ответчики обнаруживают импульс P1, P3 и не обнаруживают импульс S1. Они передают сигнал ответа, соответствующий временному интервалу между импульсами P1 и P3, который определяет код запроса.

Зона слабых сигналов является дальней областью, в которой СО не обнаруживают ни один из импульсов, входящих в запросную последовательность.

Обычно определяются и используются 5 минимальных базовых последовательностей (таблица 1): по одной последовательности для каждого из 4-х лучей диаграмм направленности (ДН) верхней направленной антенны (всего 4) и одна последовательность для нижней всенаправленной антенны [1, с. 98].

Таблица 1
Состав минимальных базовых последовательностей

Номер Шага	Соотношение S1 и P1	Минимальная эффективная излучаемая мощность запросов (дБм)	Примечание
1	S.....I	52	Верхняя антенна, направление вперед
2	S.....I	48	Верхняя антенна, направление вперед
3	S.....I	44	Верхняя антенна, направление вперед
4	S.....I	40	Верхняя антенна, направление вперед
5	S.....I	36	Верхняя антенна, направление вперед
6I	32	Верхняя антенна, направление вперед
7,8	S.....I	48	Верхняя антенна, направление влево-вправо
8,1	S.....I	44	Верхняя антенна, направление влево-вправо
11,12	S.....I	40	Верхняя антенна, направление влево-вправо
13,14	S.....I	36	Верхняя антенна, направление влево-вправо
15,16I	32	Верхняя антенна, направление влево-вправо
17	S.....I	43	Верхняя антенна, направление назад
18	S.....I	39	Верхняя антенна, направление назад
19	S.....I	35	Верхняя антенна, направление назад
20I	31	Верхняя антенна, направление назад
21	S..I	34	Нижняя всенаправленная антенна
22	S..I	32	Нижняя всенаправленная антенна
23	S..I	30	Нижняя всенаправленная антенна
24	S..I	28	Нижняя всенаправленная антенна

Примечания:

- I обозначает ERP запросных сигналов P1, P2 и P4.

- S обозначает ERP сигнала подавления S1.
- S.I означает, что ERP сигнала на 3 дБ меньше, чем ERP запросного сигнала.
- S.....I означает, что ERP сигнала на 10 дБ меньше, чем ERP запросного сигнала.
- Сигналы S1 не передаются при последних шагах каждого квадранта.
- ERP – эффективная излучаемая мощность.

2. Практические результаты. Зависимость мощности на входе приемника от мощности передатчика, коэффициента усиления антенны по приему и передаче, длины волны с учетом потерь на передачу и прием, а также потерь затухания на рабочей частоте от расстояния определяется выражением для переменных в логарифмическом масштабе [2, с. 31]

$$P_{rec} = ERP_{tr} + G_{rec} - 32,7 - 20\log_{10}(R) - L_{rec} - 0,0065R / 1852 \quad (1)$$

где $ERP_{tr} = P_{tr} G_{tr} / L_{tr}$ - эффективная излучаемая мощность передатчика

Коэффициент усиления антенны G_{rec} и G_{tr} , используемые в уравнении (1), необходимо выбирать с учетом получения необходимого уровня мощности на входе приемника. Коэффициент усиления приемной и передающей антенны будем рассматривать под углом места 0 градусов [2, с. 31]. Анализ выполним при следующих типовых величинах параметров, приведенных в выражении (1):

- минимальная принимаемая мощность на входе приемника 99 дБ, (стандартная для СО MLT);
- передаваемая мощность на выходе передатчика от 28 до 52 дБм (из заданного диапазона на реализации функции «Шепот–Крик»);
- коэффициент усиления антенны передатчика (БСПС) 3 дБ под углом места – 0° для верхней антенны и минус 1 дБ для нижней;
- коэффициент усиления антенны приемника (ответчика) 0 дБ под углом места – 0°;
- суммарные потери на передачу – 3 дБ;
- суммарные потери на прием – 3 дБ;
- $0,0065R/1852$ – атмосферное затухание, при $\lambda=29,13$ см ($f=1030$ МГц) атмосферные потери, зависящие от длины волны, составляют 0,0065 дБ на морскую милю (1,852 км);
- константа $-2.7\text{дБ} = 20\log_{10}(0.29/(4\pi))$
- R – расстояние между приемником и передатчиком.

Результаты расчета представлены на рис. 3 и 4.

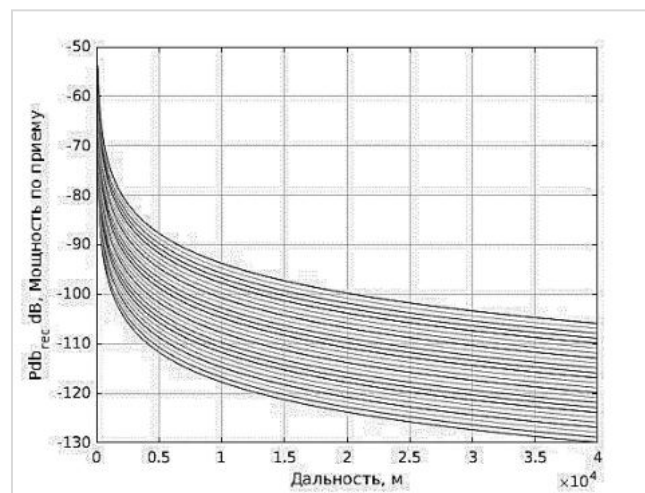


Рис. 3. Зависимость мощности сигнала на входе приемника от дальности при мощности передатчика от 52 до 28 дБм

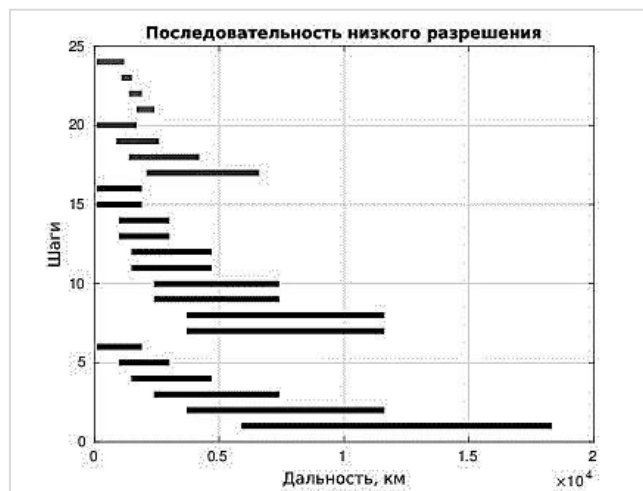


Рис. 4. Зависимость колец дальности при мощности передатчика от 52 до 28дБм

Заключение. Показано, что использование запросов Шепот-Крик является одним из основных вариантов уменьшения количества синхронных помех БСПС по линии вверх путем организации запроса ответчиков уровнями мощности, близкими к пороговому значению.

Представлены значения параметров формируемых колец дальности в зависимости от соотношения мощностей импульсов запроса S1 и P1.

Библиографический список

1. DO-185B RTCA. Minimum Operational Performance Standards for Traffic Alert and Collision Avoidance System II (TCAS II) Volume 1. RTCA, Inc., 1828 L Street, NW, Suite 805, Washington: DC 20036-5133 USA, 2008. 744 pp.
2. Organization The Secretary General International Civil Aviation. Руководство по вторичным обзорным радиолокационным (ВОРЛ) системам. 999 University Street Montreal, Quebec Canada H3C 5N7: Международная организация гражданской авиации, 2004. 257 с.

УДК 621.37

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДУШНОЙ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ УГРОЗ СТОЛКНОВЕНИЙ DAIDALUS

А. В. Нестерович¹, В. А. Сеницын², А. Ю. Яблоков¹

¹Научно-производственное предприятие «Цифровые радиотехнические системы»

²Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

1. Назначение системы DAIDALUS. Detect and Avoid Alerting Logic for Unmanned Aircraft Systems (DAIDALUS) принимает от подсистем наблюдения относительные параметры окружающих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для расчета исходных положений и начальных входных пилотажно-навигационных данных, которые в свою очередь используются для определения угроз столкновения БПЛА.

Функциональная архитектура высокого уровня системы DAIDALUS изображена на рис. 1.

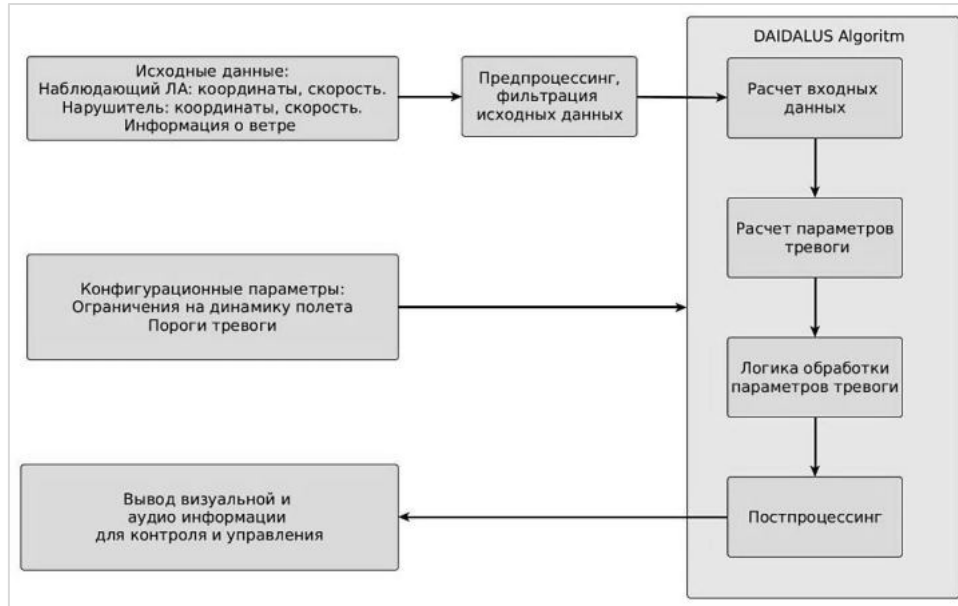


Рис. 1. Структурная схема DAIDALUS

Логика обнаружения, предотвращения и оповещения столкновений для БПЛА в системе DAIDALUS реализуется через программное обеспечение, содержащее алгоритмы предупреждения столкновений БПЛА в воздухе. Функциональные требования подробно изложены в ряде известных документов, например, в [1].

Библиотека программного обеспечения DAIDALUS выпущена под соглашением об открытом исходном коде, разработчиком является Управление космическим пространством NASA (США). Библиотека программного обеспечения DAIDALUS не предназначена для использования в качестве фактического промышленного стандарта для реализации функций обнаружения и предотвращения столкновений БПЛА. Код открыт и предоставлен с сопроводительной документацией, но без какой-либо гарантии.

2. Начальные исходные данные для БПЛА. Каждый БПЛА характеризуется набором параметров движения в трехмерном пространстве: широта, долгота, высота, а также курс, горизонтальная и вертикальная составляющие скорости.

Параметрами, влияющими на координаты БПЛА, являются также скорость и направление движения ветра.

Введем следующие исходные навигационные данные:

- U_1 - начальный управляющий крен
- U_2 - скорость крена
- U_3 - начальный крен
- U_4 - курс начальный
- U_5 - начальные координаты x
- U_6 - начальные координаты z .

3. Модель динамики движения окружающих воздушных судов. Движение воздушных судов (ВС) моделируется в виде материальной точки и может быть описано следующей системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \gamma = f_k(t), \dot{H} = f_H(t), V = V_{zd}(t) \\ F_1 = (\gamma - U_1)/t_{kp} \\ F_2 = (U_1 - 2 \cdot \xi \cdot t_{cd} \cdot U_2 - U_3)/t_{cd}^2 \\ F_3 = U_2 \\ F_4 = \dot{K} = -(g/V) \cdot \operatorname{tg}(U_3) \\ F_5 = V \cdot \cos(U_4) \\ F_6 = -V \cdot \sin(U_4) \end{cases} \quad (1)$$

где K – курс; \dot{K} – интенсивность маневра по курсу; \dot{H} – интенсивность маневра по высоте; $f_k(t), f_H(t), V_{zd}(t)$ – план полета: выполнение маневра в заданное время; t – текущее время проведения сценария; V – относительная скорость в плоскости X-Z; $V_{zd}(t)$ – заданная относительная скорость в плоскости X-Z; $t_{kp} = 1.75$ – постоянная механизма крена; $\xi = 0.711$ – декремент затухания; $t_{cd} = 0.77$ – постоянная времени передаточной функции «самолет-САУ».

Интегрируя систему дифференциальных уравнений (1), можно получить координаты $x = U_5, z = U_6$.

Зная координаты, можно вычислить расстояние между ВС и БПЛА, а также азимут на ВС по выражениям

$$\begin{cases} U_{1(i+1)} = U_{1i} + F_1 \cdot \tau \\ U_{2(i+1)} = U_{2i} + F_2 \cdot \tau \\ U_{3(i+1)} = U_{3i} + F_3 \cdot \tau \\ U_{4(i+1)} = U_{4i} + F_4 \cdot \tau \\ U_{5(i+1)} = U_{5i} + F_5 \cdot \tau \\ U_{6(i+1)} = U_{6i} + F_6 \cdot \tau \end{cases} \quad (2)$$

где i – индекс шага интегрирования; j – номер навигационного параметра τ – шаг интегрирования. Примечание – значение курса должно ограничиваться в пределах $0 \leq K < 360$.

Из «треугольника встречи» двух ВС, выполняющих прямолинейный полет на одной высоте с постоянной скоростью, можно найти выражение для определения расстояния между самолетами через время t [2, с. 16].

$$\begin{cases} D = \sqrt{(V_o \cdot t^2 - 2d \cdot V_c \cdot t + d^2)} \\ V_o = (v_1^2 - 2 \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot \cos(\gamma) + v_2^2) \\ V_c = v_1 \cdot \cos(\alpha) - v_2 \cdot \cos(\alpha + \gamma) \end{cases} \quad (3)$$

где t – текущее время; v_1 – скорость первого ВС; v_2 – скорость второго ВС; γ – относительный курс; α – пеленг второго самолета относительно направления полета первого; V_o – квадрат относительной скорости; V_c – скорость сближения; d – расстояние между самолетами при $t = 0$.

4. Моделирование движения. Рассмотрим для примера взаимное движение защищаемого ВС и нарушителя, движущихся на одной высоте, навстречу со скоростью 50 м/с и 100 м/с, на высоте 1000 м, на расстоянии 10000 м, без маневров по курсу, скорости и высоте (рис. 2). На рис. 2 – 4 показаны оценки угрозы столкновения в горизонтальной плоскости.

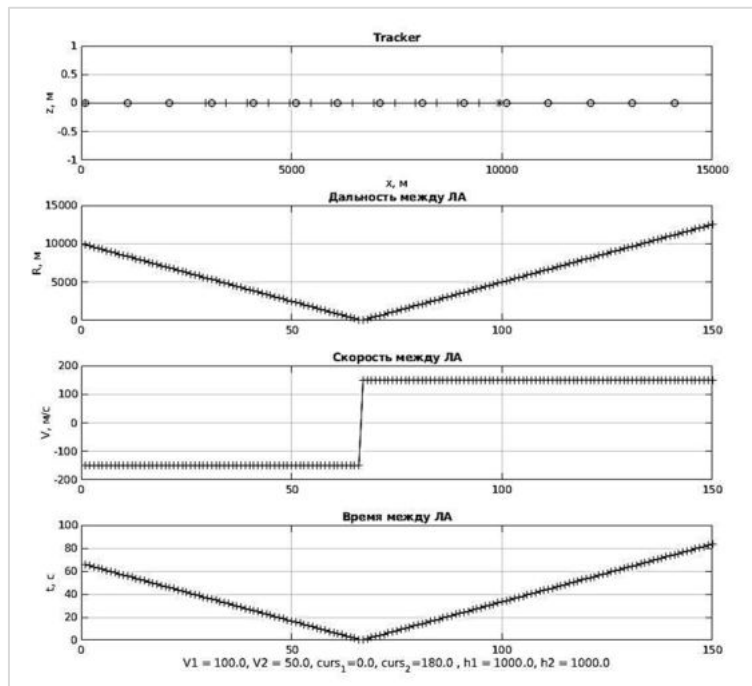


Рис. 2. Простое движение ВС навстречу друг другу

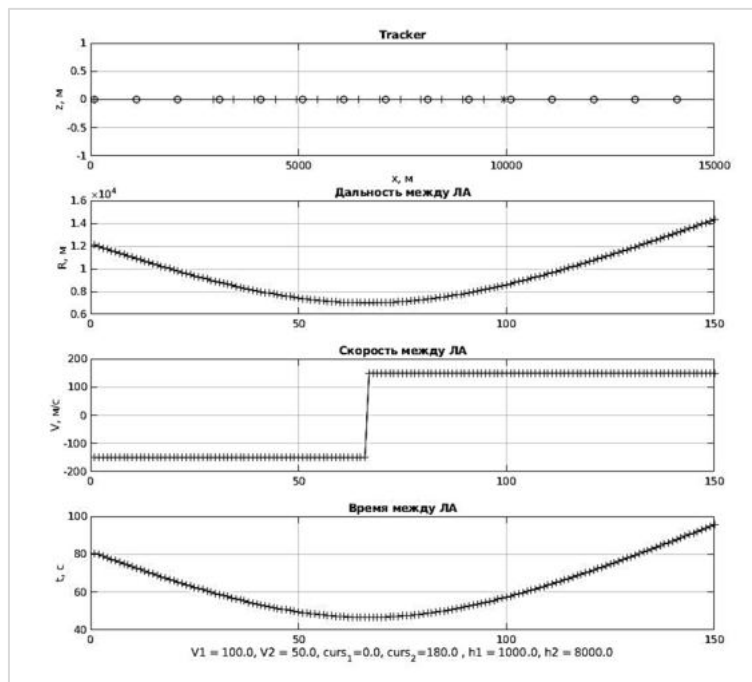


Рис. 3. Простое движение ВС навстречу друг другу на разной высоте

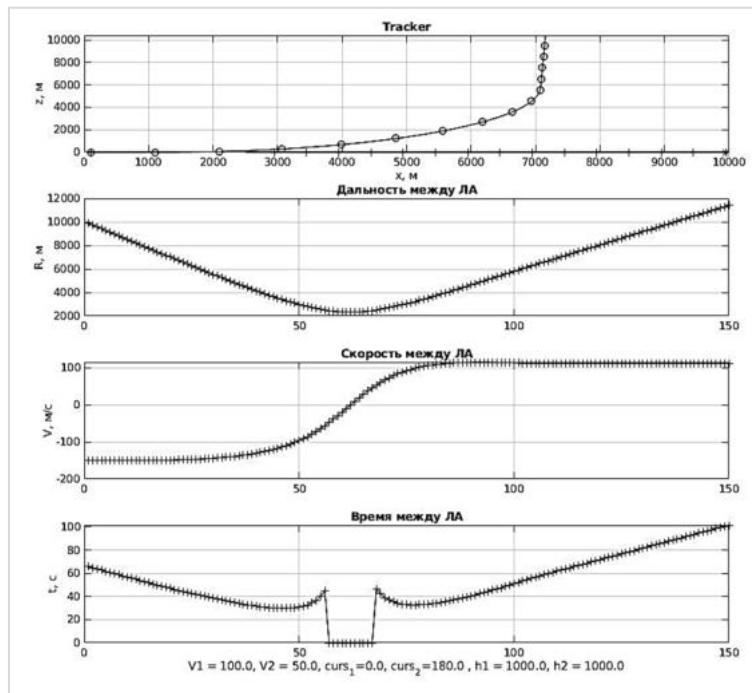


Рис. 4. Простое движение ВС навстречу друг другу на одной высоте, с разворотом на 90 градусов с 10 по 100 секунду

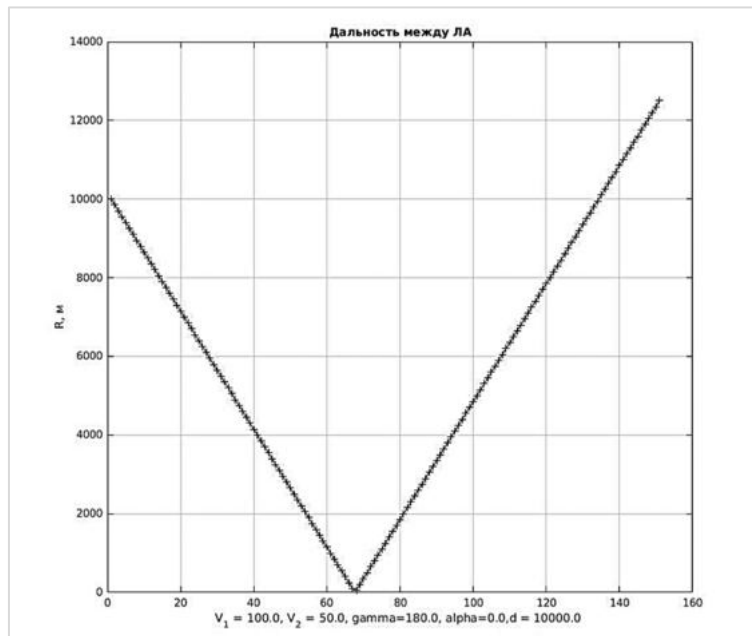


Рис. 5. Простое движение ВС навстречу друг другу

Из рис. 2 видно, что можно выделить признаки, которые характеризует опасное сближение ВС, к которым можно отнести дальность, скорость и время до столкновения. Дальность между ВС уменьшается с 10000 м до 0, точки столкновения, при этом скорость между ВС начальная отрицательная, что говорит о сближении ВС и после точки столкновения меняет знак, что говорит, что ВС расходятся.

На рис. 3 представлены графики, описывающие движение с аналогичными параметрами, но ВС летят на разной высоте. Из графиков видно, что в отличие от движения на одной высоте, минимальное расстояние между ВС не равно нулю, а равняется разности высот в точке минимального сближения, при этом скорость сближения меняет знак.

На рис. 4 приведены графики, описывающие движение ВС навстречу друг другу на одной высоте с разворотом на 90 градусов с 10 по 100 секунду. Можно заметить, что скорость между ВС не меняется скачком, как в первом и втором случае, а плавно переходит через ноль и меняет знак. При этом время между ВС, которое считается как отношение расстояния между ВС к скорости сближения, имеет точки неопределенности, которые необходимо учитывать при выставлении порогов тревоги.

Для примера в алгоритме вычисления времени, проведена проверка для случая, когда скорость в диапазоне от -50 до 50 м/с, полагая, что скорость сближения между ВС равна нулю.

Используя формулу (3), можно получить аналогичную зависимость дальности между ВС от текущего времени (рис. 5).

Заключение. В системах предупреждения столкновений ВС оценку угрозы столкновения целесообразно производить отдельно в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Исследованы формулы для расчета расстояния между ВС в обобщенном виде при произвольном движении, когда на основании расчета координат цели из заданной модели движения ВС, можно получить параметры оценки угрозы столкновения, такие как расстояние между ВС, взаимная скорость, время до столкновения.

Показано, что результаты общего анализа сходятся с результатами частного расчета из «треугольника встречи» при равномерном прямолинейном движении ВС на одной высоте.

Библиографический список

1. DO-360 RTCA. Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Detect and Avoid (DAA) Systems. 1150 18th Street, NW, Suite 910 Washington, DC 20036-4001, USA: RTCA, Inc., 2017. 838 pp.

2. Бычков С. И., Пахолков Г. А., Яковлев В. Н. Радиотехнические системы предупреждения столкновений самолетов. М.: Советское радио, 1977. 272 с.

УДК 621.37

ФАЗИРОВАНИЕ ПРИЕМНО-ПЕРЕДАЮЩИХ ТРАКТОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

А. В. Нестерович¹, В. А. Сеницын², А. Ю. Яблоков¹

¹Научно-производственное предприятие «Цифровые радиотехнические системы»

²Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Введение. Бортовая аппаратура предупреждения столкновений (БСПС) для уменьшения синхронных помех, должна формировать в процессе работы следующие диаграммы направленности 4-элементной круговой антенной решеткой [1, с. 44].

- ДН вперед верхняя антенна.

- ДН подавления вперед верхняя антенна.
- ДН влево верхняя антенна.
- ДН подавления влево верхняя антенна.
- ДН вправо верхняя антенна.
- ДН подавления вправо верхняя антенна.
- ДН назад верхняя антенна.
- ДН подавления назад верхняя антенна.
- Круговая ДН нижняя антенна.

Для формирования заданной ДН по приему и передаче необходимо фазирование приемо-передающих трактов.

Алгоритм фазирования приемо-передающих трактов. Общая задача в общем виде состоит в том, что нужно оценить фазовые задержки на двух частотах 1030 и 1090 МГц в четырех приемных каналах (1090 МГц), а также фазовые задержки в кабелях и антенне (1030/1090 МГц), то есть найти 4 неизвестных на прием и 4 фазовые задержки в кабелях и оценить 2 фазовые задержки в антенне, а также фазовые задержки в 4 передатчиках (1030 МГц), всего 14 неизвестных.

Приемник и передатчик имеет возможность работать на частотах 1030 МГц и 1090 МГц. Последовательно будем проводить фазирование сначала на частоте 1030 МГц, а потом аналогичные действия проведем на частоте 1090 МГц.

Схема фазовых набегов для фазирования приемников по приему приведена на рисунке 1.

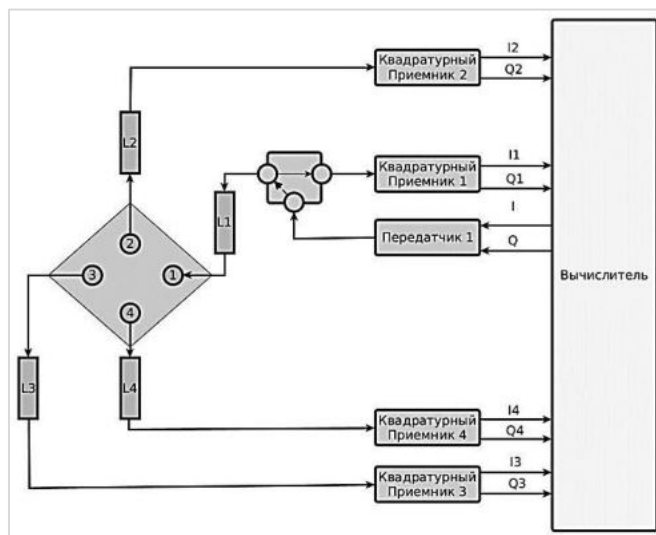


Рис. 1. Схема фазовых набегов для фазирования приемников по приему

Введем следующие обозначения согласно рис. 1.

- φ_{oi} – out – передатчик, неизвестный сдвиг фазы на выходе i -го передатчика;
- φ_{Li} – попе – неизвестный сдвиг фазы в i -м кабеле $i = 1, 2, 3, 4$
- φ_{Ak} – антенна – неизвестный сдвиг фазы в антенне $k=1, 2$, считаем, что фазовые набегги отличаются только по длинной и короткой стороне.
- φ_i – in – приемник, неизвестный сдвиг фазы в приемнике $i = 1, 2, 3, 4$.

Вычислитель формирует заданные квадратуры I, Q, которые задают сигнал с заданной начальной фазой, относительно опорного гетеродина. Сформированный сигнал с заданной начальной фазой проходит передатчик – кабель - антенну – кабель – приемник – вычислитель. То есть задаем начальную фазу относительно опорного генератора и затем считаем ее после

приемника. Последовательно подключая передатчики к соответствующим входам антенны, делаем $3 \times 4 = 12$ измерений, еще 4 измерения делаются не через антенну, а внутри приемо-передающего модуля, подавая ослабленный сигнал с выхода передатчика на вход приемника. Еще 4 измерения делаем, подключая соответствующий передатчик к измерительной цепи для оценки фазовой задержки в передатчике. Итого – 20 измерений.

Задача состоит в том, чтобы используя схему рис. 1, сделать необходимые измерения. На основании результатов измерений можно составить систему уравнений, описывающую фазовые набеги в приемо-передающем тракте. Затем необходимо решить систему уравнений и получить оценки неизвестных фазовых параметров.

Используя схему рис.1 и последовательно подключая передатчики и приемники к соответствующим каналам, можно записать систему уравнений.

Обозначим $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ неизвестные фазовые набеги на стороне приемников также неизвестны фазовые набеги в антенне $\varphi_{nashort}$ по стороне и φ_{nalong} по диагонали и неизвестны фазовые набеги в кабелях $\varphi_{L1}, \varphi_{L2}, \varphi_{L3}, \varphi_{L4}$, а также $\varphi_{O1}, \varphi_{O2}, \varphi_{O3}, \varphi_{O4}$, получаем 14 неизвестных.

Запишем вектор неизвестных X – (1).

Будем искать решение в матричном виде уравнения записанного в виде $A \times X = B$. Матрицу A запишем следующим образом, исходя из соответствующих 20 измерений и 14 неизвестных. Матрица A будет иметь размерность 20 на 14 – (2)

$$\begin{cases}
 X = [x_1; x_2; \dots x_{14}] \\
 \left. \begin{aligned}
 x_1 &= \varphi_{O1} \\
 x_2 &= \varphi_{O2} \\
 x_3 &= \varphi_{O3} \\
 x_4 &= \varphi_{O4} \\
 x_5 &= \varphi_1 \\
 x_6 &= \varphi_2 \\
 x_7 &= \varphi_3 \\
 x_8 &= \varphi_4 \\
 x_9 &= \varphi_{A_{short}} \\
 x_{10} &= \varphi_{A_{long}} \\
 x_{11} &= \varphi_{L1} \\
 x_{12} &= \varphi_{L2} \\
 x_{13} &= \varphi_{L3} \\
 x_{14} &= \varphi_{L4}
 \end{aligned} \right\} \quad (1)
 \end{cases}$$

$$A = \begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1
 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Оценим ранг матрицы A . Рангом матрицы называется максимальное число линейно независимых строк (столбцов). Несколько строк (столбцов) называются линейно независимыми, если ни одна из них не выражается линейно через другие. У нас 14 неизвестных, нам нужно более 14 независимых уравнений, чтобы ранг матрицы был больше 14.

Для ранга представленной матрицы

$$rank(A) = 13.$$

Система уравнений не решается, нужно исключать одно неизвестное.

Будем считать, что фазовые задержка в антенне стабильны и их можно точно оценить заранее. Тогда можно добавить две строчки в матрицу A .

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Тогда получаем ранг матрицы 14.

Для решения системы линейных уравнений через нахождение обратной матрицы, необходимо чтобы матрица была квадратной.

Выбираем 14 независимых уравнений из полученных 22 уравнений.

$$A_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Определитель матрицы $\det(A_k) = 32$ не равен нулю.

Оценим обратную матрицу.

Решение находим простым матричным перемножением

$$X_{result} = inv(A) * B,$$

где B - вектор измерений, X_{result} - оценки фазовых задержек.

Заключение. Представлен общий подход к фазированию каналов приема приемно-передающих трактов бортовой аппаратуры предупреждения столкновений путем измерений соответствующих фазовых задержек с последующим составлением и решением системы линейных уравнений.

Решение позволяет фазировать приемно-передающие тракты БСПС при условии, что фазовые задержки в антенне стабильны и определены, а также есть измерительная цепь, которая позволяет оценить фазовую задержку одного из 4-х передатчиков.

Библиографический список

1. DO-185B RTCA. Minimum Operational Performance Standards for Traffic Alert and Collision Avoidance System II (TCAS II) Volume 1. RTCA, Inc., 1828 L Street, NW, Suite 805, Washington: DC 20036-5133 USA, 2008. 744 pp.

КОМПАКТНЫЙ МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ X-ДИАПАЗОНА

Д. О. Перминов

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Описан мостовой делитель мощности на основе микрополосковой линии, его миниатюризация. Проектируемый делитель предназначен для работы в X-диапазоне. Метод миниатюризации делителя основан на замене четвертьволновых отрезков линии на эквивалентные отрезки линии с Т-образными шлейфами. Основываясь на этом методе был спроектирован и проанализирован микрополосковый 3 дБ делитель мощности. В качестве материала подложки выбран Rogers 4350В с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,5$ и толщиной $h = 0.762$ мм. В результате проведенных исследований удалось уменьшить площадь делителя на 25% по сравнению со стандартной конструкцией.

1. Введение. Делители мощности являются одним из наиболее важных элементов в СВЧ устройствах. В X-диапазоне делители мощности применяются в диаграммо-образующих схемах, фазовращателях, детекторах сигнала. Перечисленные узлы находят применение в наземных и бортовых радиолокационных станциях, бортовых приемо-передающих системах летательных аппаратов, а также используются в активных фазированных антенных решетках. Наиболее распространенным делителем мощности является мост Уилкинсона, его стандартная конструкция включает в себя два плеча четвертьволновых отрезков линий, которые обладают высокой степенью развязки [1]. Недостатком моста Уилкинсона является большой размер из-за использования четвертьволновых линий.

Миниатюризация микрополосковых делителей мощности уже обсуждалась ранее в других работах. Для уменьшения размеров используются элементы с сосредоточенными параметрами [2], свернутые в меандр линии [3], связанные линии [4], радиальные шлейфы [5] и др.

Уменьшение геометрических размеров топологии основано на замене четвертьволновых отрезков линий на отрезки линии с Т-образными шлейфами, обладающие схожими характеристиками. Диапазон рабочих частот расширен с помощью.

2. Линия с Т-образными шлейфами. Линия с Т-образными шлейфами позволяет уменьшить размер топологии за счет замещения четвертьволнового отрезка линии с сопротивлением $Z_0 = 70,7$ Ом, тремя отрезками линии с различными сопротивлениями и меньшей суммарной длиной. Линия с Т-образными шлейфами изображена на рис. 1, она состоит из двух линий с сопротивлением Z_1 и электрической длиной θ_1 , и линии с сопротивлением Z_2 и электрической длиной θ_2 .

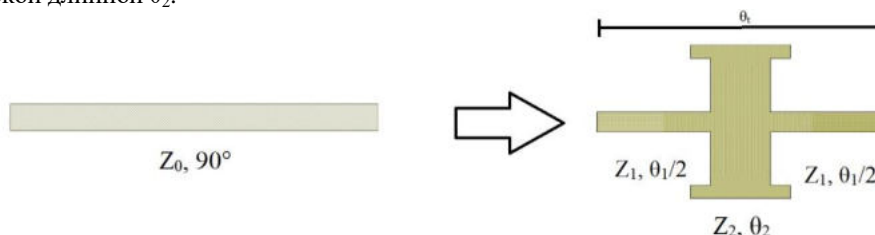


Рис. 1. Замена четвертьволновой линии на линию с Т-образными шлейфами

Для того, чтобы эти две линии были эквивалентны необходимо приравнять их матрицы рассеяния на частоте f_0 . Для повышения компактности делителя мощности ширина и длина

линий шлейфа были выбрана максимально возможными из условия обеспечения допустимого зазора между проводниками $g = 0,3$ мм

3. Проектирование топологии делителя. Изоляция плеч в мосте Уилкинсона обеспечивается параллельно включенным резистором. В качестве резистора выбран чип-резистор в корпусе 0402. Использование линии с Т-образными шлейфами позволяет эффективно использовать внутреннее пространство мостового делителя. Проектирование и анализ всех характеристик проведен с помощью ПО NI-AWR Design Environment. Для настройки делителя на желаемую частоту необходимо обеспечить такие размеры линий с Т-образными шлейфами, чтобы их сопротивление на несущей частоте было равно $Z_0 = 70,7$ Ом и длина $\theta_l = 90^\circ$. В качестве диэлектрика выбран Rogers 4350b с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,5$ и толщиной $h = 0.762$ мм, толщина фольги $t = 35$ мкм. Таким образом, на рис. 2 изображена топология проектируемого делителя.

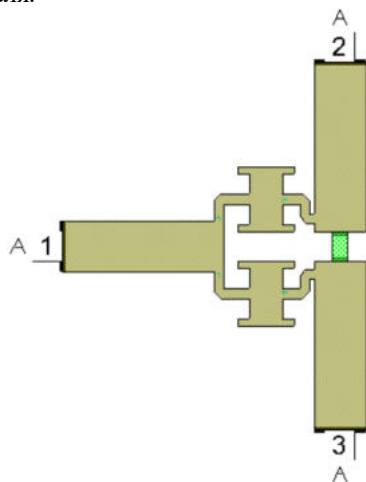


Рис. 2. Делитель мощности на основе линий с Т-образными шлейфами

На рис. 3 – 4 изображены результаты численного электромагнитного моделирования проектируемого делителя, на центральной частоте 9 ГГц.

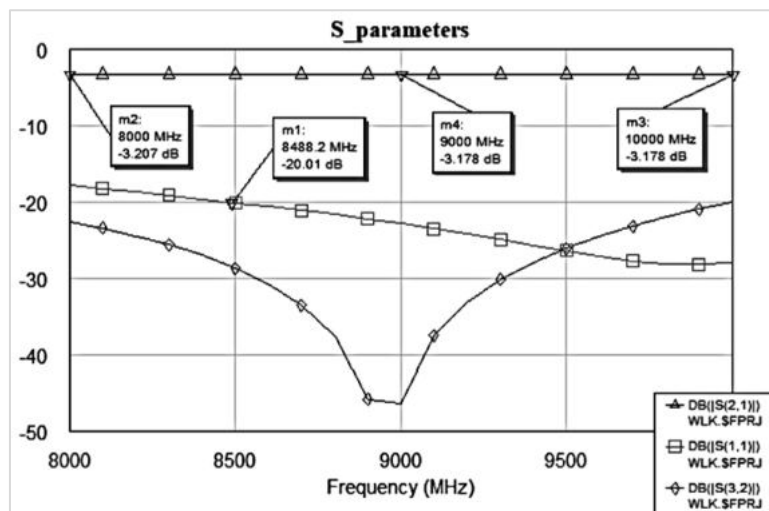


Рис. 3. S-параметры проектируемого делителя

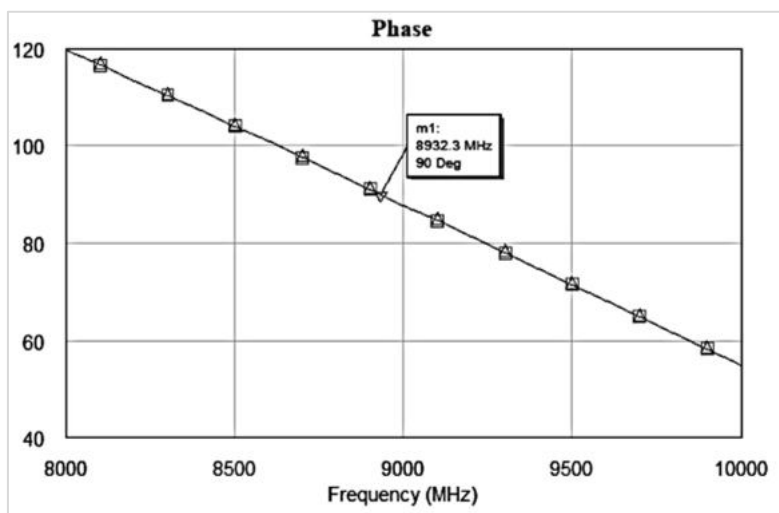


Рис. 4. Зависимость фазы от частоты

Из рисунка 3 видно, что полоса рабочих частот, по уровню изоляции первого порта минус 20 дБ, составляет примерно 1,5 ГГц. Изоляция между вторым и третьим портом не менее минус 20 дБ во всем X-диапазоне. Из рисунка 4 видно, что на центральной частоте 9 ГГц разность фаз составляет 90 градусов.

Для определения степени миниатюризации сравним спроектированный делитель со стандартной конструкцией моста Уилкинсона на центральной частоте 9 ГГц. В таблице 1 приведен сравнительный анализ двух топологий.

Таблица 1
Сравнение миниатюрной и стандартной топологии

Топология	Полоса по уровню -20 дБ	Геометрические размеры
Стандартная	2 ГГц	4,3×4,6 мм
Спроектированная в данной работе	1,5 ГГц	3,1×4,8 мм

С помощью применения линии с Т-образным шлейфом удалось уменьшить площадь, занимаемую мостовым делителем мощности на 25%. Изоляция первого порта компактного делителя на центральной частоте 9 ГГц составляет минус 23 дБ.

4. Заключение. В ходе выполнения работы была спроектирована топология компактного СВЧ делителя мощности. В качестве материала подложки выбран диэлектрик Rogers 4350b, линия – микрополосковая. Размер стандартного моста Уилкинсона был уменьшен посредством замены четвертьволновых отрезков линии на эквивалентные отрезки линии с Т-образным шлейфом. Спроектированный делитель занимает на 25% меньшую площадь, чем стандартная топология. Полоса частот компактного делителя по уровню минус 20 дБ составляет 1,5 ГГц. На центральной частоте 9 ГГц описанный делитель мощности имеет разность фаз 90 градусов, что соответствует стандартной конфигурации мостового делителя Уилкинсона.

Библиографический список

1. E. J. Wilkinson, «An N-Way Hybrid Power Divider», IRE Trans. Microwave Theory Techniques, vol. 8, no. 1, pp. 116 – 118, 1960.

2. *Y. C. Chiang and C. Y. Chen*, «Design of a wide-band lumped-element 3dB quadrature coupler», *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 49, No. 3, pp. 476-479, Mar. 2001.
3. *S. Rehnmark*, «Meander-Folded Coupled Lines», *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 26, No. 4, pp. 225-230, Apr. 1978.
4. *J. G. Yang, Y. Jeong, S. Choi and K. Y.*, «A new compact 3-D hybrid coupler using multi-layer microstrip lines at 15 GHz», *Proc. of the 36th European Microwave Conf.*, pp. 25-28.
5. *Bo Zhou, Hao Wang and Weixing Sheng*, «A novel UWB Wilkinson power divider», *The 2nd International Conference on Information Science and Engineering*, Hangzhou, China, 2010, pp. 1763-1765.

УДК 621.396.933.2

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЛЕТНОГО КОНТРОЛЯ

Д. О. Притчин

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры»

В связи с интенсивным развитием авиации и увеличением скоростей полетов летательных аппаратов (ЛА) непрерывно возрастают требования к качеству и объективности проверки параметров бортовой и наземной навигационной аппаратуры радиомаячных систем метрового и дециметрового диапазона.

Проверка параметров навигационной аппаратуры радиомаячных систем осуществляется, как на наземном оборудовании, так и на борту ЛА [1]. Летный контроль позволяет удостовериться в том, что параметры, установленные при наземном контроле, обеспечивают ЛА необходимой объективной навигационной информацией.

Летная проверка средств связи и радиомаячных систем (РМС) – наиболее достоверная форма контроля параметров и характеристик, в том районе воздушного пространства, где они непосредственно используются для управления летательными аппаратами. Летные проверки проводятся:

- самолетами, оборудованными аппаратурой летного контроля – самолетами-лабораториями (СЛ);
- учебно-боевыми самолетами со штатным оборудованием.

Цель летной проверки – своевременный и качественный контроль соответствия параметров и характеристик наземных и бортовых радиотехнических средств (РТС) для обеспечения безопасности полетов ЛА.

Проверки выполняются:

- при вводе средств связи и РМС в эксплуатацию;
- после проведения ремонта или ремонта отдельных блоков, который влияет на изменение основных технических параметров;
- после установки РМС на новых позициях, изменения места установки антенных систем, изменения угла глиссады РМС;
- после смены рабочих частот РМС [2].

В зависимости от задач летные проверки подразделяются на следующие виды:

- первичные;
- периодические;
- предполетные;
- специальные.

Первичные летные проверки проводятся для определения соответствия параметров, характеристик и тактических возможностей средств связи и РМС полетов на данном аэродроме требованиям руководящих документов и пригодности их для обеспечения полетов.

Периодические летные проверки проводятся с целью контроля соответствия основных параметров и характеристик РМС инструментального захода на посадку в процессе их эксплуатации.

Предполетные летные проверки проводятся с целью контроля работоспособности РМС, а также готовности станций связи и РМС к обеспечению полетов.

Специальные летные проверки проводятся при расследовании летных происшествий, а также при обнаружении отклонений основных параметров и характеристик аппаратуры по наземным средствам контроля.

Контроль соответствия параметров и характеристик наземных и бортовых РТС включает в себя:

- определение технических характеристик радиомаяков (дальность действия с учетом углов закрытия, непрерывности выдачи информации) в направлении трасс воздушного движения или в любых двух направлениях, если по данному маяку ведутся полеты на всех азимутах;
- определение правильности привязки маяков путем облетов контрольных точек-ориентиров;
- определение технических характеристик радиомаяка при полетах по «коробочке».

Для обеспечения безопасности полетов ЛА необходимо разрабатывать автоматизированную систему летного контроля (АСЛК), установленную на СЛ и предназначенную для летных проверок параметров и характеристик наземных средств радиотехнического обеспечения полетов (РТОП), средств связи и систем светосигнального оборудования (ССО) на всех этапах испытаний, в том числе:

- 1) инструментальной системы посадки (ИЛС);
- 2) радиомаяков ближней навигации (РСБН), дальномерного маяка (ДМЕ);
- 3) автоматических радиопеленгаторов (АРП);
- 4) отдельных приводных радиостанций (ОПРС);
- 5) систем светосигнального оборудования (ССО) аэродромов;
- 6) посадочных радиолокаторов (ПРЛ);
- 7) радиолокационных станций (РЛС) и вторичных радиолокаторов (ВРЛ).

Структура АСЛК представлена на рис. 1.

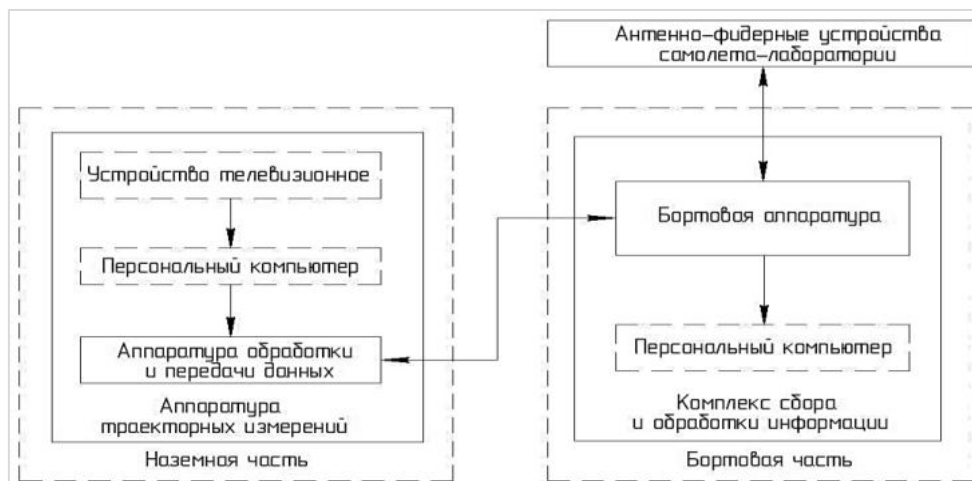


Рис. 1. Структура АСЛК

АСЛК в процессе полета обеспечивает:

- 1) прием и преобразование высокочастотных сигналов радиомаячных систем посадки и ближней навигации;
- 2) прием запросных сигналов радиолокаторов и передачу ответных сигналов;
- 3) автоматизированную обработку информации с вычислением параметров радиомаячных систем посадки и ближней навигации с помощью бортовой аппаратуры сбора и обработки информации;
- 4) индикацию измеренных параметров на дисплее персонального компьютера и документирование на принтере;
- 5) контроль наличия и формы сигналов проверяемых систем;
- 6) ввод исходных данных, необходимых для проведения летных проверок РМС;
- 7) индикацию сигналов отклонения от заданного курса или глиссады снижения в графической форме;
- 8) формирование сигналов на стрелочный индикатор положения и в систему электронной индикации экипажа для обеспечения возможности пилотирования СЛ при полетах по траекториям, необходимым для летных проверок РМС;
- 9) отображение на дисплее текущей информации.

После проведения летной проверки РМС инструментальной посадки, выполняется полет учебно-боевого самолета с целью оценки качества захода на посадку по сигналам РМС, проверенных СЛ, с установленной на борту самолета АСЛК.

Выводы. Достоинством разработки АСЛК является возможность оценки основных параметров и характеристик РМС, таким образом существенно повышается безопасность полетов ЛА на всех этапах испытаний.

Разработанная система рекомендована для внедрения в эксплуатацию с целью применения в авиации.

Библиографический список

1. *Притчин Д. О.* Методы оценки погрешности измерения коэффициента разнотолщинности в радиомаячной системе посадки // В сб.: «Старт-2018. Тезисы докладов ОНПК». СПб: БГТУ «Военмех», 2018. С. 65 – 66.

2. Радиотехнические системы обеспечения посадки самолетов: учебное пособие / Ю. Е. Гущин, В. В. Кашинов, А. Н. Лапин и др. Иваново: Ивановский энергетический институт; 1975. 150 с.

УДК 621.373

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКОНТУРНОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА БЕЗ ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В НИЗКОЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

А. А. Ким, А. С. Разуваева

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Высокостабильные узкополосные генераторы СВЧ излучения с низким уровнем фазовых шумов представляют большой интерес в области телекоммуникаций, прецизионных измерений, доплеровской радиолокации и некоторых других применениях. Перспективным направлением считается создание оптоэлектронных генераторов (ОЭГ) на основе радиодифракционного колебательного контура с обратной связью [1]. Основой оптоэлектронного генератора является преобразо-

вание энергии непрерывного лазерного излучения в излучение СВЧ диапазона. Сверхнизкие фазовые шумы ОЭГ достигаются за счет чрезвычайно высокой добротности оптического колебательного контура, а частотная стабильность определяется длиной оптической петли и обуславливается низкой чувствительностью оптического волокна к внешним воздействиям [2]. ОЭГ нашли свое применение в системах сверхширокополосной радиолокации, спутниковой связи, системах навигации, прецизионных измерительных СВЧ-приборах и высокоскоростных беспроводных каналах связи. К основным преимуществам ОЭГ можно отнести достаточно высокую эффективность, малый вес и размеры, высокую стабильность частоты, устойчивость к динамическим воздействиям и высокую добротность, обеспечивающую низкий фазовый шум. Кроме того, ОЭГ дает возможность перестройки частоты при неизменном низком значении уровня фазового шума, что является значительным преимуществом перед использованием электронных генераторов. Однако ОЭГ обладают сравнительно невысокой мощностью, т.к. она в существенной степени ограничена параметрами оптической элементной базы.

Исследованию и созданию ОЭГ в области сверхвысоких частот излучения посвящено множество работ [3 – 5]. В настоящее время разработаны различные схемотехнические решения, которые служат для увеличения добротности, уменьшения габаритов, повышения стабильности чистоты сигнала и др. [6]. Стандартная схема ОЭГ состоит из оптического и радиотехнического узлов (рис. 1). Оптический узел включает в себя полупроводниковый лазер, электрооптический модулятор интенсивности (ЭОМ), волоконно-оптический тракт (ВОТ) и фотоприемник. Радиотехнический узел состоит из СВЧ-усилителя, полосно-пропускающего фильтра (ППФ) и делителя мощности.

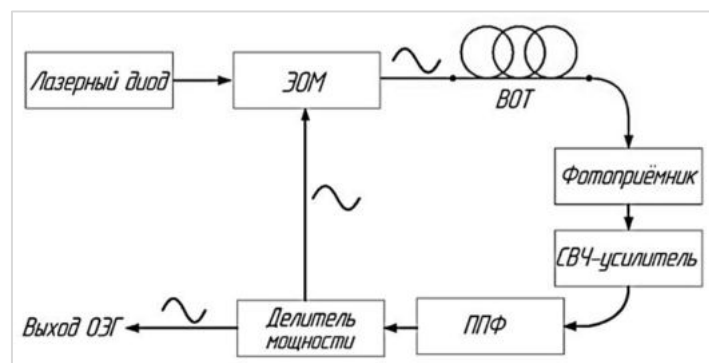


Рис. 1. Стандартная схема ОЭГ

В большинстве случаев исследователей интересует поведение ЭОГ и повышение его характеристик в области СВЧ излучения, при этом из всего спектрального состава его излучения выделяется лишь узкая полоса частот, поэтому ППФ является неотъемлемой частью. Поскольку, согласно [7], добротность системы повышается с ростом частоты осцилляций, определенный интерес представляют режимы генерации и модовый состав осцилляций в области низких частот без спектральной фильтрации. В данной статье приведены результаты исследования одноконтурного ОЭГ без использования полосовой фильтрации, работающего в низкочастотной области. В частности, представлены результаты измерений частоты следования генерируемых гармоник в зависимости от эквивалентной длины контура и зависимость эквивалентной добротности ВОТ от частоты генерации для различных длин линии задержки. Схема исследуемого ОЭГ приведена на рис. 2.

Непрерывное излучение лазерного диода, проходя через контур, преобразуется в СВЧ сигнал и усиливается во встроенном усилителе фотоприемного модуля с постоянным коэффициентом усиления $G=10^4$ В/А, после чего с помощью делителя мощности одна часть сигнала поступает на выход ОЭГ, а другая часть на управляющий вход ЭОМ Маха-Цендера и ста-

новится модулирующим сигналом, замыкая цепь положительной обратной связи [8]. Волоконно-оптический тракт (ВОТ) представляет собой линию задержки для эффективного накопления энергии.

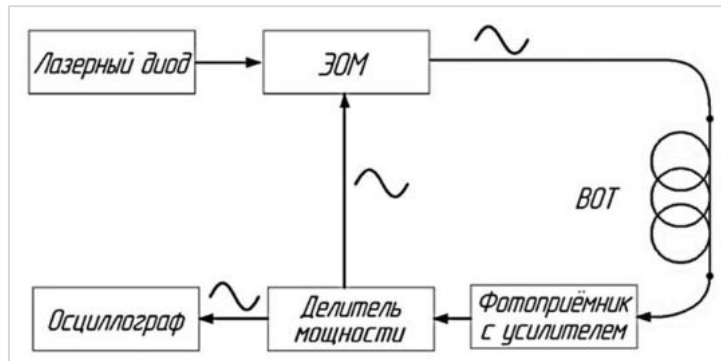


Рис. 2. Схема исследуемого ОЭГ

Стабильная работа ОЭГ обеспечивается за счет баланса фаз, т.е. время задержки сигнала в цепи соответствует набегу фаз, кратному 2π [9]. Частота генерации в таком случае определяется по формуле (1), где k - порядковый номер моды, c – скорость света в вакууме, n и l – показатель преломления и длина ВОТ [2].

$$f = \frac{kc}{nl} \quad (1)$$

Расстояние между частотами (модами) ОЭГ Δf определяется по формуле (2), где $l_{\text{экв}}$ – эквивалентная длина, равная сумме произведений длины на показатель преломления волокна и кабеля, соответственно: $l_{\text{экв}} = (l_{\text{вол}} \cdot n_{\text{вол}}) + (l_{\text{каб}} \cdot n_{\text{каб}})$.

$$\Delta f = \frac{c}{nl} = \frac{c}{l_{\text{экв}}} \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) видно, что расстояние между частотами равно значению частоты первой моды.

В результате эксперимента была получена зависимость Δf от $l_{\text{экв}}$ (рис.3).

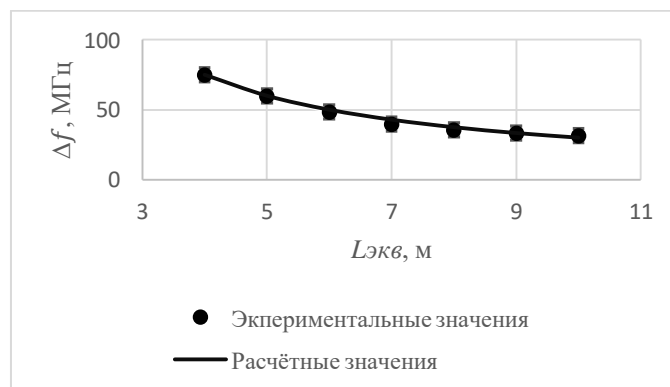


Рис. 3. Зависимость Δf от $l_{\text{экв}}$

В нашем случае длина ВОГ изменялась от 0 до 6 м с шагом 1 м, при этом эквивалентная длина изменялась от 4 до 10 м. Как видно по графику, расстояние между гармониками нелинейно уменьшается с увеличением эквивалентной длины. Полученные значения частот генерации совпадают со значениями, полученными по формуле (1). Это можно наблюдать на экране осциллографа (рис. 4 – 9).

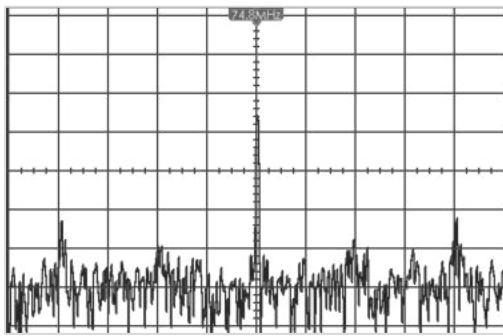


Рис. 4. Моды ОЭГ при $l_{\text{ЭКВ}} = 4$ м

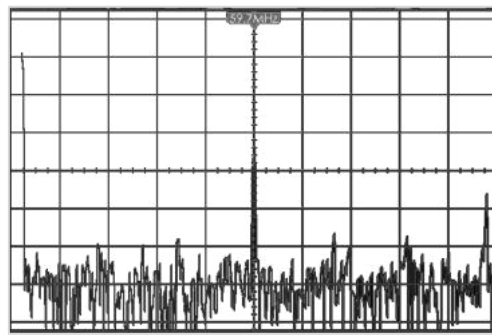


Рис. 5. Моды ОЭГ при $l_{\text{ЭКВ}} = 5$ м

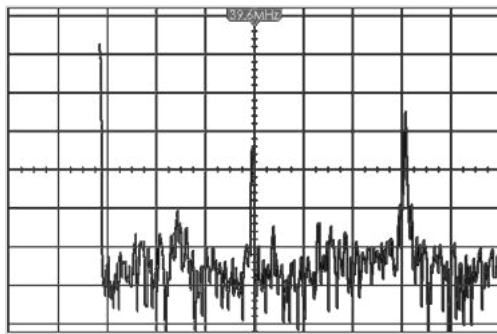


Рис. 6. Моды ОЭГ при $l_{\text{ЭКВ}} = 7$ м

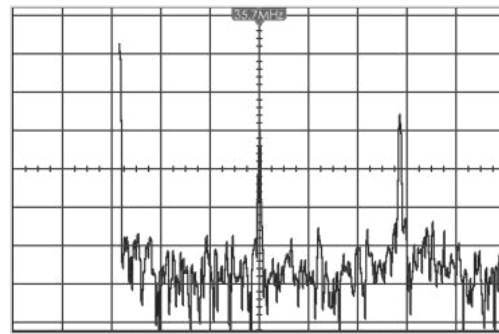


Рис. 7. Моды ОЭГ при $l_{\text{ЭКВ}} = 8$ м

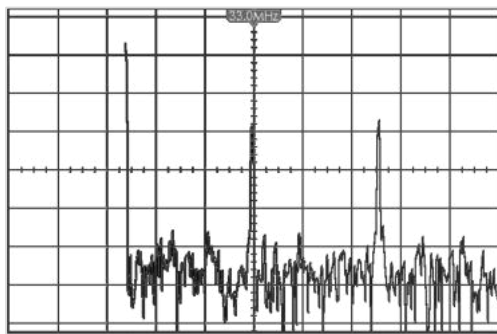


Рис. 8. Моды ОЭГ при $l_{\text{ЭКВ}} = 9$ м

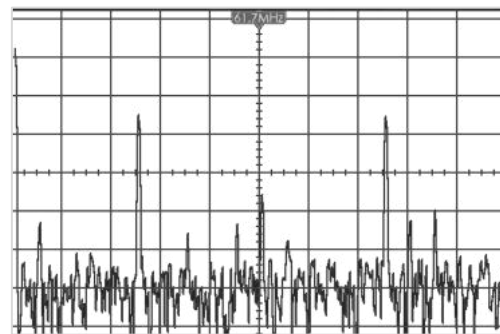


Рис. 9. Моды ОЭГ при $l_{\text{ЭКВ}} = 10$ м

При использовании в качестве линии задержки оптического волокна длиной 100 м был получен стабильный сигнал в форме меандра (рис. 10). Возникновение такого сигнала имеет пороговый характер и наблюдается при токе накачки лазера 39 мА, что соответствует мощности 5,95 мВт, а его частота определяется длиной ВОГ и составляет для первой моды 950 кГц. Возникновение устойчивого меандроподобного сигнала связано с фазовой синхронизацией всех мод в спектре генерации и перераспределением энергии между ними. Спектр полученно-

го меандроподобного сигнала состоит преимущественно из нечетных гармоник (рис. 11), амплитуда которых обратно пропорциональна их частоте. В этом случае частота генерации определяется по формуле (3), а расстояние между частотами по формуле (2). Наличие дополнительных спектральных компонент можно объяснить нелинейными свойствами фотоприемного модуля при больших амплитудах сигнала.

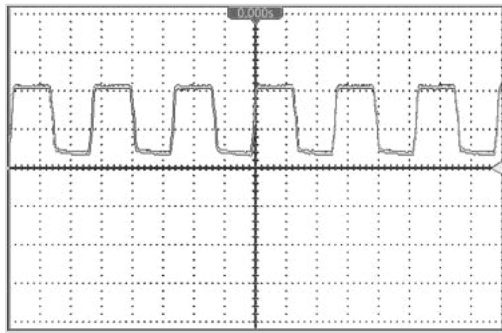


Рис. 11. Сигнал при $l = 100$ м и $I_{\text{нак}} = 39$ мА

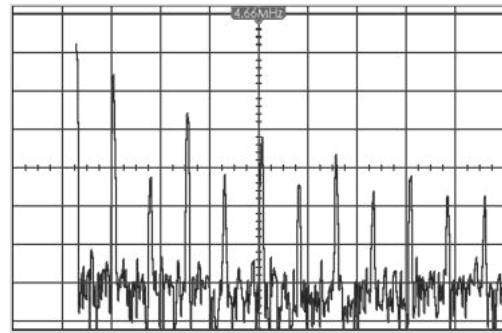


Рис. 11. Спектр сигнала при $l = 100$ м и $I_{\text{нак}} = 39$ мА

$$f = \frac{kc}{2nl} = \frac{c}{2l_{\text{экв}}} \quad (3)$$

Для исследуемой схемы ОЭГ определим внешнюю добротность, определяемую, главным образом, параметрами ВОТ по формуле (4), где значение добротности зависит от отношение реактивной энергии $W_{\text{нак}}$, накопленной в режиме установившихся колебаний, к энергии $W_{\text{рас(Т)}}$, рассеянной за один период колебаний. Здесь f_0 - частота колебаний, $W_{\text{нак}} = P_{\text{вх}} \cdot \tau$, где $P_{\text{вх}}$ - мощность на входе в ВОТ, $P_{\text{рас}}$ - мощность, рассеянная в ВОТ за один период колебаний, $\tau = \frac{nl}{c}$ - время задержки сигнала в ВОТ [10]. Мощность на входе в ВОТ определяется как произведение мощности лазера на потери в контуре.

$$Q = 2\pi \frac{W_{\text{нак}}}{W_{\text{рас(Т)}}} = 2\pi \cdot f_0 \frac{W_{\text{нак}}}{P_{\text{рас}}} \quad (4)$$

В нашем случае примем за частоту колебаний f_0 частоту первой моды полученного меандроподобного сигнала, равную 950 кГц, длина линии задержки l равна 100 м, показатель преломления 1,475, мощность лазера в этом случае равна 5,95 мВт, на входе в ВОТ суммарные потери равны 4,7 dB, на выходе 4,82 dB. Составляющими потерь являются потери на коннекторах, потери ЭОМ и потери в волокне. По результатам расчетов внешняя добротность составила 98,76. Аналогично рассчитана внешняя добротность при f_0 равной частоте лазерного излучения с длиной волны 1550 нм, ее значение составляет $2,01 \cdot 10^{10}$ [10].

Эквивалентная добротность $Q_{\text{экв}}$ в зависимости от частоты несущей f определяется по формуле (5) [5].

$$Q_{\text{экв}} = 2\pi \cdot f_0 \tau \frac{f}{f_0} \quad (5)$$

Используя полученные ранее значения частот генерации и зная длину ВОТ, при которой они были получены, получен график зависимости эквивалентной добротности $Q_{\text{экв}}$ от частоты несущей f для различных длин линии задержки (рис. 12). Диапазон частот ОЭГ определяют полосы пропускания ЭОМ и фотоприемника. В нашем случае ограничение вносит полоса пропускания фотоприемника, равная 150 МГц.

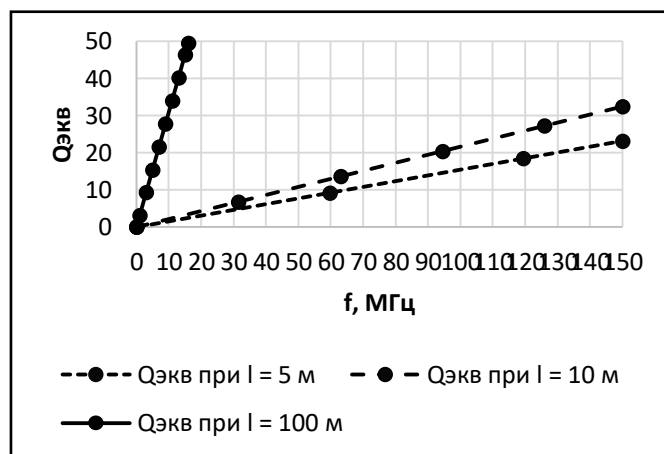


Рис.12. Зависимость $Q_{\text{экв}}$ от частоты f и длины l

Начало осцилляций в ОЭГ без ППФ носит пороговый характер. При превышении некоторой пороговой оптической мощности возникают устойчивые гармонические осцилляции на частотах, обратно пропорциональных эквивалентному времени задержки в ВОТ, однако лежащих в высокочастотной области доступной полосы пропускания системы. При дальнейшем увеличении энергетики оптического излучения наблюдается расширение модового состава осцилляций в сторону низких частот. Это объяснимо тем, что при большей оптической мощности возникают условия поддержания более низкочастотных мод, обладающих меньшей добротностью. При дальнейшем увеличении мощности и превышении некоторого порогового значения возникает фазовая синхронизация генерируемых мод вплоть до 1-й с одновременным перераспределением энергии между ними, в результате чего формируется относительно стабильный режим генерации меандроподобного колебания. Дальнейшее увеличение мощности приводит к постепенному фазовому рассогласованию мод и разрушению меандроподобного колебания. Несмотря на то, что частоты основных спектральных составляющих осцилляций были обратно пропорциональны эквивалентному времени задержки в ВОТ, также наблюдалось явление смещения частот при изменении оптической мощности, равно как и возникновение субгармонических составляющих. Возможно, это связано с нелинейными свойствами данного фотоприемного модуля и его электрических схем. Таким образом, получены экспериментальные результаты исследования одноконтурного ОЭГ без использования полосовой фильтрации, в частности, значения частоты генерации, расстояния между частотами и добротности соответствуют теоретическим данным.

Библиографический список

1. Toan Thang Pham. Advances in opto-electronic oscillator operation for sensing and component characterization. Cachan, 2015. p. 181.
2. Levy E.C. Modeling optoelectronic oscillators / E.C. Levy, M. Horowitz, C.R. Menyuk // JOSA B. 2009. Vol. 26, №1. pp. 148 – 159.
3. Yao X.S. A novel photonic oscillator / X.C. Yao, L. Maleki // TDA Progress Report 42-122. 1995. pp. 32 – 43.
4. Nelson C.W. Microwave optoelectronic oscillator with optical gain / C.W. Nelson, A. Hati, D.A. Howe, W. Zhou // Proc. IEEE. 2007. pp. 1014 – 1019.
5. Romeira B. Optoelectronic oscillators for communication systems / B. Romeira, J. Figueiredo // DoCEIS 2010, IFIP AICT 314. 2010. pp. 273 – 280.

6. Лукина А. А., Толендиев Г. К., Горевой А. В. Исследование оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона // Материалы 25-й Крымской конференции «Микроволновые и телекоммуникационные технологии». Севастополь: 2015. С. 1035 – 1036.

7. Задорин А. С., Лукина А. А. Исследование моделей подавления паразитных мод оптоэлектронного СВЧ-автогенератора на основе инжекционной и многоконтурной схемы // Доклады ТУСУРа. 2006. Том 19. №4. С. 81 – 84.

8. Белкин М. Е., Лопарёв А. В. Оптоэлектронный генератор – первое практическое устройство СВЧ-оптоэлектроники // Электроника: наука, технология, бизнес. 2010. №6. С. 62 – 70.

9. Лопарёв А. В. Моделирование процесса самовозбуждения оптоэлектронного генератора СВЧ колебаний // Научный вестник МИРЭА. 2010. №9. С. 41 – 48.

10. Белкин М. Е. Разработка модели оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона // Материалы VI Международной научно-технической конференции. М.: Изд-во Энергоатомиздат, 2008. С. 289 – 297.

УДК 621.396

ПОДОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

В. А. Сеницын, Я. Л. Ву Хан, Л. Б. Фридман

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
ОАО «ВНИИРА»*

Предложен метод обработки сигналов с линейной частотной модуляцией при использовании подоптимального фильтра сжатия. Разработана математическая модель, с помощью которой выполнен анализ характеристик эффективности предложенного подоптимального фильтра. Проведена сравнительная оценка энергетических характеристик эффективности подоптимального сжатия и сжатия с использованием согласованного фильтра с весовой обработкой, а также метода, основанного на использовании фильтра, рассчитанного методом обратных пульсаций. При этом были рассмотрены сигналы со значением базы от 7 до 200.

1. Введение. В настоящее время в качестве зондирующих сигналов в аэродромных радиолокационных станциях (РЛС) широко используются сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

Преимущество использования ЛЧМ сигналов в РЛС заключается в том, что их длительность и девиация частоты, определяющая ширину спектра, а значит, и разрешение по дальности, могут задаваться независимо друг от друга и обеспечивать заданное разрешение при заданной максимальной дальности действия РЛС.

Обычно обработка ЛЧМ сигналов в приемном тракте РЛС осуществляется с помощью согласованных фильтров сжатия (СФ) с весовой обработкой (ВО). Уровень боковых лепестков (УБЛ), возникающих на выходе таких фильтров, в некоторых случаях оказывается недопустимо высоким. При этом боковые лепестки сильного отраженного сигнала одной цели могут исказить или полностью маскировать основной пик слабого отраженного сигнала другой цели. Также при использовании СФ с ВО наблюдаются потери в отношении сигнал/шум (ОСШ) и ухудшение разрешающей способности по дальности, вследствие расширения основного лепестка выходного сигнала [1].

В [2] был предложен метод подавления боковых лепестков при помощи фильтра сжатия, рассчитанного методом обратных пульсаций (МОП). Использование такого фильтра позволя-

ет снизить УБЛ до значений порядка минус 70 дБ и ниже, однако потери в отношении сигнал/шум (ОСШ) составляют около 1,2 дБ для сигналов с величиной базы порядка 50.

В [3] был предложен метод подавления боковых лепестков при помощи подоптимального фильтра сжатия для ряда фазоманипулированных (ФМ) сигналов отличающегося незначительным снижением отношения ОСШ относительно согласованного фильтра. В частности, для сигнала с фазовой манипуляцией, выполненной в соответствии с тринадцатиеlementным кодом Баркера, снижение ОСШ составило лишь 5 %.

В [4 - 6] были рассмотрены ФМ сигналы с увеличенной базой, выполненные в соответствии с P1, P3-кодами, а также полифазными кодами Фрэнка, кодами Голомба и Задова-Чу. Так, для 71-элементного кода Голомба, потери в ОСШ составили порядка 11 %.

В данной работе предлагается метод обработки ЛЧМ сигналов с использованием подоптимального фильтра, обеспечивающего подавление боковых лепестков.

2. Предлагаемый подоптимальный фильтр сжатия ЛЧМ сигналов

Отсчеты ЛЧМ сигнала при отсутствии доплеровского сдвига частоты определяются выражением [7]:

$$\kappa(n) = \exp(j\pi kn^2), \quad k = \pm \frac{B}{T} - \text{девиация частоты} \quad (1)$$

где n – номер отсчета, B – база ЛЧМ сигнала, T – длительность ЛЧМ сигнала, j – мнимая единица.

$$\kappa(n) \text{ принимает нулевые значения при } n < -\frac{T-1}{2} \text{ и при } n > \frac{T-1}{2}.$$

Передачная характеристика (ПХ) предлагаемого подоптимального фильтра определяется выражением

$$H(f) = \frac{p(f)}{\kappa_3(f)}, \quad (2)$$

где $n = -\infty, \dots, \infty$, $\kappa_3(f) = F \left\{ \kappa_3(n) \right\}$, $\kappa_3(n)$ – отсчеты эталонного входного сигнала,

$p(f) = F \left\{ p(n) \right\}$, где F – оператор прямого дискретного преобразования Фурье; $p(n)$ – импульс, формирующий импульсную характеристику (ИХ) подоптимального фильтра.

В качестве формирующего импульса ИХ подоптимального фильтра используется импульс Гаусса:

$$p(n) = \exp(-a \cdot n^2), \quad (3)$$

где a – параметр оптимизации импульса Гаусса, определяющий его длительность. $p(n)$

принимает нулевые значения при $n < -\frac{T-1}{2}$ и при $n > \frac{T-1}{2}$.

Отклик предлагаемого фильтра определяется выражением

$$w(f) = H(f) \cdot F \left\{ \kappa(n) \right\}, \quad (4)$$

На рис. Рис. 11а приведены модули ПХ СФ и фильтра, рассчитанного предложенным методом, на рис. 1б – модуль импульсной характеристики предлагаемого фильтра.

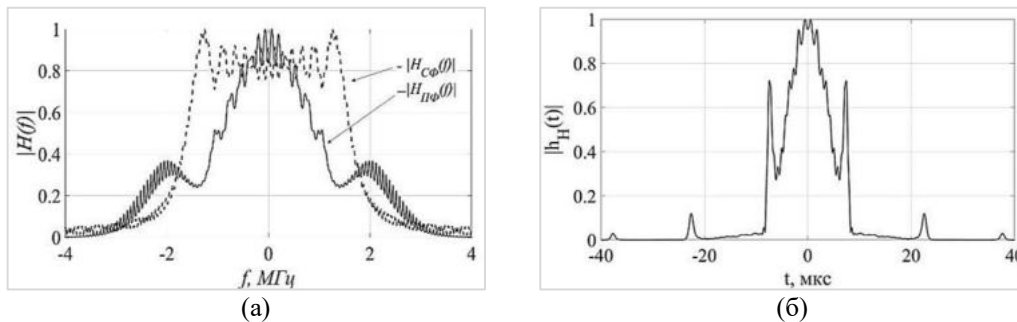


Рис. 1. а) модули ПХ согласованного $\left|H_{C\Phi}(f)\right|$ и подоптимального $\left|H_{П\Phi}(f)\right|$

фильтров сжатия для сигнала $B = 50$; б) модуль ИХ подоптимального фильтра сжатия ($B = 50$)

Из рис. 1 б) видно, что ИХ предлагаемого фильтра имеет бесконечный импульсный отклик. На практике такой импульсный отклик не реализуется, поэтому его усекают. Однако как было показано в [2], усечение ИХ приводит к появлению остаточных боковых лепестков в сжатом сигнале. Решением данной проблемы является синтез фильтра сжатия в частотной области.

Предлагаемый подоптимальный фильтр предполагается использовать при модернизации аппаратуры обработки сигналов первичного радиолокатора.

3. Моделирование предложенного метода подоптимальной обработки. Для оценки эффективности использования подоптимального фильтра и анализа энергетических характеристик подоптимальной обработки ЛЧМ сигналов было проведено моделирование в программной среде MATLAB.

В качестве излучаемого сигнала рассматривались ЛЧМ сигналы с базой от 7 до 200 с периодом дискретизации $T_0 = 100$ нс.

Полоса пропускания приемного тракта, согласованная с полосой сигнала

$$\Delta F = \frac{1}{t_{вых}}, \quad (5)$$

где ΔF – полоса пропускания приемного тракта, МГц

В ходе исследования в данной работе рассматривались сигналы, полоса которых соответствует полосе пропускания приемных трактов РЛС управления воздушным движением: $\Delta F = 2$ МГц и $\Delta F = 3$ МГц.

Предложена математическая модель, позволяющая выполнить сравнительный анализ эффективности предложенного подоптимального фильтра и известных методов подавления боковых лепестков. Структурная схема данной модели приведена на рис. 2.

Эффективность подоптимального сжатия ЛЧМ сигналов оценивалась по критерию минимизации энергетических потерь по сравнению с согласованным сжатием.

Поиск пары ЛЧМ сигнал – подоптимальный фильтр выполнялся путем подбора такого параметра оптимизации a для каждого значения базы ЛЧМ сигнала, при котором выполняется условие

$$\min_a \frac{ОСШ_{C\Phi}[\text{дБ}]}{ОСШ(a)_{П\Phi}[\text{дБ}]} \quad (6)$$

Однако найденные значения a обеспечивают выполнение условия (5) только при конкретных значениях длительности ЛЧМ сигнала T .

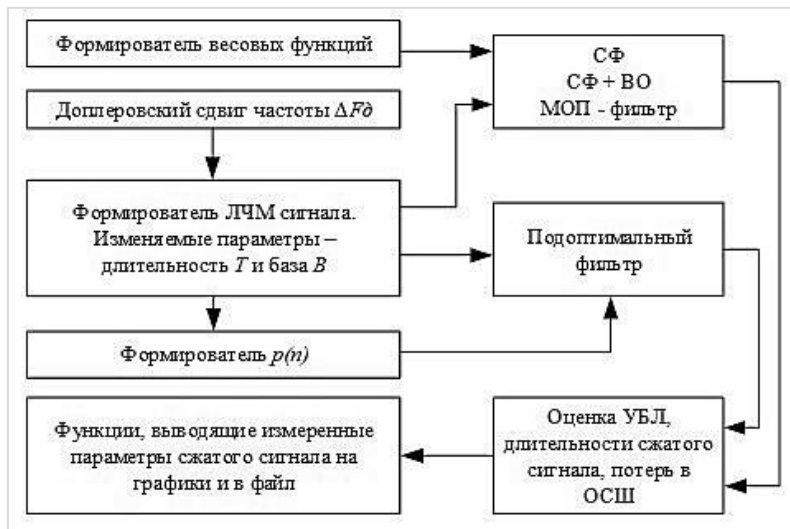


Рис. 2. Структурная схема математической модели

Для нахождения оптимизированного параметра a_{opt} , не зависящего от выбранных значений T , введем параметр Q таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$a_{opt} = \frac{k}{Q}, \quad (7)$$

где a_{opt} – параметр оптимизации импульса Гаусса, не зависящий от величины T .

Далее для каждого значения базы B получим параметры Q , обеспечивающие выполнение условия (6).

Аппроксимация данной зависимости была получена методом дробно-рациональных функций [8] и определяется выражением

$$Q(B) = \frac{0,00159B + 07045}{B + 3,478}. \quad (8)$$

Найденные зависимости представлены на рис. 3.

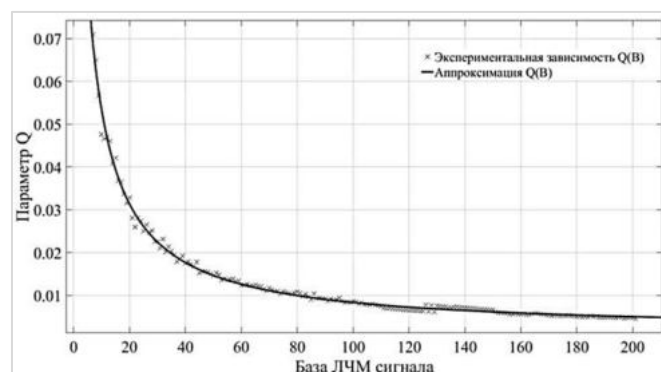


Рис.3. Зависимости $Q(B)$: экспериментально полученная (точками), аппроксимация (сплошная линия)

Таким образом, с учетом (7), параметр оптимизации импульса Гаусса определяется выражением

$$a_{opt} = \frac{B}{T \cdot \left(\frac{0,00159B + 07045}{B + 3,478} \right)} \quad (9)$$

4. Энергетические характеристики эффективности предложенного метода подоптимальной обработки. Как было отмечено выше, количественной энергетической характеристикой эффективности подоптимального сжатия при отсутствии доплеровского сдвига частоты является величина снижения ОСШ по сравнению с согласованным сжатием.

Полученная зависимость снижения ОСШ при использовании подоптимального фильтра сжатия ЛЧМ сигналов при различных значениях базы сигналов приведена на рис. 4.

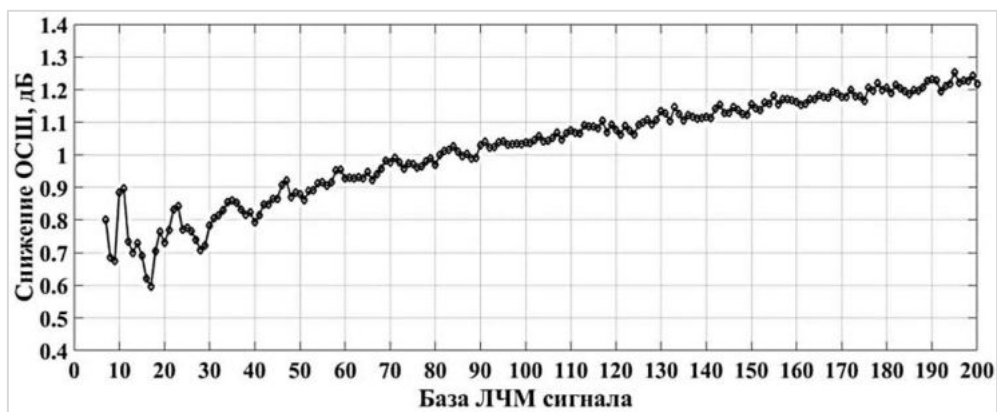


Рис. 4. Зависимость энергетических потерь от величины базы ЛЧМ сигнала (при $\Delta F_D = 0$)

Как следует из рисунка, при увеличении базы исследуемого ЛЧМ сигнала снижается эффективность сжатия. Величина снижения ОСШ составляет от 0,6 до 1,2 дБ в зависимости от базы ЛЧМ сигнала.

Как видно из рисунка, предлагаемый подоптимальный фильтр обеспечивает сжатие ЛЧМ сигнала без боковых лепестков.

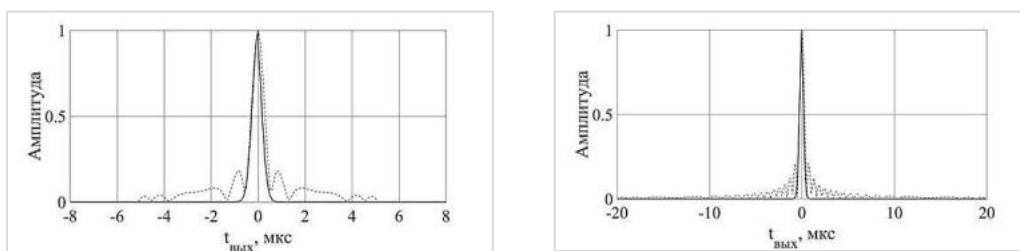


Рис. 5. Выходные сигналы согласованного без ВО (пунктирная линия) и подоптимального (сплошная линия) фильтров сжатия ЛЧМ сигналов с длительностью отклика $t_{вых} = 0,5$ мкс при $B = 10$ (слева) и $B = 50$ (справа)

Как было отмечено в [2], наилучшие характеристики сжатых сигналов при использовании ВО достигаются с использованием окон Дольфа – Чебышева, Хэмминга и Гаусса.

Сравнение эффективности сжатия предложенного подоптимального фильтра и известных методов подавления боковых лепестков при сжатии ЛЧМ сигнала с $B = 50$ при отсутствии доплеровского сдвига частоты приведено в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение эффективности сжатия при отсутствии доплеровского сдвига частоты

Тип обработки	Максимальный УБЛ, дБ	Ширина главного лепестка по уровню минус 3дБ по сравнению с прямоугольным окном	Потери по сравнению с согласованным сжатием, дБ
Подоптимальный фильтр	отсутствуют	1,00	0,86
Фильтр МОП	минус 70	1,00	1,2
СФ + ВО:			
Прямоугольное	минус 13,5	1,00	0
Хэмминга	минус 36,5	1,3	1,34
Дольфа-Чебышева ($\alpha_{д-ч} = 60$ дБ)	минус 36,7	1,45	1,82
Гаусса ($\alpha_{-6дБ} = 2,5$ дБ)	минус 34,5	1,86	3

Из таблицы 2 следует, что при значении базы сигнала $B = 50$, потери в ОСШ при использовании СФ с ВО превышают потери при использовании предложенного метода на величину не менее 0,48 дБ.

При использовании фильтра, рассчитанного МОП, потери в ОСШ превышают потери при использовании предложенного метода на величину не менее 0,34 дБ.

Кроме того, при использовании предложенного подоптимального фильтра не происходит расширения основного лепестка сигнала.

Заключение

1. Предлагаемый метод подоптимальной обработки позволяет выполнять сжатие ЛЧМ сигналов с различными значениями базы без образования боковых лепестков (уровень боковых лепестков определяется лишь величиной вычислительной погрешности) с использованием подоптимального фильтра. Синтез данного фильтра выполнен в частотной области. В качестве функции, формирующей импульсную характеристику фильтра используется импульс Гаусса с оптимизированным коэффициентом a_{opt} .

2. Потери в отношении сигнал/шум при использовании предлагаемого метода меньше, чем при использовании известных методов обработки (при базе сигнала равной 50 потери составили лишь 0,86 дБ).

3. Предложенный метод предполагается использовать при модернизации аппаратуры обработки радиолокационных сигналов в первичной радиолокационной станции управления воздушным движением, разработанной и серийно выпускаемой АО «ВНИИРА».

Библиографический список

1. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации. М.: Советское радио, 1970. 560 с.
2. Андриенко В. Б., Беседа А. Л., Зубков В. А., Николаев С. Ф., Симицын В. А., Симицын Е. А. Алгоритмы обработки сложных частотно-модулированных радиолокационных сигналов. 2009. 208 с.
3. Lehtinen M., Damtie B., Nygren T. Optimal binary phase codes and sidelobe-free decoding filters with application to incoherent scatter radar // Annales Geophysicae, 2004, Vol. 22, pp. 1623–1632.

4. Korshunov A. Yu., Mazayan N. R., Nikolaev S. P., Sinitsin E. A., Fridman L. B., Shildkret A. B. Phase-shift keyed signal compression using a mismatched sidelobe-free filter in the presence of doppler frequency shift В сборнике: CriMiCo 2012 - 2012 22nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings 2012. С. 1084–1085.

5. Fridman L. B., Ershov G. A., Myasnikov S. A., Perelomov V. N., Sinitsin E. A. Compression of phase-shift keyed signals by means of the mismatched sidelobe-free filter with application to coherent pulse radar В сб. European Microwave Week 2017: "A Prime Year for a Prime Event", EuMW 2017 - Conference Proceedings; 14th European Microwave Conference, EURAD 2017 14. 2018. С. 235 – 238.

6. Ву Хан Я. Л., Фридман Л. Б., Сухотерин В. Д., Завьялов В. А. Подоптимальный фильтр сжатия шумоподобных сигналов с фазовой манипуляцией // Сб. тезисов 4-ой ВНТК «Системы связи и радионавигации». Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2017. С. 240 – 243.

7. N. Levanon, E. Mozeson, Radar Signals, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004, pp. 100 – 167.

8. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В. Вычислительные методы для инженеров: учебное пособие. М.: Высшая школа, 1994. 544 с.

9. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы: пер. с англ./ Под ред. В. С. Кельсона. М: Советское радио, 1971. 568 с.

УДК 621.396

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ПОДОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ

В. А. Сеницын, Я. Л. Ву Хан, Л. Б. Фридман

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
ОАО «ВНИИРА»*

Проведен анализ влияния доплеровского сдвига частоты на эффективность подоптимального сжатия шумоподобных радиолокационных сигналов с линейной частотной модуляцией. В программной среде Matlab выполнено математическое моделирование обработки (сжатия) исследуемых сигналов с помощью подоптимальных и согласованных фильтров. Выполнен сравнительный анализ эффективности сжатия указанных сигналов, а также сравнительный анализ эффективности подоптимального и согласованного сжатия (при наличии доплеровского сдвига частоты). При этом были рассмотрены сигналы со значением базы от 7 до 200. Получены зависимости значения уровня боковых лепестков и снижения отношения сигнал/шум от доплеровского сдвига частоты при использовании подоптимального и согласованного фильтров сжатия.

1. Введение. В настоящее время в качестве зондирующих сигналов в аэродромных радиолокационных станциях (РЛС) широко используются сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

Преимущество использования ЛЧМ сигналов в РЛС заключается в том, что их длительность и девиация частоты, определяющая ширину спектра, а значит, и разрешение по дальности, могут задаваться независимо друг от друга и обеспечивать заданное разрешение при заданной максимальной дальности действия РЛС.

Обычно обработка ЛЧМ сигналов в приемном тракте РЛС осуществляется с помощью согласованных фильтров сжатия (СФ) с весовой обработкой (ВО). Уровень боковых лепестков (УБЛ), возникающих на выходе таких фильтров, в некоторых случаях оказывается недопустимо высоким. При этом боковые лепестки сильного отраженного сигнала одной цели могут искажать или полностью маскировать основной пик слабого отраженного сигнала другой цели. Также при использовании СФ с ВО наблюдаются потери в отношении сигнал/шум (ОСШ) и ухудшение разрешающей способности по дальности, вследствие расширения основного лепестка выходного сигнала [1].

В [2] был предложен метод подавления боковых лепестков при помощи фильтра сжатия, рассчитанного методом обратных пульсаций (МОП). Использование такого фильтра позволяет снизить УБЛ до значений порядка минус 70 дБ и ниже, однако потери в отношении сигнал/шум (ОСШ) составляют около 1,2 дБ для сигналов с величиной базы порядка 50.

В [3] был предложен метод подавления боковых лепестков при помощи подоптимального фильтра сжатия для ряда фазоманипулированных (ФМ) сигналов отличающегося незначительным снижением отношения ОСШ относительно согласованного фильтра. В частности, для сигнала с фазовой манипуляцией, выполненной в соответствии с тринадцатилепестковым кодом Баркера, снижение ОСШ составило лишь 5 %.

В [4 - 6] были рассмотрены ФМ сигналы с увеличенной базой, выполненные в соответствии с P1, P3-кодами, а также полифазными кодами Фрэнка, кодами Голомба и Задова-Чу. Так, для 71-элементного кода Голомба, потери в ОСШ составили порядка 11 %.

В данной работе произведена оценка влияния доплеровского сдвига частоты на метод обработки ЛЧМ сигналов с использованием подоптимального фильтра, обеспечивающего подавление боковых лепестков, а также анализ тела неопределенности при использовании предложенного метода.

2. Предлагаемый подоптимальный фильтр сжатия ЛЧМ сигналов

Отсчеты ЛЧМ сигнала при отсутствии доплеровского сдвига частоты определяются выражением [7]:

$$\kappa(n) = \exp(j\pi kn^2), \quad k = \pm \frac{B}{T} - \text{девиация частоты} \quad (10)$$

где n – номер отсчета, B – база ЛЧМ сигнала, T – длительность ЛЧМ сигнала, j – мнимая единица.

$$\kappa(n) \text{ принимает нулевые значения при } n < -\frac{T-1}{2} \text{ и при } n > \frac{T-1}{2}.$$

В качестве формирующего импульса ИХ подоптимального фильтра используется импульс Гаусса:

$$p(n) = \exp(-a \cdot n^2), \quad (11)$$

где a – параметр оптимизации импульса Гаусса, определяющий его длительность. $p(n)$

принимает нулевые значения при $n < -\frac{T-1}{2}$ и при $n > \frac{T-1}{2}$.

3. Анализ эффективности предложенного метода подоптимальной обработки при наличии доплеровского сдвига частоты. Одной из основных количественных характеристик эффективности подоптимального сжатия при наличии доплеровского сдвига частоты является величина УБЛ.

Доплеровский сдвиг частоты определяется выражением

$$\Delta F_{\partial} = \frac{2v_R}{\lambda_C}, \quad (12)$$

где λ_C – длина волны излучаемого сигнала; v_R – радиальная скорость движения летательного аппарата (ЛА).

Доплеровский сдвиг частоты, возникающий в сигнале, отраженном от движущегося ЛА приводит к искажению принимаемого сигнала. Такие искажения наиболее выражены при больших длительностях излучаемых сигналов и высоких радиальных скоростях движения ЛА. Если фильтр сжатия рассчитан на сигнал без искажений, то его параметры не будут соответствовать принимаемому сигналу. В результате, будет иметь место снижение эффективности сжатия широкополосного сигнала, в частности, повышение УБЛ и снижение ОСШ [4].

Отсчеты ЛЧМ сигнала при наличии доплеровского сдвига частоты можно представить как

$$\kappa_D(n) = \kappa(n) \exp(j2\pi\Delta F_{\partial} n T_0), \quad (13)$$

где $\kappa(n)$ – отсчеты ЛЧМ сигнала при отсутствии доплеровского сдвига T_0 – период дискретизации.

На рис. 1 приведены зависимости пикового УБЛ от величины доплеровского сдвига частоты ΔF_{∂} . При этом рассматривались ЛЧМ сигналы, обеспечивающие длительность отклика подоптимального фильтра $t_{\text{вых}} = 0,3$ мкс, $t_{\text{вых}} = 0,5$ мкс и базой $B = 10$.

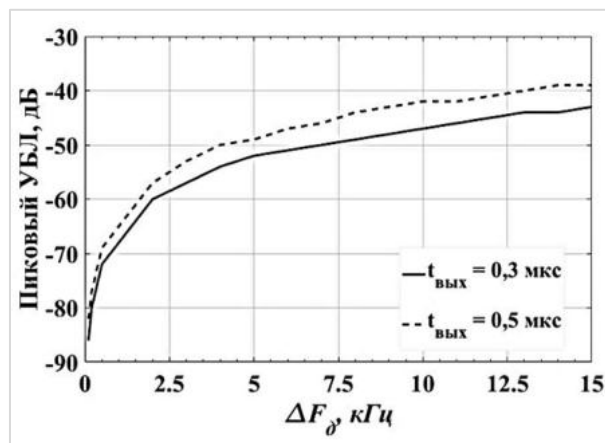


Рис. 1. УБЛ на выходе подоптимального фильтра сжатия ($B = 10$)

На рис. 1 приведены зависимости пикового (а) и среднего (б) УБЛ от величины базы ЛЧМ сигнала при заданном доплеровском сдвиге частоты равном 14 кГц.

При значениях базы B от 7 до 15 наблюдается скачок пикового УБЛ. Далее, при значениях базы более 15 пиковый УБЛ изменяется в пределах 3 дБ.

Следует отметить, что при увеличении длительности сигнала T не наблюдается снижения эффективности сжатия ЛЧМ сигнала. Таким образом, при использовании предложенного метода ЛЧМ сигналы с большей величиной базы обладают меньшей чувствительностью к доплеровскому сдвигу частоты, чем ЛЧМ сигналы с меньшей величиной базы (при равной длительности входных сигналов).

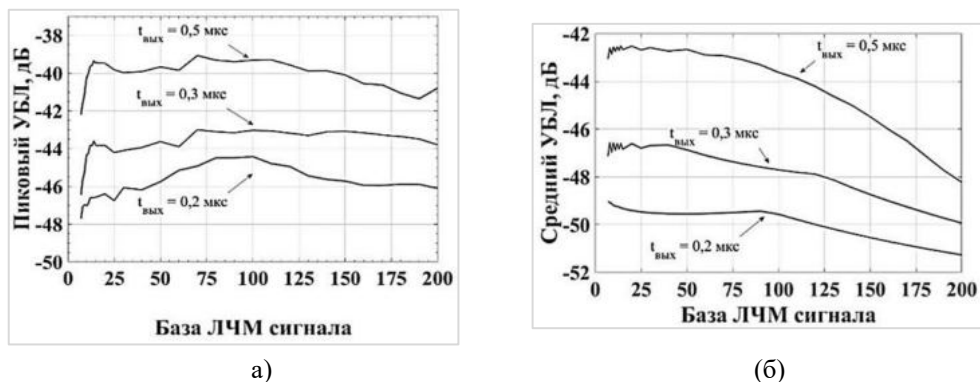


Рис. 2. УБЛ на выходе подоптимального фильтра сжатия при $\Delta F_{\delta} = 14$ кГц: а) пиковый, б) средний

4. Тело неопределенности при использовании метода подоптимальной обработки. Построение тела неопределенности (ТН) при использовании согласованного и предлагаемого подоптимального фильтра произведено для ЛЧМ сигнала полосой $k = 2$ МГц и базой $B = 15$.

ТН для ЛЧМ сигнала с СФ и предлагаемым подоптимальным фильтром приведены соответственно на рисунках 2а и 2б. Здесь амплитуда отражена градациями серого цвета, при этом черному цвету соответствуют максимальные значения амплитуды, а белому – минимальные.

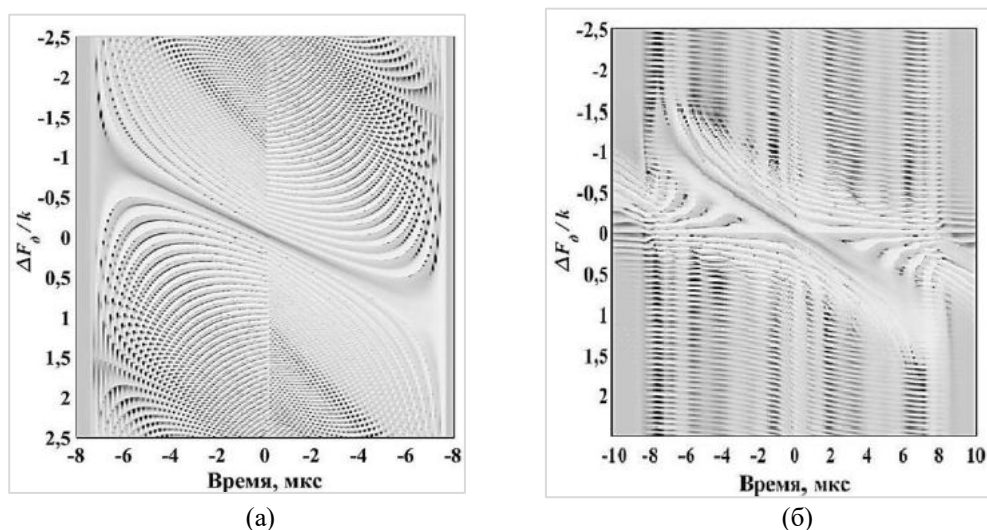


Рис. 2. Тело неопределенности отклика, вид сверху (при $B = 15$): а) СФ; б) подоптимального фильтра

Из сравнения рисунков Рис. 2рис. 2а и рис. 2б следует, что при использовании предложенного метода при нулевом доплеровском сдвиге отклик предложенного подоптимального фильтра не содержит боковых лепестков по дальности (горизонтальная линия при $\Delta F_{\delta} / k = 0$ на рисунке рис 2б окрашена в белый цвет, в то время, как та же линия на рисунке рис. 2а имеет ряд серых пятен).

Сечение ТН по оси доплеровских частот (при нулевой дальности) приведено на рисунке. Для сравнения пунктирной линией обозначено сечение ТН при использовании СФ.

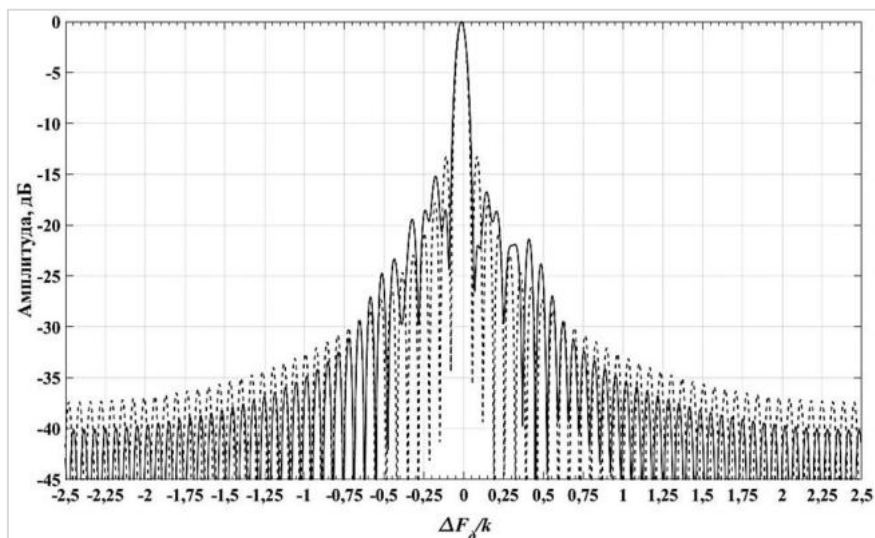


Рис.3. Сечение тела неопределенности при $B = 15$ для согласованного (пунктирная линия) и подоптимального (сплошная линия) фильтров на нулевой дальности

Из рис. 3 следует, что при значениях $\Delta F_{\delta} / k < 0,5$ амплитуда отклика подоптимального фильтра равна, а в некоторых случаях превышает амплитуду отклика СФ. Данный факт означает, что использование предложенного метода обработки ЛЧМ сигналов позволяет снизить чувствительность фильтра сжатия к доплеровскому сдвигу частоты.

С увеличением $\Delta F_{\delta} / k > 0,5$ амплитуда отклика подоптимального фильтра по оси доплеровских частот ниже, чем при использовании СФ. Однако следует отметить, что в РЛС управления воздушным движением значения $\Delta F_{\delta} / k$ не превышают 0,02 (длины волн 3÷30 см).

Как следует из рис. 2б, при наличии ΔF_{δ} основной пик ТН смещается по оси времени. Из-за указанного смещения будет возникать погрешность измерения дальности.

Величину погрешности Δt можно оценить, воспользовавшись свойством функции неопределенности ЛЧМ импульса [9]

$$\Delta t = \frac{\Delta F_{\delta} \cdot B}{k^2}$$

Результаты сравнительной оценки погрешности измерения дальности при различных значениях нормированного доплеровского сдвига частоты $\Delta F_{\delta} / k$ приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что при значении $\Delta F_{\delta} / k < 0,01$ погрешность измерения дальности с использованием подоптимального фильтра сжатия не превышает погрешность, полученную с использованием согласованного фильтра. С увеличением $\Delta F_{\delta} / k$ данная погрешность незначительно возрастает (при $\Delta F_{\delta} / k = 0,02$, $\Delta = 20$ нс (3 м). Стоит отметить, что данный эффект может быть устранен путем использования нескольких доплеровских каналов при обработке сигналов.

Таблица 1
Погрешность измерения дальности,
возникающая вследствие диагональной формы ТН при $V = 15$

Нормированный доплеровский сдвиг частоты $\Delta F_D / k$	Скорость, м/с (при $\lambda=0,03$ м)		Погрешность Δt , нс		Δ , нс
	$k = 2$ МГц	$k = 3$ МГц	Подоптимальный фильтр	Согласованный фильтр	
0,005	150	225	38	38	0
0,006	180	270	45	45	0
0,008	240	360	67	60	7
0,010	300	450	84	75	9
0,012	360	540	105	90	15
0,02	600	900	170	150	20

Заключение

1. При наличии доплеровского сдвига частоты в диапазоне от 0,1 до 15 кГц пиковый уровень боковых лепестков для сигналов с базой равной 10 и полосой сигнала равной 2 и 3 МГц не превышает значения минус 39 дБ.

2. Уровень боковых лепестков по дальности при наличии доплеровского сдвига частоты практически не зависит от длительности ЛЧМ сигнала, что позволяет использовать сигналы с большой базой ($B > 100$) и длительностью T без снижения эффективности сжатия.

3. Предлагаемый подоптимальный фильтр имеет более низкую (на 2-3 дБ) чувствительность к доплеровскому сдвигу частоты по сравнению с согласованной фильтрацией в диапазоне доплеровских частот $\Delta F_D / k = \pm 0,5$.

4. В диапазоне доплеровских частот $\Delta F_D / k = 0 \div 0,02$ величина погрешности измерения дальности, обусловленная формой тела неопределенности ЛЧМ сигнала незначительна, и не превышает 3 м. Кроме того, данный эффект полностью устраняется путем использования нескольких доплеровских каналов при обработке радиолокационных сигналов.

5. Предложенный метод предполагается использовать при модернизации аппаратуры обработки радиолокационных сигналов в первичной радиолокационной станции управления воздушным движением, разработанной и серийно выпускаемой АО «ВНИИРА».

Библиографический список

1. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации. М.: Советское радио, 1970. 560 с.
2. Андриенко В. Б., Беседа А. Л., Зубков В. А., Николаев С. Ф., Синецын В. А., Синецын Е. А. Алгоритмы обработки сложных частотно-модулированных радиолокационных сигналов. 2009. 208 с.
3. Lehtinen M., Damtie B., Nygren T. Optimal binary phase codes and sidelobe-free decoding filters with application to incoherent scatter radar. *Annales Geophysicae*, 2004, Vol. 22, pp. 1623–1632.
4. Korshunov A. Yu., Mazayan N. R., Nikolaev S. P., Sinitsin E. A., Fridman L. B., Shildkret A. B. Phase-shift keyed signal compression using a mismatched sidelobe-free filter in the presence of doppler frequency shift В сборнике: CriMiCo 2012 - 2012 22nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings 2012. С. 1084–1085.
5. Fridman L. B., Ershov G. A., Myasnikov S. A., Perelomov V. N., Sinitsin E. A. Compression of phase-shift keyed signals by means of the mismatched sidelobe-free filter with application to coherent pulse radar В сборнике: European Microwave Week 2017: "A Prime Year for a Prime Event",

EuMW 2017 - Conference Proceedings; 14th European Microwave Conference, EURAD 2017 14. 2018. С. 235 – 238.

6. Ву Хан Я. Л., Фридман Л. Б., Сухотерин В. Д., Завьялов В. А. Подоптимальный фильтр сжатия шумоподобных сигналов с фазовой манипуляцией // Сб. тезисов 4-ой ВНТК «Системы связи и радионавигации». Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2017. С. 240 – 243.

7. N. Levanon, E. Mozeson, Radar Signals, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004, pp. 100 – 167.

УДК 621.396

КОМПЕНСАЦИЯ АКТИВНЫХ ПОМЕХ В ПРИЕМНЫХ ТРАКТАХ ПЕРВИЧНЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ

В. А. Сеницын, Е. А. Сеницын, Л. Б. Фридман

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
ОАО «ВНИИРА»*

Выполнен анализ эффективности метода адаптивной компенсации активных помех при его использовании в приемных трактах первичных радиолокаторов. При этом рассмотрен адаптивный метод, отличающийся выполнением компенсации активных помех в спектральной области и сохраняющий эффективность при многопутевом распространении активных помех (в частности, сигналов цифрового телевидения и сотовой связи). Выполнена оценка влияния формата излучаемых сигналов на эффективность адаптивного метода. Проведен анализ влияния компенсации активных помех на эффективность обработки широкополосных радиолокационных сигналов.

1. Введение. Широкое распространение новых радиоэлектронных средств (РЭС), работающих в частотном диапазоне первичных радиолокаторов, может уменьшить эффективность функционирования последних. В РФ и зарубежных странах частотный спектр 2500 – 2690 МГц занят широкополосной системой беспроводной связи LTE. В связи с этим система LTE влияет на работу обзорных радиолокаторов S-диапазона, подверженных влиянию активных помех в полосе частот 2500 – 2690 МГц [1]. Кроме того, дальнейшее интенсивное развитие новых РЭС приведет к необходимости решения новых проблем, связанных с обеспечением возможности их одновременного функционирования с первичными радиолокаторами.

В [2] был предложен метод адаптивной компенсации активных помех в спектральной области. При этом в [2] рассматривалось использование указанного метода для компенсации помех во вторичных радиолокаторах (ВРЛ) управления воздушным движением. Первичные радиолокаторы отличаются от ВРЛ использованием длинных (до нескольких десятков микросекунд) зондирующих импульсов с внутримпульсной модуляцией и последующей согласованной [3] или подоптимальной [4, 5] обработкой отраженных сигналов. С учетом указанных факторов, требуется выполнить анализ эффективности метода адаптивной компенсации активных помех при его использовании в приемном тракте первичных радиолокаторов.

2. Особенности адаптивной компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов. В [2] влиянием полезного сигнала на процесс компенсации непрерывной помехи пренебрегали ввиду малой длительности (и, как следствие, относительно малой средней мощности) полезного сигнала. В то же время, при компенсации помех в первичных радиолокаторах полезный сигнал может оказать значительное влияние на эффективность адаптивного метода по следующим причинам:

- первичные радиолокаторы отличаются тем, что в них используются длинные сложные сигналы с внутримпульсной модуляцией [3] (фазоманипулированные сигналы и сигналы с частотной модуляцией). Поэтому длительность их импульсов может быть больше, чем у ВРЛ и дальномерного канала посадочной радиомаячной группы [6] в несколько десятков раз;
- период повторения импульсов у первичных радиолокаторов может быть в несколько раз меньше, чем у ВРЛ в случае использования в первичных радиолокаторах формата сигналов с повышенной частотой повторения зондирующих импульсов и неоднозначностью по дальности [7, 8].

Кроме того, процесс компенсации активной помехи оказывает влияние также и на полезный сигнал. В связи с этим необходимо оценить степень влияния метода адаптивной компенсации на характеристики эффективности обработки сложных радиолокационных сигналов (в частности, на уровень боковых лепестков на выходе согласованного или подоптимального фильтра сжатия).

3. Эффективность метода адаптивной компенсации активных помех в зависимости от формата полезного сигнала. Анализ эффективности адаптивной компенсации был проведен с помощью математического моделирования в программной среде “Matlab”. Активная помеха рассматривалась как стационарный шумоподобный комплексный гауссовский случайный процесс. В качестве критерия эффективности использован коэффициент улучшения отношения выходного B_U и входного B_S отношений сигнал/помеха

$$K_Y = B_U - B_S$$

На рис. 1 показаны результаты выполненного анализа эффективности метода адаптивной компенсации при различных значениях скважности полезного сигнала и B_S . Как следует из рис. 1, при снижении скважности полезного сигнала эффективность метода адаптивной компенсации значительно ухудшается. В частности, при снижении скважности с 500 до 5 величина K_Y уменьшилась более чем на 20 дБ. Тем не менее, даже при низком уровне активной помехи ($B_S = 0$) и малой скважности полезного сигнала ($>=5$) величина K_Y составляет не менее 26 дБ, что свидетельствует о достаточно высокой потенциальной эффективности использования метода адаптивной компенсации в приемных трактах первичных радиолокаторов.

Следует отметить, что малые значения скважности ($<=20$) соответствуют случаю использования в первичном радиолокаторе формата сигналов с повышенной частотой повторения зондирующих импульсов и неоднозначностью по дальности [8, 9].

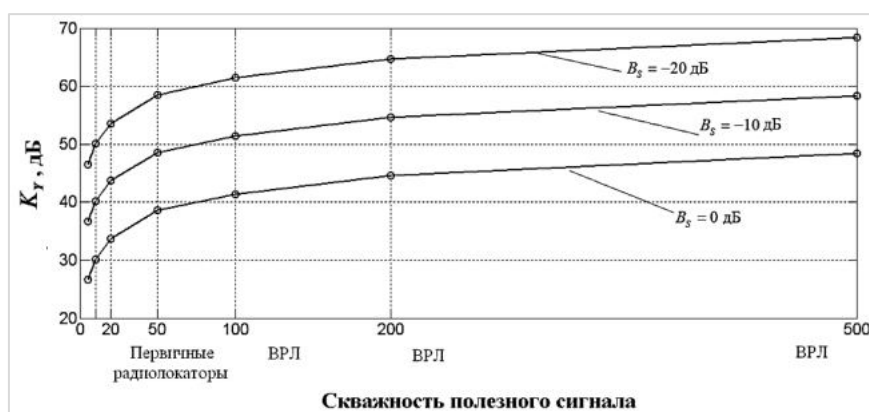


Рис. 1. Зависимость эффективности компенсации активной помехи от скважности полезного сигнала

4. Эффективность обработки широкополосных радиолокационных сигналов при выполнении компенсации активных помех. Процесс компенсации активной помехи оказывает влияние на полезный сигнал [2]. В связи с этим была проведена оценка степени влияния метода адаптивной компенсации на эффективность обработки сложных радиолокационных сигналов. В качестве полезного сигнала рассматривался сигнал с фазовой манипуляцией (ФМ сигнал), выполненной в соответствии с 13-элементным кодом Баркера [10]. Скважность ФМ сигнала составляла 15. В качестве фильтров сжатия рассматривались согласованный фильтр, а также подоптимальный фильтр, отличающийся тем, что на его выходе отсутствуют боковые лепестки (с точностью до величины вычислительной погрешности) [4, 11]. Отношение сигнал/помеха на входе адаптивного компенсатора составляло минус 10 дБ (т.е. полезный сигнал был под шумами).

На рис. 2 показан выходной сигнал согласованного фильтра сжатия ФМ сигнала при воздействии активной помехи и выполнении ее компенсации. Как следует из рис.2, некомпенсированные остатки активной помехи по уровню оказались значительно меньше, чем боковые лепестки полезного сигнала (благодаря компенсации). Следовательно, некомпенсированные остатки активной помехи практически не повлияли на разрешающую способность по дальности.

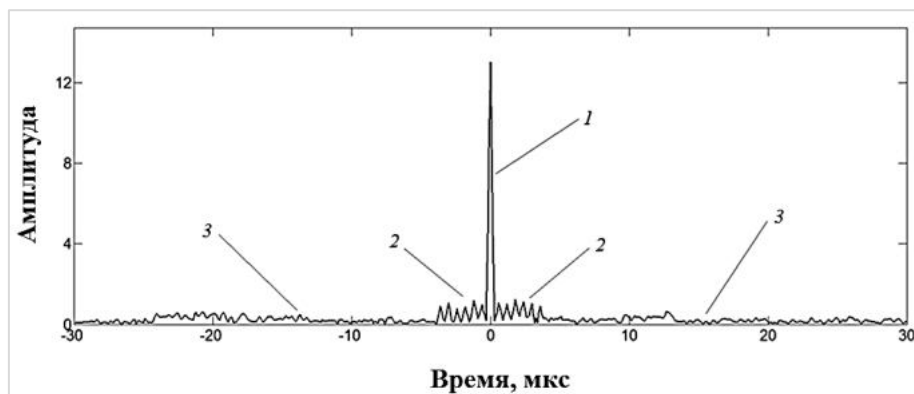


Рис. 2. Выходной сигнал согласованного фильтра сжатия ФМ сигнала при воздействии активной помехи и выполнении ее компенсации: 1 – основной пик сжатого ФМ сигнала; 2 – боковые лепестки ФМ сигнала; 3 – некомпенсированные остатки активной помехи

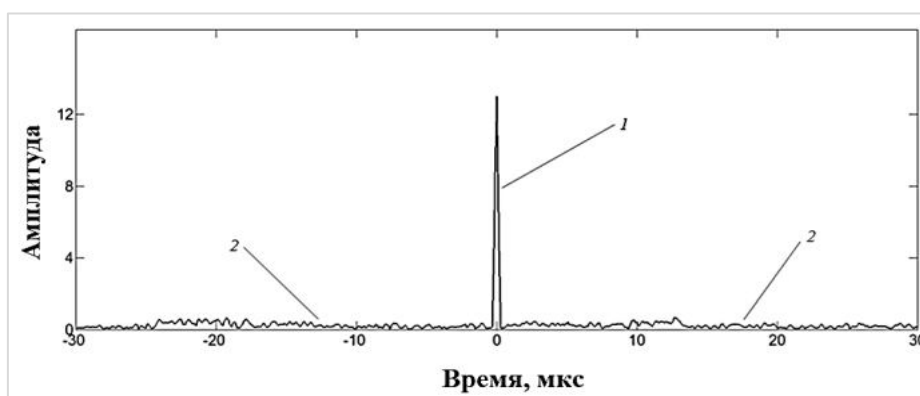


Рис. 3. Выходной сигнал подоптимального фильтра сжатия ФМ сигнала при воздействии активной помехи и выполнении ее компенсации: 1 – основной пик сжатого ФМ сигнала; 2 – некомпенсированные остатки активной помехи

На рис. 3 показан выходной сигнал подоптимального фильтра сжатия ФМ сигнала [4]. Указанный фильтр отличается тем, что на его выходе отсутствуют боковые лепестки. Из рисунка 3 следует, что после выполнения компенсации на выходе подоптимального фильтра остались только основной пик полезного сигнала и некомпенсированные остатки активной помехи. Таким образом, уровень боковых лепестков на выходе подоптимального фильтра определяется только уровнем компенсации активной помехи.

5. Заключение. При использовании метода адаптивной компенсации активных помех в первичных радиолокаторах полезный сигнал может оказать значительное влияние на эффективность метода.

При снижении скважности полезного сигнала эффективность метода адаптивной компенсации значительно ухудшается (при снижении скважности с 500 до 5 отношение сигнал/помеха уменьшилось более чем на 20 дБ). Тем не менее, даже при низком уровне активной помехи (на уровне амплитуды полезного сигнала) и малой скважности полезного сигнала (≥ 5) улучшение отношения сигнал/помеха составляет не менее 26 дБ, что свидетельствует о достаточно высокой потенциальной эффективности использования метода адаптивной компенсации в приемных трактах первичных радиолокаторов.

При согласованном сжатии сигнала с фазовой манипуляцией, выполненной в соответствии с 13-элементным кодом Баркера, некомпенсированные остатки активной помехи по уровню оказались значительно меньше, чем боковые лепестки полезного сигнала (благодаря компенсации). Следовательно, некомпенсированные остатки активной помехи практически не повлияли на разрешающую способность по дальности.

Уровень боковых лепестков на выходе подоптимального фильтра [4] определяется только уровнем компенсации активной помехи.

Библиографический список

1. *H. Versmissen*. Study of the performance degradation of the Belgian S-band air surveillance radars due to the interference of upcoming 4G technologies. Test Report, 2011. 55 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.bipt.be/en/425/ShowDoc/3527/Communications/Study_of_the_Performance_Degradation_of_the_Belgia.aspx (дата обращения 16.03.2019).
2. *Фридман Л. Б., Зубков В. А., Мазаян Н. Р., Николаев С. Ф., Сеницын Е. А., Шильдкрет А. Б.* Пат. 103008 (РФ). Устройство адаптивной компенсации телевизионных помех. Оpubл. в Б.И., 2011. № 8.
3. *Levanon N., Mozeson E.* Radar signals. John Wiley & Sons, Inc., 2004, 411 p.
4. *Lehtinen M., Dantie B., Nygren T.* Optimal binary phase codes and sidelobe-free decoding filters with application to incoherent scatter radar // *Annales Geophysicae*. 2004, Vol. 22, С. 1623 – 1632.
5. *Korshunov A. Yu., Mazayan N. R., Nikolaev S. P., Sinitsin E. A., Fridman L. B., Shildkret A. B.* Phase-shift keyed signal compression using a mismatched sidelobe-free filter in the presence of Doppler frequency shift // *Proc. of CriMiCo 2012 - 2012 22nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings (Sevastopol, Sept. 2–8, 2012)*. С. 1084 – 1085.
6. *Фридман Л. Б., Еришов Г. А., Сеницын В. А., Сеницын Е. А.* Посадочная радиомаячная группа отечественного и международного диапазонов частот // В сб.: «Инновационные технологии и технические средства специального назначения». Труды X ОНПК. Том 1. СПб: БГТУ «Военмех», 2018. С. 314 – 317.
7. *Cho J.Y.N.* Multi-PRI signal processing for the terminal Doppler weather radar. Part II: Range-velocity ambiguity mitigation // *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22. 2005. С. 1507—1519.
8. *Фридман Л. Б., Коришунов А. Ю., Мазаян Н. Р., Николаев С. Ф., Сеницын Е. А., Шильдкрет А. Б.* Эффективность метода раскрытия неоднозначности измерения дальности для первичных радиолокационных станций // *Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей»*. 2013. № 1 (9). С. 54 – 58.

9. Korshunov A. Yu., Fridman L. B., Sinitsin E. A. Effectiveness of range ambiguity mitigation in primary radars when using signals with high pulse-repetition frequency // Proc. of CriMiCo 2013 - 2013 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings (Sevastopol, Sept. 8 – 14, 2013). С. 1154 – 1155.

10. Barker R. Group Synchronizing of Binary Digital Systems, in: Communications Theory, edited by W. Jackson. Academic Press, 1953. P. 273 – 287.

11. Fridman L. B., Ershov G. A., Myasnikov S. A., Perelomov V. N., Sinitsin E. A. Compression of phase-shift keyed signals by means of the mismatched sidelobe-free filter with application to coherent pulse radar // Proc. of European Microwave Week 2017: "A Prime Year for a Prime Event", EuMW 2017 - Conference Proceedings; 14th European Microwave Conference, EURAD 2017 (Nuremberg, Germany, Oct. 12 – 14, 2017). С. 235 – 238.

УДК 621.396

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ АКТИВНЫХ ПОМЕХ В ПРИЕМНОМ ТРАКТЕ РЕТРАНСЛЯТОРА ДАЛЬНОМЕРА ПОСАДОЧНОЙ РАДИОМАЯЧНОЙ ГРУППЫ

В. А. Сеницын, Е. А. Сеницын, Л. Б. Фридман

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
ОАО «ВНИИРА»*

Исследованы вопросы использования метода адаптивной компенсации активных помех в приемном тракте ретранслятора дальномера посадочной радиомаячной группы. При этом рассмотрен адаптивный метод, отличающийся выполнением компенсации активных помех в спектральной области и сохраняющий эффективность при многопутевом распространении активных помех. В качестве активных помех рассматриваются сигналы новых радиоэлектронных средств (в частности, сигналы цифрового телевидения и сотовой связи).

1. Введение. Приемный канал («борт-земля») ретранслятора дальномера (РД) посадочных радиомаячных групп (ПРМГ) [1, 2] работает в диапазонах частот, которые частично используются сотовой связью, системами LTE и цифрового телевидения, что ведет к образованию взаимных межсистемных помех. В [3, 4] был предложен метод адаптивной компенсации активных помех в спектральной области, отличающийся тем, что позволяет компенсировать активные помехи при их многопутевом распространении, вызванном наличием переотражений от местных предметов и подстилающей поверхности. В [3] были приведены результаты полигонных испытаний экспериментального образца адаптивного компенсатора активных помех (АКТП), реализованного на основе указанного метода. При этом в [3] было показано, что использование АКТП в приемных трактах вторичных радиолокаторов (ВРЛ) системы управления воздушным движением [5] позволяет улучшить отношение сигнал/помеха (ОСП) на величину порядка 30 дБ.

В настоящее время в АО «ВНИИРА» разрабатывается опытный образец новой посадочной радиомаячной группы [6, 7], что определяет актуальность вопросов использования метода адаптивной компенсации в приемном тракте РД.

В данной работе выполнен анализ эффективности использования метода адаптивной компенсации активных помех в приемном тракте РД ПРМГ. При этом для повышения эффективности компенсации активных помех при их многопутевом распространении предлагается существенно повысить порядок быстрого преобразования Фурье (БПФ), используемого при компенсации в спектральной области.

2. Особенности анализа эффективности метода адаптивной компенсации при учете многопутевого распространения активной помехи. Анализ эффективности использования метода адаптивной компенсации активных помех в приемном тракте РД ПРМГ был проведен с помощью математического моделирования в программной среде “Matlab”. Активная помеха рассматривалась как стационарный шумоподобный комплексный гауссовский случайный процесс.

В реальных условиях, кроме активной помехи $\dot{a}_\Pi(t)$, на вход антенны поступает ряд ее переотражений

$$\dot{a}_\Sigma(t) = \dot{a}_\Pi(t) + \sum_{i=2}^N \dot{a}_\Pi(t - \tau_i) \cdot \dot{K}_{a_i} = \sum_{i=1}^N \dot{a}_\Pi(t - \tau_i) \cdot \dot{K}_{a_i},$$

где τ_i и \dot{K}_{a_i} - соответственно задержка и коэффициент ослабления i -го переотражения в основном приемном канале; N - количество учитываемых переотражений; $\tau_1 = 0$, $\dot{K}_{a_1} = 1$.

3. Эффективность использования метода адаптивной компенсации в приемном канале ретранслятора дальногома. В [3] было показано, что дальнейшее повышение эффективности компенсации активной помехи в условиях ее переотражений может быть достигнуто путем повышения порядка БПФ, используемого при компенсации в спектральной области. Однако при повышении порядка БПФ увеличивается время усреднения весовых коэффициентов [3, 4], используемых при компенсации (время адаптации). При компенсации помехи в приемных трактах ВРЛ время адаптации ограничено, т.к. весовые коэффициенты должны успевать отслеживать постоянное изменение коэффициента передачи приемного канала, вызванное непрерывным вращением антенны ВРЛ в азимутальной плоскости [8]. Таким образом, эффективность компенсации активной помехи в приемных трактах ВРЛ ограничена и определяется прежде всего скоростью вращения антенны ВРЛ. В то же время, антенна РД ПРМГ является неподвижной (а ее диаграмма направленности не меняет направления), что позволяет значительно повысить порядок БПФ с целью повышения эффективности компенсации активной помехи в приемном тракте РД.

На рис. 1 показаны результаты выполненного анализа эффективности метода адаптивной компенсации при различных величинах порядка БПФ в случае наличия одного переотражения активной помехи.

Как следует из рис. 1, увеличение порядка БПФ приводит к значительному повышению эффективности адаптивной компенсации. В частности, при увеличении порядка БПФ с 256 до 8192 ОСП повысилось более чем на 15 дБ (улучшение ОСП повысилось с 30,5 до 46 дБ).

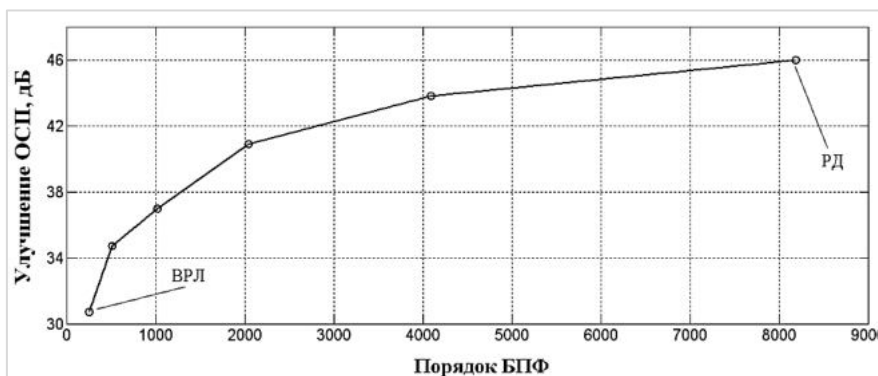


Рис. 1. Зависимость эффективности компенсации активной помехи от порядка БПФ при наличии одного переотражения помехи, $\tau_2 = 2$ мкс, $\dot{K}_{a_2} = 0,2$

Таким образом, при использовании метода адаптивной компенсации в приемном тракте РД может быть обеспечена значительно большая эффективность компенсации активных помех, чем при рассмотренном в [3, 4] использовании указанного метода в приемном тракте ВРЛ. Повышенная эффективность использования метода в приемном тракте РД обусловлена неподвижностью антенны РД (и постоянным направлением ее диаграммы направленности), что позволяет значительно увеличить порядок БПФ. При этом величина порядка БПФ (и, как следствие, коэффициент улучшения ОСП) практически ограничены лишь количеством вычислительных ресурсов, используемых при выполнении операции БПФ).

4. Заключение. Увеличение порядка БПФ, используемого при компенсации активных помех в спектральной области, приводит к значительному повышению эффективности адаптивной компенсации помех в условиях их многопутевого распространения (отношение сигнал/помеха улучшается более чем на 15 дБ при увеличении порядка БПФ в 32 раза).

При использовании метода адаптивной компенсации в приемном тракте ретранслятора дальномера посадочной радиомаячной группы обеспечивается значительно большая эффективность компенсации активных помех, чем при рассмотренном в [3, 4] использовании указанного метода в приемном тракте вторичного радиолокатора (за счет увеличения порядка БПФ).

Степень улучшения отношения сигнал/помеха при использовании указанного метода в приемном тракте ретранслятора дальномера практически ограничена лишь количеством вычислительных ресурсов, используемых при выполнении операции БПФ.

Библиографический список

1. *Сосновский А. А., Хаймович И. А.* Радиотехнические средства ближней навигации и посадки летательных аппаратов. М: Машиностроение, 1975. 200 с.
2. *Беляевский Л. С., Новиков В. С., Олянюк П. В.* Основы радионавигации. М.: Транспорт, 1982. 288 с.
3. *Фридман Л. Б., Николаев С. Ф., Мазаян Н. А., Сеницын Е. А., Шильдкрет А. Б., Чепель Е. В.* Алгоритмы и устройства адаптивного подавления телевизионных помех для вторичных радиолокационных станций УВД. СПб: Облик, 2010. 190 с.
4. *Фридман Л. Б., Зубков В. А., Мазаян Н. Р., Николаев С. Ф., Сеницын Е. А., Шильдкрет А. Б.* Пат. 103008 (РФ). Устройство адаптивной компенсации телевизионных помех. Опубл. в Б.И., 2011. № 8.
5. *Skolnik M.* Radar handbook, 3rd ed. McGraw Hill, 2008. 1328 p.
6. *Фридман Л. Б., Еришов Г. А., Мясников С. А., Сеницын Е. А.* Особенности построения новой посадочной радиомаячной группы для радиомаячной системы посадки воздушных судов. В кн.: 27-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» – КрыМиКо'2017 (Севастополь, 3 – 9 сент. 2017 г.). 2017. С. 1526 – 1530.
7. *Фридман Л. Б., Еришов Г. А., Сеницын В. А., Сеницын Е. А.* Посадочная радиомаячная группа отечественного и международного диапазонов частот // В сб.: «Инновационные технологии и технические средства специального назначения». Труды X ОНПК. Том 1. СПб: БГТУ «Военмех», 2018. С. 314 – 317.
8. *Фридман Л. Б., Николаев С. Ф., Чепель Е. В., Шильдкрет А. Б.* Обеспечение электромагнитной совместимости средств телевидения с наземными и бортовыми средствами вторичной радиолокации // Вопросы радиоэлектроники. Серия: РЛТ. 2008. Вып. 2. С. 51 – 61.

УДК 621.396.99

**РАБОТЫ КАФЕДРЫ И4 (№7) БГТУ «ВОЕНМЕХ» ИМ. Д.Ф.УСТИНОВА
ПО ПОВЫШЕНИЮ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ
ИМПУЛЬСНОФАЗОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ДЛИННОВОЛНОВОГО И СРЕДНЕВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНОВ**

С. Ю. Страхов, А. Н. Флёрв, А. А. Флёрва

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Обсуждается цикл работ, выполненных на кафедре И4 (№7) БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 1965 – 1985 гг. под руководством доц. Н. П. Митрофанова и направленных на повышение помехоустойчивости приемников импульсно-фазовых систем радионавигационных систем (ИФРНС) длинноволнового (ДВ) и средневолнового (СВ) диапазонов. В рамках этих работ проводились исследования, связанные с анализом путей построения подавителей сосредоточенных по спектру помех и оценкой их эффективности. Исследовались искажения огибающей радионавигационного импульса и фазы, возникающие при режекции помех. Рассматривались вопросы, связанные с автоматизацией настройки компенсаторов узкополосных помех. Исследовалась возможность применения синхронного фильтра для устранения неопределенности при оценке временного положения характерной точки огибающей импульсного навигационного сигнала. В работах также исследовалась возможность применения активной магнитной рамочной антенны (АМРА) с целью ослабления помех, создаваемых собственными радиоэлектронными средствами (РЭС) корабля. Проводились работы по созданию измерительного комплекса, предназначенного для выявления частот синхронных помех приемоиндикаторам ИФРНС СВ диапазона и методики оценки поражающего действия этих помех, позволяющей выработать рекомендации по выявлению наиболее помехозащищенного частотного канала.



Введение. В 1965 – 1985 гг. на кафедре №7 под руководством доцента *Н. П. Митрофанова* велись работы теоретического и прикладного характера связанные с повышением помехоустойчивости судовых приемоиндикаторов импульсно-фазовых радионавигационных систем (ИФРНС) длинноволнового и средневолнового диапазонов. В этот период на флоте происходило интенсивное развитие навигационных систем этих диапазонов. Вводились в эксплуатацию новые цепочки станций гиперболической системы ИФРН LORAN-C (США), Тропик-2 (с 1995 – «Чайка»), морская ИФРН для работы в прибрежной зоне «Брасс-3». Разрабатываются фазовые системы, например автоматизированная многочастотная «Марс-75».

Вводятся в эксплуатацию приемоиндикаторы КПИ-5, КПИ-5ф, 6ф, 7ф, «Галс». Рабочие частотные диапазоны, используемые ИФРН системами, перегружены сигналами вещательных станций. Приемоиндикаторы устанавливались на морских объектах с высокой насыщенностью излучающих средств, поэтому остро встала проблема электромагнитной совместимости.

В этот период проходило только становление систем спутниковой навигации (ССН). ССН «Циклон» была принята на вооружение в 1976 г. и содержала шесть аппаратов «Парус», GPS (NavStar). В 1974 – 1981 гг., были выведены три спутника, ГЛОНАСС, и только к 1995 г. группировка доведена до 24 спутников.

В этот период на кафедре был успешно выполнен ряд НИР, шифры «Лоран-МВО», «Бобровка», «Шалаш», «Шоссе», «Шоссе-77», «Рокада», «Чудь-МВО», «Транспарант» [1 – 6], научный руководитель Митрофанов Н.П. Заказчиком которых выступали Главное управление навигации и океанографии МО СССР (в/ч 25106) и НИИ- 9 ВМФ (в/ч 62728).

В рамках этих НИР проводились исследования связанные с анализом путей построения подавителей сосредоточенных по спектру помех и оценкой их эффективности. Анализируются возникающие при режекции помех искажения огибающей радионавигационного импульса и вносимые фазовые ошибки, рассматривались вопросы, связанные с автоматизацией настройки компенсаторов узкополосных помех. Были разработаны и изготовлены имитаторы сигналов и помех, макетные образцы компенсаторов помех с ручной настройкой, адаптивный компенсатор помех, реализующий алгоритм Уидроу и пр.

Также рассматривалась возможность применения синхронного фильтра (СФ) для устранения неопределенности при оценке временного положения характерной точки огибающей импульсного навигационного сигнала и был изготовлен ряд макетных образцов синхронного фильтра. Блок СФ позднее появился в приемоиндикаторе КПИ-5ф (блок РР-4).

С целью ослабления помех создаваемых собственными РЭС корабля исследовалась возможность применения активной магнитной рамочной антенны (АМРА) взамен штатной электрической штыревой антенны. Был изготовлен экспериментальный образец АМРА и в 1984 г. проведены его натурные испытания на гидрографическом судне ГС-402 в г. Севастополе. По результатам этих работ в 1985 – 1986 гг. 18 СКТБ ВМФ (в/ч 49253) разработало опытный образец АМРА.

С целью выявления синхронных помех мешающих работе РНС «БРАСС-3» в диапазоне (1630 – 1850) кГц был создан радиотехнический аппаратный измерительный комплекс. С его помощью в 1982 г. был проведен анализ помеховой обстановки в акватории Балтийского моря (г. Балтийск – г. Нида) и даны рекомендации по выбору рабочего канала этой РНС.

В этот же период велись работы и по другим направлениям: создан передатчик синхронной помехи для испытаний РНС «Марс-75», проводилось тестирование приемоиндикаторов «Галс» и КПИ-7ф. Для выявления и измерения уровня помех приемоиндикаторам ИФРНС по побочным каналам приема, создаваемым собственными РЭС, был разработан автономный широкополосный измеритель электромагнитного поля (его электрической составляющей). Он использовался также для исследования распределения уровня напряженности поля на судах различного типа.

Группа Митрофанова – это аспиранты, инженеры НИСа, студенты дипломники. В разные годы в нее входили В. З. Друккер, В. Н. Яночкин, С. Б. Леонтьев, В. П. Беляев, В. В. Белов, А. Н. Флёрв, В. Н. Виноградов, А. Суслов и др.

Помехи приемоиндикаторам ИФРНС. В 60-х годах уже хорошо была развита теория оптимального обнаружения, фильтрации и измерения параметров известного по форме сигнала, принимаемого в смеси с небелым шумом [7, 8]. При синтезе оптимальных структур по критериям минимума СКО (Колмогоров, Винер) или максимума отношения сигнал/шум (Котельников), вид АЧХ линейного тракта приемника, определяются спектральным составом сигнала $S_C(\omega)$ и энергетическим спектром помех $W_{II}(\omega)$ и иметь вид

$$|K_{OIT}(j\omega)|_{CKO} = \sqrt{\frac{S_C(\omega)}{S_C(\omega) + W_{II}(\omega)}} \quad (1)$$

$$|K_{OIT}(j\omega)|_{\max S/N} = \frac{|S(j\omega)|}{\sqrt{W(\omega)}}$$

Практически при наличии узкополосных помех был предложен метод квазиоптимальной обработки с использованием «обеляющего» фильтра имеющий амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) вида

$$|K_{\text{оф}}(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{W(\omega)}} \quad (3)$$

Сигнал ИФРНС - последовательность радиоимпульсов с периодом $T_{\text{сл}}$, амплитудный спектр которого представляется в виде произведения модулей комплексного спектра одиночного радиоимпульса, с центральной частотой спектра f_0 и модуля функции $A(j2\pi f)$, характеризующей периодический характер сигнала и имеющий гребенчатую структуру

$$S_{\text{нс}}(f) = |S_c [2\pi j(f - f_0)]| |A(j2\pi f)| = S_c(f - f_0) \left| \frac{\sin(n\pi f T_{\text{сл}})}{\sin(\pi f T_{\text{сл}})} \right| \quad (4)$$

Измеряемым навигационным параметром гиперболической ИФРНС является ременной интервал, между сигналами ведущей (Вщ) и ведомой (Вм) станций, измеренный между характерными точками их сигнальных радиоимпульсов.

Одной из реализаций оптимального измерителя временного положения импульса в присутствии нормального белого шума является структура следящего измерителя, АЧХ которого тоже имеет вид гребенчатой функции.

Тогда АЧХ линейного тракта приемника можно представить как произведение

$$K(f) = K_w(f) K_c(f) K_{\text{ГФ}}(f), \quad (5)$$

где $K_w(f) = \prod_m K_{\text{ГФ}}(f)$ - обеляющий фильтр, который может быть реализован в виде различного рода режектирующих систем, настроенных на несущие частоты помех;

$K_c(f)$ - АЧХ тракта усиления и селекции, полоса пропускания которого согласована со спектром одиночного импульса; $K_{\text{ГФ}}(f)$ - «гребенчатый» фильтр, АЧХ которого «согласована» со вторым сомножителем в выражении (4) спектра сигнала.

Одиночный сигнальный импульс и упрощенная структурная схема линейного тракта приемника для одной цепочки станций ИФРНС, представлена на рис. 1.

Она содержит блок режекторных фильтров (БРФ), тракт усиления и селекции (ТУиС) и узкополосный тракт, имеющий в своем составе временной дискриминатор с накопителем, простейшей реализацией которого является коммутируемая RC цепь. Такая структура узкополосного тракта представляет собой «гребенчатый» фильтр.

Для устранения многозначности временного положения импульсов Вщ и Вм станций измерения проводятся в два этапа. На первом этапе измеряется временной интервал $\tau_{\text{ХТО}}^*$ между ХТО огибающих сигналов этих станций (грубая оценка временного интервала), а на втором этапе измеряется сдвиг фаз τ_ϕ^* между высокочастотным заполнением сигнальных импульсов ВЩ и ВМ станций (точная оценка). В режиме измерения стробы временных дискриминаторов грубой и точной оценок временного интервала, находятся в окрестности характерной точки (ХТО) огибающей и перехода функции высокочастотного заполнения радиоимпульса через ноль [9] (рис. 1а). Огибающая импульса радионавигационного сигнала, описывается выражением [9]

$$S_0(t) = \left(\frac{t}{\tau_\phi}\right)^2 \exp\left[2\left(1 - \frac{t}{\tau_\phi}\right)\right], \quad (6)$$

где τ_ϕ – длительность фронта огибающей радиоимпульса, а огибающая сигнала входе дискриминатора следящей системы грубой оценки положения ХТО формируется в результате преобразования

$$S_0(t) = S_0(t) - a \frac{dS_0(t)}{dt} \quad (7)$$

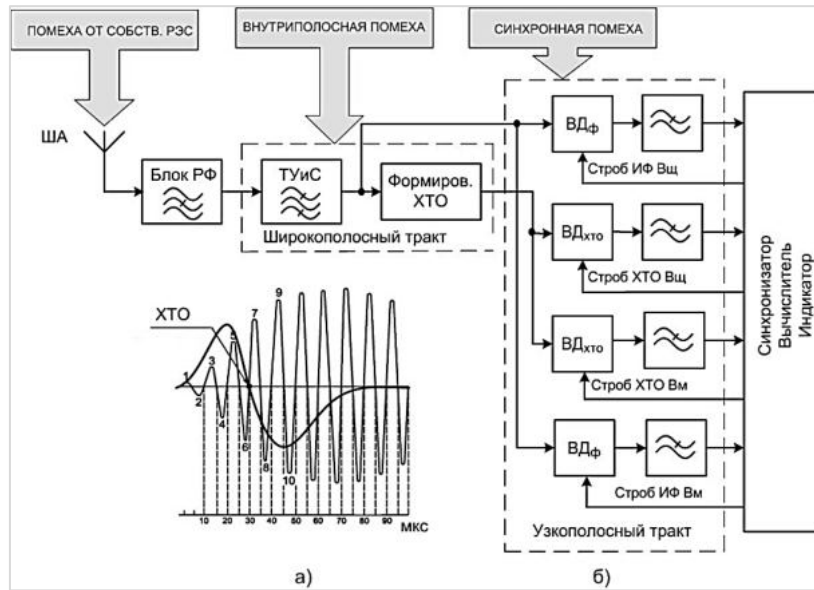


Рис. 1. Одиночный сигнальный импульс и импульс огибающей на выходе формирователя ХТО, ГОСТ Р 53168-2008 (а); модель линейного тракта приемоиндикатора ИФРНС (б)

В диапазонах ДВ и СВ вероятность появления нескольких одновременно действующих внутрисполосных помех достаточно велика. Это помехи от вещательных станций, станций фазовых РНС «Дека» и РСВТ-1с. Результирующая интенсивность группового сигнала на один-два порядка может превосходить интенсивность принимаемых сигнальных радиоимпульсов. В точке приема помехи классифицируются [9] как внутрисполосные и внеполосные, синхронные и несинхронные (таблица 1). На рис.2.а показан пример спектра группового мешающего сигнала узкополосных помех.

Таблица 1

помехи		поражение
Внутрисполосные	Интенсивные несинхронные и синхронные, сосредоточенные по спектру	Тракт усиления и селекции, блокирование. Ошибка измерения НП
	Слабые сосредоточенные по спектру, синхронные	Узкополосный тракт. Ошибка измерения НП
	Флюктуационный шум. Неподавленные боковые полосы АМ колебаний.	Тракт усиления и селекции, Узкополосный тракт. Ошибка измерения НП
Внеполосные	От собственных РЭС и электрооборудования корабля	Тракт усиления и селекции. Блокирование

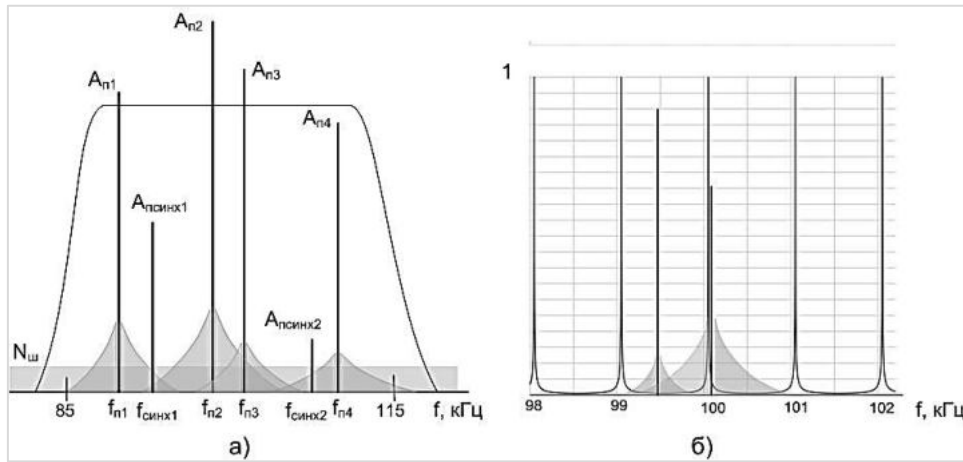


Рис. 2. Спектр группового сигнала внутрисполосных помех от вещательных станций в диапазонах ДВ и СВ (а); фрагмент частотной оси с АЧХ гребенчатого фильтра и спектрами синхронной и несинхронной помехами (б)

Внутрисполосные и внеполосные помехи высокого уровня поражают приемник по каналу блокирования.

Слабые сосредоточенные по спектру синхронные помехи могут попадать в полосы прозрачности «тонкой» структуры АЧХ линейного тракта приемника. АЧХ структуры временной дискриминатор - одноканальный RC накопитель имеет гребенчатую структуру

$$K(f) = \frac{1 - \beta}{\sqrt{1 - 2\beta \cos(2\pi f T_k) + \beta^2}} \quad (8)$$

где $\beta = \exp(-\tau_{cmp} / \tau_{RC})$; τ_{RC} постоянная времени накопителя; τ_{cmp} длительность стро-ба дискриминатора; T_k – период следования стро-ба дискриминатора.

Фрагмент АЧХ «тонкой» структуры приемника представлен на рис.2б.

Частотный интервал между максимумами АЧХ равен

$$F_n = \frac{m}{T_k} \quad (9)$$

а эффективная шумовая полоса пропускания «зуба» АЧХ определяется как

$$\Delta F_{\text{эфф}} = \frac{1 - \beta}{2(1 + \beta)T_k} \approx \frac{\tau_{cmp}}{2\tau_{RC}T_k} \quad (10)$$

Синхронная помеха даже незначительного уровня, соизмеримого с уровнем сигнала, попадая в полосы прозрачности АЧХ «гребенчатого фильтра», вызывает ошибку точной оценки временного положения импульса τ_{ϕ}^* .

Вероятность поражения, синхронной помехой узкополосного тракта, учитывая (9) и (10), равна

$$p = \frac{n\Delta F_{\text{эфф}}}{\Delta F_{\text{TVUC}}} \approx \frac{\tau_{cmp}}{2\tau_{RC}} \Delta F_{\text{эфф}} = \frac{1 - \beta}{2(1 + \beta)T_k} \approx \frac{\tau_{cmp}}{2\tau_{RC}T_k} \quad (11)$$

Компенсаторы узкополосных помех. Исследовательские работы, разработка и изготовление макетных образцов компенсаторов узкополосных помех различного типа, их лабораторные и натурные испытания проводились в конце 60-х и первой половине 70-х годов сотрудниками группы Н. П. Митрофанова: В. Н. Яночкиным, С. Б. Леонтьевым, В. П. Беляевым, А.Н. Флёрвым. Результаты этой работы были использованы при формировании ТЗ на ОКР вновь разрабатываемых приемников ИФРНС.

Поражающее действие несинхронных и синхронных помех высокого уровня, спектр которых находится в полосе частот занимаемых полезным сигналом, можно уменьшить, используя узкополосные режекторные фильтры. Но в тоже время это приводит к ошибкам измерения положения ХТО огибающей и фазы ВЧ заполнения радиоимпульса т.к. одновременно с подавлением спектра сосредоточенной помехи подавляются компоненты спектра полезного сигнала. Как средство подавления узкополосных помех, попадающих в полосу пропускания приемника, рассматривались различные одноканальные режекторные фильтры (рис. 3а) и двухканальные компенсаторы помех с различной структурой фильтра в компенсационном канале (рис. 3б).

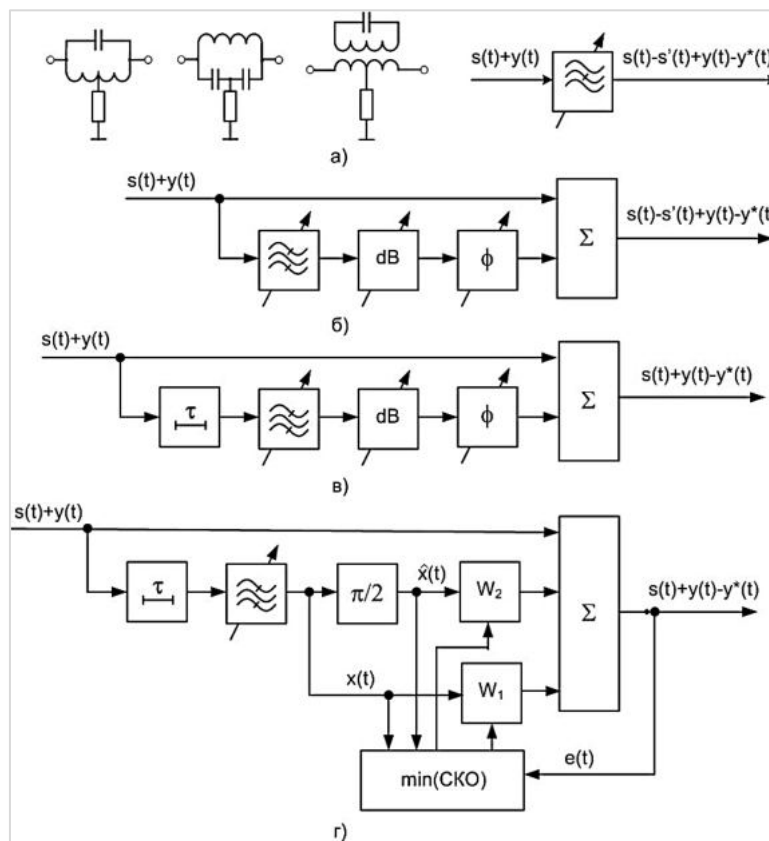


Рис. 3. Режекторный фильтр (а); 2-х канальный компенсатор (б); 2-х канальный компенсатор с линией задержки (в); адаптивный компенсатор реализующий алгоритм Уидроу (г)

Испытаний различных модификаций компенсаторов узкополосных помех проводились с использованием разработанных имитаторов сигнала в смеси с реальными сигналами вещательных радиостанций с амплитудной модуляцией (АМ). Проводились теоретические исследования по оценке искажений огибающей сигнального импульса и его фазы при режекции

помех, по структурной оптимизации компенсаторов, когда при заданной структуре определялись значения их параметров (например, полоса режекции, коэффициент подавления помехи) и по заданному критерию проводилось сравнение их между собой. Этой тематикой занимались многие коллективы, в том числе, ВНИИРА.

Поскольку полезный сигнал и помеха имеют перекрывающиеся спектры, что иллюстрируется рис. 4а, то считалось, что «вырезание» части спектра сигнала при режекции помехи приведет к неизбежным искажениям его формы. Однако Н. П. Митрофанов предложил структуру компенсатора помехового АМ сигнала, неискажающего информативную часть радионавигационного сигнала, свободную от ионосферных отражений. Компенсационный канал такого подавителя помимо фильтра, настраиваемого на частоту помехи и фазовращателя, содержал линию задержки на (40 – 50) мкс. Структурная схема его приведена на рис.3в, а сигнал на его выходе на рис. 4б. Эта структура стала эталоном для сравнения с другими разновидностями компенсаторов. Вместо достаточно габаритной линии задержки использовались фазовые звенья второго и более высоких порядков.

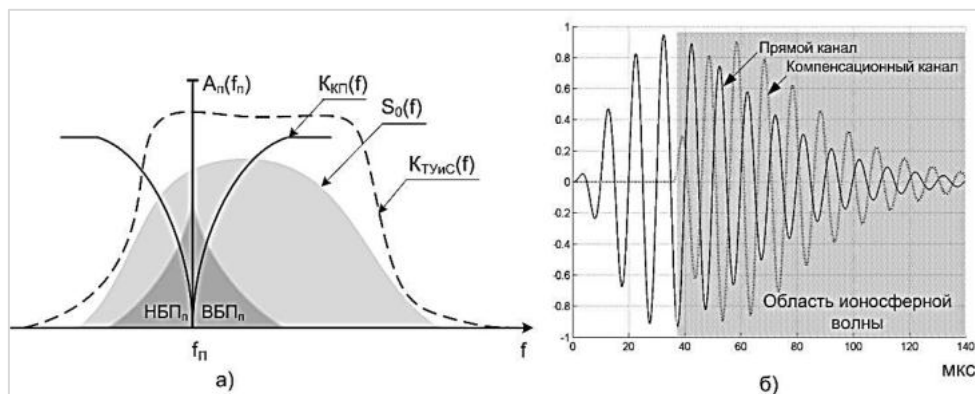


Рис. 4. Спектр полезного сигнала, узкополосной помехи и АЧХ компенсатора (а); сигнал на выходе компенсатора с линией задержки (б)

Достаточно сложной оказалась задача автоматизация настройки блока компенсаторов. В полосе пропускания приемника может одновременно оказаться несколько узкополосных, подлежащих режекции помех, причем каждый компенсатор необходимо подстраивать по трем параметрам: частоте, фазе и амплитуде. Многие коллективы в СССР занимались проблемой автоматизации компенсаторов помех, использовались схемы АРУ, частотной и фазовой автоподстройки частоты, зарегистрировано большое количество авторских свидетельств.

Сотрудники группы Н. П. Митрофанова тоже занимались проблемой автоматизации компенсаторов помех. В 1975 г. появилась статья Уидроу [11], где был описан адаптивный компенсатор помех, с использованием метода наискорейшего спуска получивший в дальнейшем название адаптивный алгоритм Уидроу-Хопфа. Структурная схема разработанного на кафедре макета автоматизированного компенсатора для одной помехи, в котором использовался алгоритм Уидроу с двумя весовыми коэффициентами в квадратурных каналах, приведена на рис. 3в. Алгоритм формирования весовых коэффициентов следующий

$$w_1(t) = 2\mu \int_0^t \varepsilon(t)x(t)d(t)$$

$$w_2(t) = 2\mu \int_0^t \varepsilon(t)\hat{x}(t)d(t)$$
(12)

Недостатком схемы адаптивного подавителя построенного на элементной базе тех лет являлось низкое значение динамического диапазона входных сигналов аналоговых перемножителей напряжений.

Этот недостаток был также присущ и другим схемам, реализующим автоматическую настройку, по сравнению с компенсаторами с ручной настройкой, выполненными на усилительных каскадах и пассивных элементах и обладающих большим динамическим диапазоном входных сигналов.

В состав приемоиндикатора КПИ-5ф входили четыре подавителя помех компенсационного типа, настраиваемых вручную.

Синхронный фильтр (СФ). Исследовательские работы, изготовление макетных образцов СФ, лабораторные и натурные испытания проводились в 1970-х гг. сотрудниками группы Н. П. Митрофанова: В. Н. Яночкиным, С. Б. Леонтьевым, А. Н. Флёровым, В. Н. Виноградовым. Результатом этих работ стало внедрение блока синхронного фильтра в бортовой комплекс корабельного приемоиндикатора КПИ-5Ф (прибор РР-4).

При искажениях формы сигнала, возникающих вследствие режекции сосредоточенных по спектру помех, существует вероятность того что положение ХТО огибающей будет определено неправильно, что приведет к значительным ошибкам фазовых измерений. Также некомпенсированные после режекции остатки боковых полос спектра вещательных станций представляют собой флюктуационную помеху высокого уровня. Для повышения помехоустойчивости приема сигналов ИФРНС «Тропик-2» относительно флюктуационных помех. Н. П. Митрофанов предложил использовать принцип многоканального накопления по всему телу информативной части радиоимпульса и для этого использовать синхронный фильтр Владимирского [12].

АЧХ СФ такая же, как и у одноканального RC накопителя, имеет гребенчатую структуру, и согласована со спектром последовательности радио импульсов [13, 14].

Принцип работы синхронного фильтра поясняет рис.6.а, на примере накопления одного периода ВЧ заполнения радиоимпульса. СФ выполнен на двуключевых коммутируемых RC цепочках с общим зарядным резистором R (однозвенный фильтр) и равновесным сумматором. Число каналов СФ на один период T_0 ВЧ заполнения радио импульса должно быть равным $N = T_0 / \tau_{cmp}$ где τ_{cmp} – длительность строба. При накоплении радио импульсов с периодом следования T_{cl} поступающих на вход СФ ключи каждого канала замыкаются на интервал времени τ_{cmp} в одной и той же фазе ВЧ заполнения других импульсов последовательности. При этом интенсивность канальных выборок на выходе СФ возрастает во времени по закону, определяемому переходной характеристикой фильтра, в данном случае аperiodического RC звена первого порядка, а их амплитуды пропорциональны значениям радиоимпульса в соответствующие моменты коммутации.

В результате накопления сигнал на выходе СФ имеет ту же форму что и одиночный радиоимпульс, но значительно очищенный от шумов. Поскольку выборки шума не коррелированы то выигрыш в отношении сигнал/среднеквадратическое значение помехи при выделении сигнала из смеси с флюктуационной помехой для СФ с однозвенным RC накопителем равен и без учета динамического диапазона его входных сигналов равен

$$N_{C\Phi} = \frac{h_{C\Phi_{вых}}}{h_{C\Phi_{вх}}} = \sqrt{\frac{2\tau_{RC}}{\tau_{cmp}}} \quad (13)$$

Недостатком СФ является наличие на его выходе коммутационных помех, возникающих вследствие дифференцирования импульсов коммутации цепью, состоящей из емкости затворсток и активного сопротивления нагрузки, а также остаточных напряжений («пьедесталов») на выходах его каналов в отсутствие входного сигнала (рис. 5).

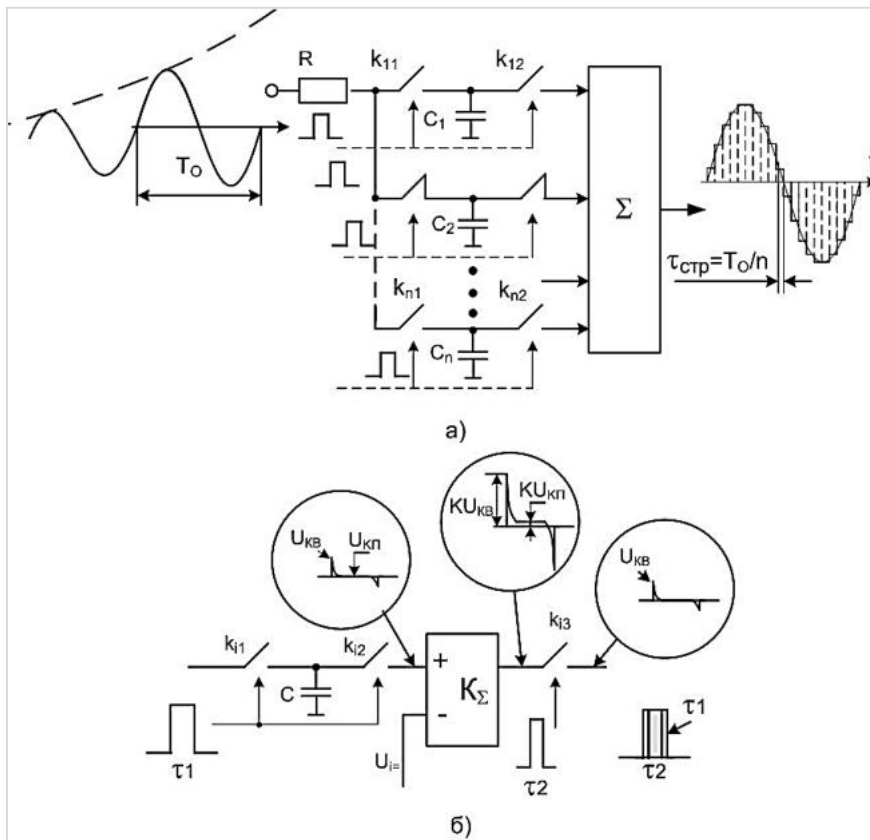


Рис. 5. Синхронный фильтр (а); компенсация коммутационных помех в СФ

Это уменьшает динамический диапазон его входных сигналов

$$D_{C\Phi real} = \frac{P_{ex\ max}}{\sigma_{ки}^2} = \frac{P_{ex\ max}}{\sigma_{кП}^2 + \sigma_{кВ}^2}, \quad (14)$$

где $\sigma_{ки}^2$, $\sigma_{кП}^2$, $\sigma_{кВ}^2$ – дисперсия коммутационного шума и его составляющих, пьедесталов и выбросов.

Реальный выигрыш СФ, при выделении сигнала из смеси с флюктуационной помехой, при наличии коммутационных помех равен

$$N_{C\Phi real} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{N_{C\Phi}^2} + \frac{1}{D_{C\Phi real}}}} \approx \sqrt{D_{C\Phi real}} \quad (15)$$

Для увеличения динамического диапазона СФ осуществлялось вторичное стробирование импульсами (ключ k_3 на рис. 5.б), более короткими, чем основные стробирующие импульсы и компенсация коммутационных пьедесталов в каждом канале.

Эти меры позволили увеличить динамический диапазон СФ, при этом выигрыш по подавлению флюктуационной помехи увеличился в n_D раз

$$n_D = \frac{D_{C\Phi real}}{D_{C\Phi}} = \frac{1}{\sqrt{\beta_{\Pi} \frac{\sigma_{\Pi}^2}{\sigma_{КШ}^2} + \frac{1}{K} \beta_{КВ} \frac{\sigma_{КВ}^2}{\sigma_{КШ}^2}}} \gg 1 \quad (16)$$

где $\beta_{\Pi}, \beta_{КВ} \ll 1$ – коэффициенты подавления коммутационных помех выбросов и пьедесталов; K – коэффициент передачи сумматора вторичного стробирования.

Фрагмент линейного тракта приемоиндикатора с устранением многозначности определения временного положения ХТО с синхронным фильтром показан на рис. 6. После синхронного накопления информативной части радионавигационного импульса и формирования огибающих радиоимпульсов $V_{\text{вц}}$ и $V_{\text{вм}}$ станций, их фронты на экране индикатора КПИ-5ф совмещались вручную и контролировались визуально [15]. Таким образом, обеспечивалось достоверное выделение сигнала из шумов и помех.

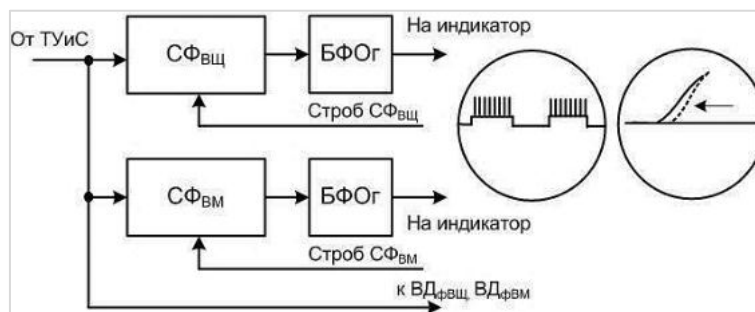


Рис. 6. Тракт грубой оценки навигационного параметра с синхронным фильтром

Активная магнитная рамочная антенна. В конце 1970-х гг. была разработана активная магнитная рамочная антенна (АМРА) для корабельных приемоиндикаторов импульсно-фазовых радионавигационных систем «Тропик-2». Испытания антенны проводились в начале 80-х годов на гидрографическом судне «ГС-402» в акватории Черного моря. Исследования, изготовление экспериментального образца и испытания проводились сотрудниками группы Митрофанова: С. Б. Леонтьевым, А. Н. Флёровым, В. П. Беляевым. Испытания прошли успешно. По результатам испытаний было разработано ТЗ на изготовление в 1985 – 1986 гг. опытного образца в 18СКТБ ВМФ.

Дальнейшему внедрению на флоте антенны АМРА помешал развал СССР.

Известен [16] эффект повышенной помехоустойчивости магнитных антенн расположенных в ближней зоне излучающих электрических антенн. Это обусловлено изменением соотношения между напряженностями магнитного и электрического полей в ближней зоне излучающих электрических антенн по сравнению с дальней зоной

$$\frac{E}{H} \neq 120\pi (\rightarrow \infty) \quad (17)$$

Поскольку магнитная антенна, при отсутствии антенного эффекта, чувствительна только к магнитной составляющей электромагнитного поля, то ее применение дает возможность устойчивой работы приемоиндикатора в непосредственной близости от судовых электрических антенн, создающих внеполосные помехи приемникам радионавигационных сигналов.

АМРА содержала две, ортогонально расположенные в горизонтальной плоскости многоэлементные антенные решетки, каждая из которых состояла из восьми магнитных ферритовых стержней, расположенных в два ряда. Стержни содержали две обмотки соединенные по параллельно-последовательной схеме для уменьшения суммарной индуктивности катушек стержня, что давало возможность увеличить число ее витков, тем самым повысить действующую

щую высоту антенны и улучшить ее симметрию относительно экрана для уменьшения антенного эффекта. Каждая из решеток была снабжена усилителем для предварительного усиления и согласования с входом приемоиндикатора. АМРА размещалась в радиопрозрачном корпусе, содержащем электростатический экран с зазорами.

Диаграмма направленности магнитной антенны (ДН) имеет вид «восьмерки», что дает возможность путем, ориентации ее минимума в направлении мешающей станции, подавить ее сигнал. Две ортогональные решетки давали возможность с помощью диаграммообразующих схем менять направление нулевого приема антенны, что являлось дополнительным преимуществом по сравнению со штатной штыревой антенной.

В 1981 г. НИИ-9 ВМФ (в/ч 62728) выдал задание на изготовление экспериментального образца АМРА в 18 СКТБ ВМФ (в/ч 49253). В результате совместной работы сотрудников группы Митрофанова Н.П. и инженеров 18 СКТБ ВМФ была разработана техническая конструкторская документация, по которой и был изготовлен экспериментальный образец (рис. 7) и проведены его натурные испытания. Испытания проводились в 1982 г. на гидрографическом судне ГС-402 в г. Севастополе, (в/ч 51393). Во время испытаний макетный образец АМРА был испытан на возможность совместной работы с судовыми передающими устройствами радиосвязи работающих в диапазоне частот от 480 кГц и выше: Р654, «Муссон», «Рейд», а также РЛС «Дон»

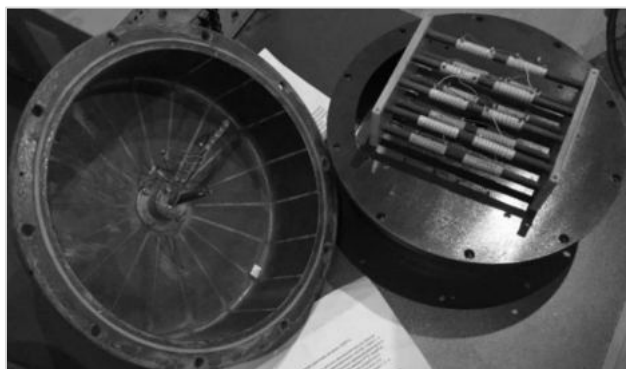


Рис. 7. Экспериментальный образец АМРА

Постановщиком помех была береговая станция РНС РСВТ-1с находящаяся на расстоянии 7,6 миль. Сравнительные испытания проводились с использованием двух приемоиндикаторов КПИ-5ф, работающих со штатной штыревой антенной и АМРА, излучающие антенны находились на расстоянии 3 м. Работоспособность АМРА проверялась также при совместной работе с электрооборудованием корабля, на расстоянии 0,5-1 м.

Напряженность электрического поля от собственных РЭС корабля равнялась (0,1-20)В/м, что соответствовало напряжению на клеммах штыревой антенны до 120 В. Приемоиндикатор с АМРА сохранял полную работоспособность при всех видах помех, а со штатной штыревой шестиметровой антенной терял работоспособность или был блокирован. Сравнительные испытания продемонстрировали полное превосходство АМРА по сравнению со штатной штыревой антенной.

Радиотехнический измерительный комплекс для анализа помеховой обстановки в акватории Балтийского моря. В конце 1970-х – начале 1980-х гг. проводились работы по созданию аппаратуры радиотехнического комплекса для анализа помеховой обстановки в акватории Балтийского моря, разработке методики выявления синхронных помех в полосе рабочих частот ИФРНС и выработке рекомендаций по защищенности многоканальной средневолновой радионавигационной системы «БРАСС-3». Аппаратура была изго-

товлена сотрудниками группы Н. П. Митрофанова: С. Б. Леонтьевым, А. Н. Флёровым. Работы проводились в акватории Балтийского моря: г. Калининград, г. Балтийск, г. Нида (Литовская ССР), Куршская коса. Результатом работ стали рекомендации по выбору наиболее помехозащищенных каналов системы «БРАС-3».

Измерительный комплекс представлял собой панорамный приемник с ручной перестройкой частоты. В качестве гетеродина приемника использовался синтезатор частот Ч6-31 и частотомер ЧЗ-63 (рис. 8).

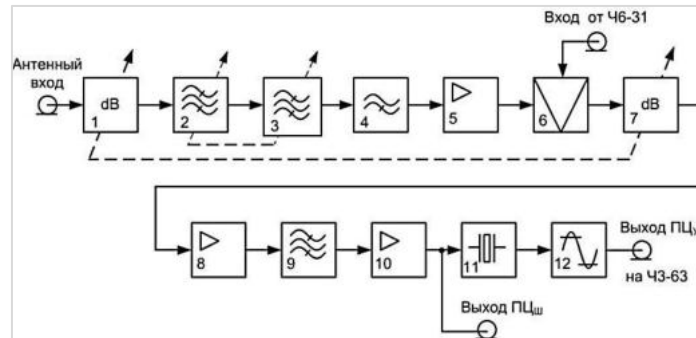


Рис. 8. Измерительный комплекс.

1, 7 – входные аттенюаторы преселектора и УПЧ; 2, 3 – перестраиваемый преселектор; 4 – ФНЧ; 5 – УВЧ; 6 – смеситель; 8, 9 – УПЧ; 11 – кварцевый фильтр; 12 – усилитель ограничитель

Относительная нестабильность частоты синтезатора ЧЗ-63 равна 10^{-9} , относительная погрешность измерения частоты частотомера ЧЗ-63 10^{-7} . Это обеспечивало точность определения несущих частот сосредоточенных по спектру помех на промежуточной частоте 100 кГц не хуже 0,01 Гц. Для предварительного анализа частот мешающих радиостанций использовался приемник Р-250М.

Методика определения несущих частот радиостанций в рабочем диапазоне частот состояла в следующем: после прогрева, частотной калибровки и калибровки чувствительности приемника Р-250М предварительно определялись несущие частоты и интенсивность помех в диапазонах (1630-1850) кГц и (2050-2150) кГц, сетка частот помех показана на рис. 9.

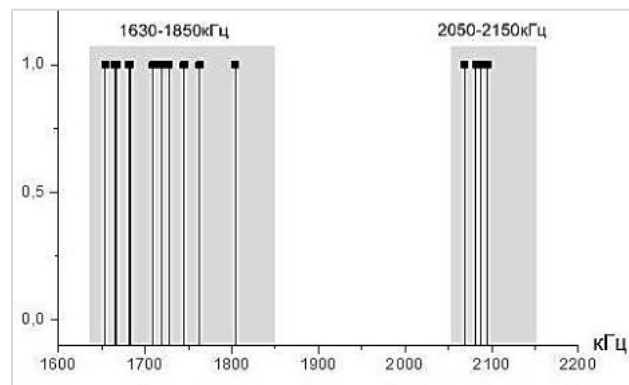


Рис. 9. Сетка частот мешающих радиостанций в рабочем диапазоне частот РНС «БРАСС», июнь 1982 г.

Зная временные характеристики сигнала, производился расчет частот «зубьев» тонкой структуры АЧХ, линейного тракта приемника и ширина их полос пропускания, и уже с использованием измерительного комплекса, уточнялись частоты синхронных помех, т.е. часто-

ты несущих попадающие в полосы пропускания «гребенчатого» фильтра приемоиндикатора «ГАЛС» для всех рабочих каналов и сетей РНС «БРАСС-3». Затем, рассчитывались коэффициенты прохождения этих помех (β_{ij}). По итогам анализа вырабатывались рекомендации по использованию наиболее помехозащищенных каналов РНС «БРАСС», таблица 2.

Таблица 2

канал	сеть					канал	сеть				
	1с	2с	3с	4с	Сх		1с	2с	3с	4с	Сх
1	β_{11}			β_{14}	$\beta_{1сх}$	14		β_{142}			$\beta_{14сх}$
2	β_{21}		β_{23}	β_{24}	$\beta_{2сх}$	15		β_{152}	β_{153}		$\beta_{15сх}$
3	β_{31}	β_{32}			$\beta_{3сх}$	16	β_{161}		β_{163}		
4		β_{42}			$\beta_{4сх}$	17	β_{171}		β_{173}	$\beta_{1сх}$	
6			β_{63}		$\beta_{6сх}$	18		β_{182}		β_{184}	$\beta_{18сх}$
8	β_{81}	β_{82}	β_{83}		$\beta_{8сх}$						

Заключение. На протяжении двадцати лет на кафедре И4 (№7) под руководством доцента Н. П. Митрофанова велись кропотливые научные исследования по анализу, разработке и внедрению средств помехозащитны корабельных приемоиндикаторов ИФРНС.

Были достигнуты важные научные результаты, связанные с выбором путей построения подавителей сосредоточенных по спектру помех и оценкой их эффективности, анализом искажений формы радионавигационного сигнала возникающих при режекции помех. Также были всесторонне исследованы важные вопросы, связанные с автоматизацией настройки компенсаторов узкополосных помех

Проведены исследования, связанные с возможностью применения синхронного фильтра для устранения неопределенности при оценке временного положения характерной точки огибающей импульсного навигационного сигнала в условиях действия интенсивной флюктуационной помехи. Меры, направленные на повышение эффективности СФ по отношению к этим помехам, увеличению его динамического диапазона, позволили изготовить ряд макетных образцов таких фильтров, что способствовало его внедрению.

Проведены исследования, связанные с возможностью замены штатной приемной антенны приемоиндикаторов магнитной антенной, инвариантной к интенсивным помехам от собственных РЭС корабля. Был изготовлен экспериментальный образец активной магнитной рамочной антенны и проведены его натурные испытания.

Проведены исследования и изготовлен измерительный комплекс для анализа помеховой обстановки в рабочем диапазоне частот СВ диапазона. Проведенные натурные измерения с использованием этого комплекса позволили дать рекомендации по выбору наиболее помехозащищенных рабочих каналов ИФРНС этого диапазона.

Исследования имели важное практическое значение, а их результаты легли в основу ряда серийно выпускаемых изделий. Созданный под руководством Н. П. Митрофанова научный задел позволил результативно выполнять дальнейшие научно-исследовательские работы и совершенствовать учебный процесс подготовки специалистов.

Библиографический список

1. Митрофанов Н. П., Флёрв А. Н., Яночкин В. Н. Отчет по НИР на спец. тему № Р 81-3292. Л: ЛМИ, 1974.
2. Белов В. В., Беляев В. П., Митрофанов Н. П., Флёрв А. Н. Отчет по НИР на спец. тему № 2-75/Р81-5475. Л: ЛМИ, 1976.

3. Белов В. В., Беляев В. П., Леонтьев С. Б., Митрофанов Н. П., Флёров А. Н. Отчет по НИР на спец. тему № Р 81-6085. Л.: ЛМИ, 1979.
4. Беляев В. П., Леонтьев С. Б., Митрофанов Н. П., Флёров А. Н. Отчет по НИР на спец. тему № У31-9184. Л.: ЛМИ, 1979.
5. Леонтьев С. Б., Митрофанов Н. П., Флёров А. Н. Отчет по НИР на спец. тему № У31-1098. Л.: ЛМИ, 1983.
6. Леонтьев С. Б., Митрофанов Н. П., Флёров А. Н. Отчет по НИР на спец. тему № У31-4267. Л.: ЛМИ, 1985.
7. Лутченко А. Е. Когерентный прием радионавигационных сигналов. М.: Советское радио, 1973. 208 с.
9. Радиотехнические системы / под ред. Казаринова. М.: Издательский дом «Академия», 2008. 592 с.
10. ГОСТ Р 53168-2008 Система радионавигационная «Чайка». Сигналы передающих станций. Технические требования. М.: Стандартинформ. 2010. 16 с.
11. Уидроу Б. и др. Адаптивные компенсаторы помех. Принцип построения и применения // ТИИЭР. 1975. Т. 63. №12. С. 59 – 98.
12. Владимировский Е. В. О синхронном фильтре // ЖЭТФ. 1950. №1. С. 3 – 10.
13. Лейхтер Л. Е. Расчет гребенчатых фильтров. М.: Советское радио, 1972. 256 с.
14. Финкельштейн М. И. Гребенчатые фильтры. М.: Советское радио, 1969. 320 с.
15. Изделие КПИ-5ф. Инструкция по эксплуатации. ОЦ1.400.120 ФО. 1987.
16. Калихман С. Г., Левин Я. М. Радиоприемники на полупроводниковых приборах. Теория и расчет. М.: Связь, 1979. 351 с.

УДК 623.624.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БУКСИРУЕМОЙ ЛОВУШКИ ДЛЯ МАСКИРОВАНИЯ КРЫЛАТОЙ РАКЕТЫ ОТ СРЕДСТВ ПВО ПРОТИВНИКА

А. А. Черанёв

АО «ОКБ «Новатор»

С использованием новых технологий и алгоритмов обработки зондирующего сигнала, средства ПВО позволяют обнаруживать цели, имеющие эффективную площадь рассеивания (ЭПР) менее одного квадратного метра, что позволяет им обнаруживать крылатые ракеты (~0,3–0,8 м²), а также производить эффективную селекцию ложных целей. В статье рассматриваются вопросы по разработке и возможности использования буксируемой ловушки для обеспечения прикрытия крылатой ракеты (КР) от средств ПВО противника. Цель работы заключается в построении алгоритма по выбору параметров для буксируемой ловушки и рассмотрение существующих структурных схем для ее реализации.

1. Введение. В ходе боевых действий широко используются массированные ракетно-авиационные удары. Основная цель массированного удара заключается в использовании имеющихся средств (КР), которые сосредотачиваются на узком участке фронта для решительного поражения войск противника в короткие сроки.

Основным элементом защиты от массированного удара являются системы противовоздушной обороны. Поэтому для обеспечения наибольшей эффективности массированного ракетно-авиационного удара используются средства радиоэлектронной борьбы, такие как ложные воздушные цели для имитации объектов с различными параметрами. Задача ложных воз-

душных целей – это создание множества ложных целей, которое затрудняет выявление правильной радиолокационной информации средствами ПВО.

Излучение зондирующих сигналов демаскирует радиолокационное средство и позволяет определить его местоположение и информацию о режиме его работы: рабочую частоту, вид излучения (непрерывный, квазинепрерывный, импульсный), поляризацию сигнала, вид и параметры модуляции, ширину спектра, длительность импульса, частоту следования импульсов, излучаемую мощность. Измеренные характеристики дают возможность определить тип радиолокационной станции и сформировать помеху в соответствии с предусмотренным алгоритмом радиоэлектронной помехи и нарушить нормальную работу РЛС [1].

Каждый элемент РЛС может являться объектом воздействия помех, но требует индивидуального подхода для каждой системы.

Ложные цели могут использоваться на буксируемых ловушках. Буксируемые ловушки могут применяться для противодействия в контурах наведения и самонаведения. Их эффективность будет высокой, если в начальный момент наведения ракеты, прикрываемая КР и ловушка представляются для РЛС групповой целью, т.е. не разрешаются по углам, дальности и доплеровским частотам. Применение буксируемых ловушек имеет ряд своих особенностей.

2. Основные параметры буксируемой ловушки. Рассмотрим основные параметры буксируемой ловушки для прикрытия КР. Максимальное удаление буксируемой ловушки от КР в основном определяется разрешающей способностью подавляемой системы по азимуту ($\Delta\alpha$), углу места ($\Delta\varepsilon$), дальности (ΔD), и доплеровским частотам (Δf). Это связано с тем, что для подавляемой РЛС КР и буксируемая ловушка будет представлена как одна цель, если они расположены в одном элементарном объеме обнаружения РЛС как показано на рис. 1а. Если КР и буксируемая ловушка различаются РЛС, т.е. представляются как группа целей (рис 1.б), то средства ПВО смогут идентифицировать одну из целей как помехопостановщик и предпринять необходимые меры.

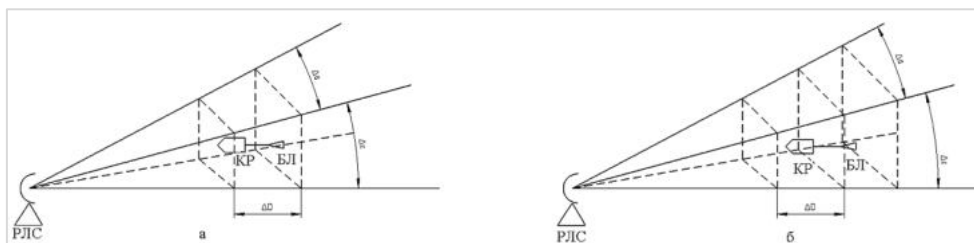


Рис. 1. Минимальный объем обнаружения РЛС (а – КР и буксируемая ловушка находятся в одном элементарном объеме, б – КР и буксируемая ловушка находятся в разных элементарных объемах)

Условие максимальной удаленности буксируемой ловушки можно определить из геометрических построений (рис. 2) и представить в виде:

$$L_{max} \leq \frac{\Delta\theta_p R}{\sin \theta} \quad (1)$$

где $\Delta\theta_p$ – разрешающая способность подавляемой РЛС по углу; R – расстояние до подавляемой РЛС; θ – ракурс ловушки.

Также появляется дополнительное ограничение максимальной длины троса, т. к. необходимо учесть условие неразрешения КР и буксируемой ловушки по дальности (в случае импульсной РЛС или головки самонаведения), исходя из элементарного объема зоны обзора и определяется формулой:

$$L_{max} < \delta D = \frac{c\tau_n}{2}, \quad (2)$$

где c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с), τ_n – длительность импульса зондирующего сигнала.

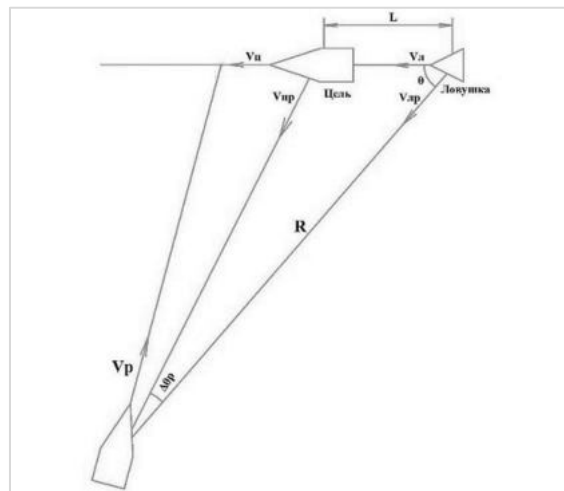


Рис. 2. Условие неразрешимости КР и буксируемой ловушки по углу

Минимальное расстояние между КР и буксируемой ловушкой необходимо выбирать исходя из радиуса поражения боевой части атакующей ракеты ($R_{пор}$) при котором поражающие элементы не причинят критических повреждений КР и представить в виде:

$$L_{min} > R_{пор} \quad (3)$$

Условие неразрешения КР и ловушки по доплеровским частотам определяется шириной полосы пропускания строга скорости ΔF и разностью доплеровских частот ловушки и КР Δf :

$$\Delta f \leq \Delta F \quad (4)$$

где

$$\Delta f = \frac{2}{\lambda} (v_{цр} - v_{лр}) = \frac{2\Delta v}{\lambda} \quad (5)$$

$v_{цр}$, $v_{лр}$ – соответственно радиальные скорости сближения атакующей ракеты с прикрываемым КР и ловушкой (рис. 2).

Условия (1), (2), (3) определяют максимально допустимое удаление ловушки от прикрываемого КР.

При проектировании ловушки следует учесть параметры РЛС противника и его характеристики. Для примера рассмотрим РЛС AN/SPY-1, AN/MPQ-53, AN/APG-65.

AN/SPY-1 – американская многофункциональная трехкоординатная РЛС с фазированной антенной решеткой (ФАР). Является основой боевой информационно-управляющей системы «Иджис». Выполняет поиск по азимуту и углу места, захват, классификацию и сопровождение целей, командное управление зенитными ракетами на стартовом и маршевом участках траектории. Разрешение по углу места и азимуту – $1,7^\circ$ ^[3].

РЛС AN/MPQ-53 (в составе ЗРК «Patriot») работает в диапазоне волн 5,5 – 6,7 см. Передатчик РЛС в зависимости от режима работы станции формирует различные по виду модуляции, длительности и частоте повторения импульсов, мощности и рабочей частоте сверхвысокочастотные сигналы, которые по волноводу передаются на облучающий рупор компаратора. В зарубежной печати отмечается, что выбор этого диапазона (в станциях обнаружения применяются более низкие частоты, а в станциях наведения – более высокие) обусловлен многофункциональностью РЛС AN/MPQ-53. Разрешающая способность по углу места и азимуту $\sim 1,5^\circ$.

Импульсно-доплеровская РЛС AN/APG-65 (диапазон частот 8-12,5 ГГц). В режиме «воздух-воздух» станция обеспечивает: поиск целей на больших дальностях (максимум на 150 км) с селекцией их по скорости; измерение дальности при поиске на всех курсовых углах при

сканировании (до 75 км) во время перехвата целей с помощью УР AIM-120А с интервалами между целями не более 150м. Разрешающая способность по углу места и азимуту $\sim 3,3^{\circ[4]}$.

Исходя из данных по разрешающим способностям РЛС по углам места и азимуту, можно построить зависимость максимальной длины буксируемого троса от дальности до систем ПВО при ракурсе ловушки $\theta = 90^{\circ}$ (рис. 3).

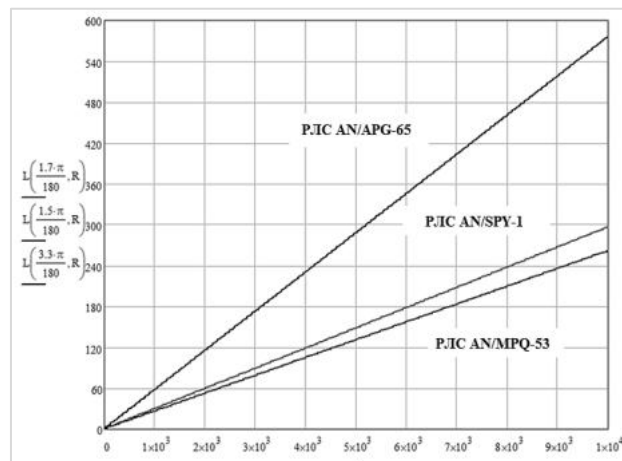


Рис. 3. Зависимость максимальной длины буксируемого троса $L(m)$ от расстояния до РЛС $R(m)$

Из приведенных выше соображений, можно оценить, что для импульсного РЛС AN/APG-65 максимальная длина буксира $L_{max} < 150$ м, а минимальная длина $L_{min} > 50$ м

Рассмотрим варианты, при котором буксируемая ловушка не обеспечивает необходимого прикрытия КР. Такое возможно, если ракета, выпущенная ЗРК летит к групповой цели с ракурсом ловушки приблизительно 0° или 180° .

В случае, если ракурс ловушки составляет $\sim 0^{\circ}$ (атака в передней полусфере), то прикрываемая ракета затеняет ее. На рис. 4 показана зона затенения КР ловушки α .

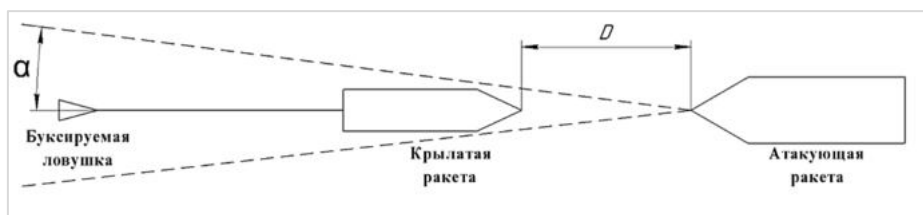


Рис. 4. Зоны затенения КР буксируемой ловушки

КР затеняет ловушку, если атакующая ракета находится внутри конуса, угол при вершине которой равен:

$$\alpha = \arcsin \frac{k'R}{D} \quad (3)$$

где R – радиус крылатой ракеты, k' – коэффициент запаса, D – дальность от атакующей ракеты до крылатой.

Следовательно, если атакующая ракета, летит навстречу прикрываемой КР в диапазоне углов $(0 \pm \alpha)^{\circ}$, то буксируемая ловушка будет неэффективной. Предположим, что $R = 0,4$ м, $D = 400-40000$ м, $k' = 1$, то $\alpha \sim (0,05 \dots 0,0005)^{\circ}$. Из этого можно сделать вывод, что данное событие маловероятно.

В случае, если ракурс ловушки составляет $\sim 180^\circ$ (атака в заднюю полусферу), то эффективность ловушки будет зависеть напрямую от выбранной длины троса и типа боевой части, применяемой в атакующей ракете.

Рассмотрим диапазон углов при атаке в заднюю полусферу, при котором буксируемая ловушка будет зависеть от типов боевых частей различных ракет.

3. Влияние типов БЧ на возможности прикрытия. В основе БЧ ракет используются осколочные боевые части (ОБЧ), которые делятся по конфигурации осколочного поля:

3.1. ОБЧ с осевыми полями

Основным преимуществом осевых боевых частей (БЧ) (рис. 5) является прямое суммирование скоростей ракеты и метаемых поражающих элементов (ПЭ), а для ракет наземного действия – большая глубина поражения при подходе к поверхности под малым углом. В последнем случае осевое поле позволяет получить оптимальное согласование плотности рассеивания и координатного закона поражения.

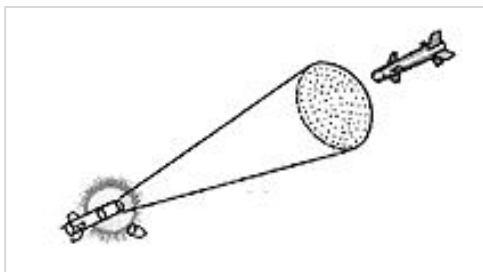


Рис. 5. Распространение ударной волны в ОБЧ с осевыми полями



Рис. 6. Распространение ударной волны стержневой БЧ

Существенным недостатком осевой схемы является необходимость расположения ОБЧ в головной части снаряда или сброса перед подрывом отсека, находящегося впереди ОБЧ, а также необходимость высокой точности наведения на цель.

ОБЧ с осевыми полями малоэффективны против маневрирующих самолетов и скоростных целей.

3.2. Стержневые БЧ

Предназначены для действия по панелям летательных аппаратов. Основным элементом стержневой БЧ (рис.6) является набор стержней квадратного или круглого сечения, уложенных на поверхности заряда, как правило, под небольшим углом к его образующей. Стержни могут быть соединены (сварены) попеременно верхними или нижними концами, либо не иметь связи друг с другом. При подрыве они разлетаются, образуя при связанных стержнях сплошное кольцо, а при не связанных – прерывистое с перекрытием.

Преимущество стержневых ПЭ перед обычными компактными ПЭ заключается в нанесении сплошного разреза обшивки и силового набора, приводящего к разрушению конструкции планера, т.е. поражению воздушной цели по классу "мгновенное разрушение цели в воздухе".

Недостатками являются: невысокая скорость расширения кольца (ее увеличение может привести к преждевременному разрушению кольца), небольшой радиус поражения и недостаточная при действии против некоторых прочных целей режущая способность стержней.

Преимуществом осевого БЧ является эффект кумуляции, с помощью которого удается получать некоторое количество тяжелых осколков, имеющих скорости разлета до 4-5км/с, что несопоставимо больше скорости КР. Преимуществом стержневой БЧ является глубина проникания и скорость разлета, при которой обеспечивается более высокая вероятность поражения цели и выхода ее из строя. Тяжелые осколки в осевой БЧ формируются при углах разлета

10-15°, для стержневой БЧ этот угол составляет 5 – 10°. Тогда при прикрытии ракеты буксируемой ловушкой в задней полусфере невозможно при углах $(180 \pm 7,5)^\circ$ для осевой БЧ и $(180 \pm 5)^\circ$ для стержневых БЧ.

Однако, существуют другие типы БЧ, потенциально представляющие угрозу при углах α отличных от 0° и 180° , которые необходимо учесть при проектировании буксируемой ловушки.

4. Техническая реализация. Буксируемые ловушки служат для защиты КР от атакующей ракеты. Эти ловушки не имеют двигателей и представляют собой активные или пассивные переизлучатели, обладающие большей ЭПР, чем прикрываемая КР.

Буксируемая ловушка может быть захвачена следящей системой ракеты, если ЭПР ловушки больше ЭПР прикрываемой КР. Ловушкой может служить уголковый отражатель, пачка дипольных отражателей или радиотехнический ретранслятор сигнала РЛС.

Продолжительность воздействия сигналов от ловушки на систему самонаведения для импульсных систем определяется временем пребывания ловушки в импульсном объеме, а для непрерывных РЛС – временем пребывания радиальной составляющей относительной скорости ловушки в пределах полосы пропускания следящей системы по скорости, а также временем пребывания в пределах ДНА подавляемой РЛС.

Использование пассивных буксируемых ловушек будет затруднительно, т.к. значение ЭПР прямо пропорционально размерам, что ограничивает количество ловушек, переносимых на КР, и уменьшает ее скорость. Также в РЛС применяют схемы селекции движущихся целей и оптимальную пространственно-частотную обработку сигналов, что исключает воздействие пассивных помех.

Исходя из данных соображений, для прикрытия КР необходимо использовать активную помеху. Структурная схема активной ретрансляционной ловушки показан на рис. 7.

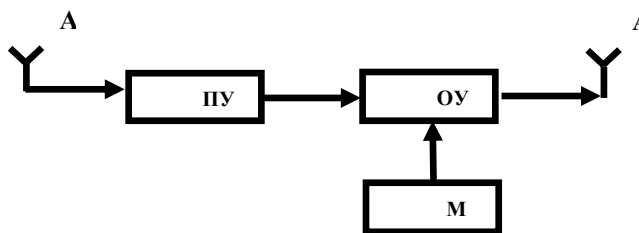


Рис. 7 Структурная схема ретранслятора

Сигналы подавляемых РЛС принимаются антенной A_1 , усиливаются в предварительном усилителе ПУ и поступают на вход оконечного усилителя мощности ОУ. В усилителе мощности сигналы модулируются шумовым напряжением, формируемым модулятором М. Последняя процедура имеет целью обеспечение качества имитации. После соответствующего усиления в оконечном усилителе ОУ сигнал излучается антенной A_2 . В качестве усилителя используются твердотельные широкополосные усилители, имеющие широкую полосу пропускания и высокий КУ.

При противодействии атакующим ракетам с активной или полуактивной головкой самонаведения необходимо включить в схему приемник-обнаружитель с системой оценки опасности приходящего на КР излучения по его параметрам (мощность, длительность и период повторения импульсов и т.д). При обнаружении опасного излучения каковым является излучения радиоэлектронных средств в режимах автосопровождения и наведения ракет, он должен дать команду на применение ловушки.

Для решения этой задачи необходимо реализовать схему сброса ловушки (рис. 8). Часть сигнала от РЛС и головки самонаведения из приемной антенны A_1 , расположенной на борту КР поступает в измеритель параметров сигнала ИПС. При достижении некоторого уровня

сигнала в ИПС пороговое устройство ПУ формирует команду на систему сброса ловушки ССЛ. Принцип работы буксируемой ловушки после сброса идентичен схеме рис.7.

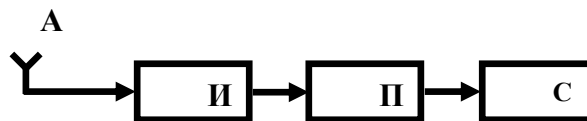


Рис. 8 Структурная схема системы сброса ловушки

5. Выводы. При построении системы защиты КР от средств ПВО противника требуется комплексный подход к ее созданию. Необходимо рассматривать не только характеристики РЛС (разрешение по дальности, углам и скорости), которую обходит КР, но и характеристики атакующих ракет (тип самонаведения, разрешение по углам, скорости, дальности, тип БЧ).

Исходя из вышеперечисленного, алгоритм выбора оптимальных параметров для буксируемой ловушки будет следующим:

1. Оценка ЭПР прикрываемого объекта.
2. Расчет необходимой ЭПР для смещения «энергетического центра» групповой цели в сторону буксируемой ловушки в исследуемом частотном диапазоне.
3. На основе выбора ЭПР ловушки рассчитать оптимальную длину троса с учетом возможностей подавляемой РЛС (возможности разрешения по угловым координатам, дальности, скорости).
4. Оценить ракурсы буксируемой ловушки и ее тип на основе анализа размеров прикрываемой ракеты, дальности буксира и типов БЧ атакуемых ракет, при которых возможно прикрытие.
5. Синтезировать активное ретрансляционное устройство для одного или нескольких частотных диапазонов, способное перенаправлять атакуемую ракету.

Библиографический список

1. *Куприянов А. И., Шустов Л. Н.* Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М.: Вузовская книга, 2011. 800 с.
2. *Привалова Т. Ю., Юханов Ю. В., Семенихина Д. В.* Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. Радиоэлектронная разведка и радиоэлектронное противодействие: учебное пособие. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. 252 с.
3. *Поярков Б., Юрин Ю.* Многофункциональная система оружия «Иджис» // Зарубежное военное обозрение. 1989. №10. С. 53 – 60.
4. *Алексеев Ю.* Американский истребитель-штурмовик F/A-18 «Хорнет» // Зарубежное военное обозрение. 1993. №2. С. 51 – 53.
5. *Белов А.* Боевые части ракет для поражения воздушных целей // Зарубежное военное обозрение. 1987. №2. С. 52 – 54.
6. *Рассоха С. С., Селиванов В. В.* Осколочное действие боеприпасов: учебное пособие / под общ. Ред. В. В. Селиванова. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 209 с.

АВТОРЫ СБОРНИКА

Акапьев В. В.	115	Олехвер А. И.	74
Александров А. С.	6	Отцовский А. Г.	130
Антохин Е. А.	116	Оштук В. В.	91
Апанасенко Н. В.	116	Пантюхина Е. В.	79
Блажевич В. В.	59	Перминов Д. О.	176
Васильков Д. В.	6, 11	Петров М. А.	31
Воробьева Г. А.	15	Потоцкий И. Д.	154
Ву Хан Я. Л.	187, 193	Прейс В. В.	26, 79
Гладков Ю. А.	98	Притчин Д. О.	179
Голикова В. В.	6	Проскуряков Н. Е.	44
Голубев К. С.	21	Разуваева А. С.	181
Денисова М. В.	34	Расулов З. Н.	86
Евсеев А. В.	26	Ремшев Е. Ю.	15, 40, 74
Елесин Д. А.	31	Силаев М. Ю.	15
Ерисов Я. А.	99	Синицын В. А.	116, 121, 128, 138, 144, 148, 154, 160, 164, 167, 172, 187, 193, 196, 203
Ершов Г. А.	121	Синицын Е. А.	121, 148, 160, 196, 203
Еськова Е. А.	15	Сосенушкин Е. Н.	91
Завьялов В. А.	128	Стебунов С. А.	98
Затеруха Е. В.	34, 40	Страхов С. Ю.	140, 206
Зверев И. В.	44	Таянович Е. А.	6
Иваненко П. С.	116	Тепин Н. В.	69
Исляев С. И.	130	Титов А. В.	21
Кадымов В. А.	91	Топилин А. А.	116, 138, 154,
Каратушин С. И.	47	Трусь С. В.	102
Ким А. А.	181	Удовенко Ю. П.	99
Князев С. Н.	69	Филин Д. С.	102, 107
Козлов А. А.	130	Флёров А. Н.	206
Котельников В. Г.	128, 138	Флёрова А. А.	206
Кочин Л. Б.	149	Фридман Л. Б.	187, 193, 196, 203
Кривоносов Е. Е.	144, 154	Фролова Е. О.	113
Криворучко Ю. Т.	121, 148	Храбров В. А.	69
Крылов Ф. П.	154	Храмова Д. А.	47
Кулешова А. В.	51	Цыбра Е. А.	128, 138
Ларкин А. С.	55	Черанёв А. А.	219
Лобов В. А.	40, 113	Чердакова В. С.	11
Мамутов В. С.	59	Шпунькин Н. Ф.	55
Марингос А. А.	121	Щербаков Е. С.	154
Мелешко В. А.	63	Яблоков А. Ю.	160, 164, 167, 172
Митрофанов А. В.	154	Яковлев В. Т.	116, 128, 138, 154
Михайлов Ю. О.	69	Яновская Е. А.	91
Музелин Ю. Н.	148		
Мурсалов Д. Л.	116		
Нестеров Н. И.	51		
Нестерович А. В.	160, 164, 167, 172		

ТРУДЫ ОБЩЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ»

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды первой НПК. СПб: БГТУ «Военмех», 2008. 112 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №1.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды второй НПК. СПб: БГТУ «Военмех», 2009. 166 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №6.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды третьей общероссийской НПК. СПб: БГТУ «Военмех», 2010. 216 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №10.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды четвертой общероссийской НПК. СПб: БГТУ «Военмех», 2012. 180 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №13.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды пятой общероссийской НПК. СПб: БГТУ «Военмех», 2013. 328 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №16.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды шестой общероссийской НПК. СПб: БГТУ «Военмех», 2013. 232 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №19.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды седьмой общероссийской НПК. 19 – 21 ноября 2014 года. СПб: БГТУ «Военмех», 2015. 408 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №23.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды восьмой общероссийской НПК. 19 – 20 ноября 2015 года. СПб: БГТУ «Военмех», 2016. 362 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №30.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды девятой общероссийской НПК. 16 – 18 ноября 2016 года. Том 1. СПб: БГТУ «Военмех», 2017. 382 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №36.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды девятой общероссийской НПК. 16 – 18 ноября 2016 года. Том 2. СПб: БГТУ «Военмех», 2017. 280 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №35.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды десятой общероссийской НПК. 15 – 16 ноября 2017 года. Том 1. СПб: БГТУ «Военмех», 2018. 421 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №42.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды десятой общероссийской НПК. 15 – 16 ноября 2017 года. Том 2. СПб: БГТУ «Военмех», 2018. 290 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №43.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды одиннадцатой общероссийской НПК. 15 – 16 ноября 2018 года. Том 1. СПб: БГТУ «Военмех», 2019. 334 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №53.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды одиннадцатой общероссийской НПК. 15 – 16 ноября 2018 года. Том 2. СПб: БГТУ «Военмех», 2019. 185 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №54.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды двенадцатой общероссийской НПК. 20 – 22 ноября 2019 года. Том 1. СПб: БГТУ «Военмех», 2020. 326 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №62.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды двенадцатой общероссийской НПК. 20 – 22 ноября 2019 года. Том 2. СПб: БГТУ «Военмех», 2020. 228 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №63.

Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды двенадцатой общероссийской НПК. 20 – 22 ноября 2019 года. Том 3. СПб: БГТУ «Военмех», 2020. 338 с. – Библиотека журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №64.

К печати выпуск подготовили:
Д. М. Охочинский, М. Н. Охочинский

Подписано в печать 25.04.2020. Формат 60×84 1/8
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 28,5. Тираж 150 экз. Заказ № 755
Балтийский государственный технический университет «Военмех»
Типография ООО «Издательство ИНФО-ДА»
С.-Петербург, Столярный пер., д. 10/12