

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-64098
от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет» (141070, Московская область, г. Королёв, ул. Гагарина, д. 42)

Издается с сентября 2014 г.

Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:
05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника [05.07.02 Проектирование конструкций и производство летательных аппаратов, 05.07.03 Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов, 05.07.10 Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности], (входит в Перечень ВАК)
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление [05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям), 05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, 05.13.18 Математическое моделирование численные методы и комплексы программ, 05.13.19 Методы и системы защиты информации, информационная безопасность], (не входит в Перечень ВАК)
05.16.00 Металлургия и материаловедение [05.16.06 Порошковая металлургия и композиционные материалы, 05.16.08 Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям), 05.16.09 Материаловедение (по отраслям)] (входит в Перечень ВАК)

Подписной индекс в каталоге
НТИ-Роспечать 62191

Главный редактор
Артюшенко Владимир Михайлович,
д.т.н., профессор

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.
Багдасарян А.А.
Харитонов А.А.

Адрес редакции:
141070, Королёв,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site:www.unitech-mo.ru

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, представленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Аббасов Э.М., Семенов А.Б.
РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ УСТРОЙСТВ СБОРА ДАННЫХ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....3

Афанасьев А.Н., Усачёв Д.В.
ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА ФАКТА ПРИМЕНЕНИЯ ЭКИПАЖЕМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА СРЕДСТВ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО АВАРИЙНОГО ПОКИДАНИЯ В АВИАЦИОННОМ ПРОИСШЕСТВИИ.....10

Бершадский В.А.
СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗА, РАСТВОРЁННОГО В КРИОГЕННОМ ТОПЛИВЕ, ПРИ ИСПЫТАНИЯХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....19

Куссмауль А.Р.
МЕЖДУНАРОДНАЯ КООПЕРАЦИЯ В ИЗОЛЯЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ.....26

Мороз А.П., Прасолов Д.Н.
ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ ОСТАТКАМИ СОВМЕСТНО С ДВОИЧНЫМ КОДОМ...36

Ушакова К.О., Исаев В.Г.
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ МИНИМИЗАЦИИ РИСКОВ.....47

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Акимкина Э.Э.
ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ АДАПТАЦИИ.....58

Артюшенко В.М., Воловач В.И.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СИГНАЛОВ ПО КРИТЕРИЮ ВУДВОРДА В АВИАЦИОННЫХ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ РАДИОСИСТЕМАХ.....69

Воловач В.И.
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ НА УСЛОВИЯ РАЗРЕШЕНИЯ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....82

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. **Барканов Е.Н.**, Dr.sc.ing.
2. **Васильев Н.А.**, д.т.н., профессор
3. **Леоненко Д.В.**, д.ф.-м.н., профессор
4. **Тимофеев А.Н.**, д.т.н., профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
2. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
3. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
4. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
5. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
6. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
7. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
8. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
9. **Смердов А.А.**, д.т.н., профессор
10. **Стрелалюк Ю.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 17.06.2020
Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 11,6
Тираж 500 экз.
Заказ № 82-11

Отпечатано в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп.2

Иванов В.В., Еремина Я.В., Ермолова С.В.
**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
С ЧАСТОТНЫМ И ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ.....96**

Маслобоев А.В.
**ПРОБЛЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ
СИСТЕМ РЕГИОНАЛЬНЫХ СИТУАЦИОННЫХ
ЦЕНТРОВ.....107**

Мороз А.П., Емельянов А.Д.
**ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ
СТРУКТУРИРОВАННОЙ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ
ОТРАСЛИ.....120**

Соляной В.Н.
**ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕДЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ
БОРЬБЫ.....130**

Суркова Л.Е., Давыдов Д.В.
**ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ 3D ПРИНТЕРОВ
И ПУТИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ.....136**

Сухотерин А.И.
**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
СИСТЕМОЙ ИБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА-ВЕЩЕЙ.....143**

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Антипова Т.Н., Волкова В.А.
**ОБОСНОВАНИЕ ФАКТОРОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ
УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ПРОПИТКИ РАСПЛАВАМИ,
ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ КАЧЕСТВО ПОЛУЧАЕМОГО
МАТЕРИАЛА.....150**

Волкова В.А., Волков В.С.
**РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ
МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ИЗГОТОВЛЕНИЯ УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКИХ
КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ ПРОПИТКИ
РАСПЛАВАМИ.....161**

Серёгин Н.Г., Исаев В.Г.
**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ.....172**

Шахназаров К.Ю.
**ЭФФЕКТ «ПАМЯТИ ЖИДКОСТИ» В СТАЛИ,
ЧГУНЕ И СИЛУМИНЕ.....179**

УДК 629.78

Расчет надежности электрорадиоизделий устройств сбора данных телеметрических систем

Э.М. Аббасов, кандидат технических наук, доцент,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область,
А.Б. Семенов, доктор технических наук, профессор,
НИУ Московский государственный строительный университет,
МГСУ, г. Москва

На основе анализа требований по надежности к электрорадиоизделиям устройств сбора данных в телеметрических системах проведена расчетная оценка показателей надежности элементным методом с использованием автоматизированной системы расчета надежности. Исследованы дополнительные возможности автоматизированной системы: разбиение исходных данных на независимые проекты расчета. Расчетная оценка выполнена для экспоненциального закона распределения времени между отказами, стационарного потока отказов и предположения, что отказы являются событиями случайными и независимыми.

Элементная база телеметрических систем, интенсивность отказов, информационно-расчётное обеспечение.

Calculation of the reliability of electrical products of telemetry systems data acquisition devices

E.M. Abbasov, Ph.D. assistant professor,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,
A.B. Semenov, Doctor of Engineering Science, professor,
Moscow State University of Civil Engineering, MGSU, Moscow

Based on an analysis of the reliability requirements for electrical products of data acquisition devices in telemetry systems, a reliability rating is calculated in accordance by the elemental method using an automated reliability calculation system. The additional capabilities of the automated system are investigated: splitting the source data into independent calculation projects. A calculation estimate is made for the exponential law of the distribution of time between failures, the stationary flow of failures, and the assumption that failures are random and independent events.

The elemental base of telemetric systems, failure rate, information and calculation support.

Введение

Одна из важнейших задач телеметрических систем, предназначенных для контроля космических объектов, – восстановление и проверка корректности телеметрических данных [1,2]. Для антенных, измерительных, телеметрических и информационных систем и комплексов производства отечественных предприятий интегрированной структуры, созданных для надежного приема телеметрии и расширения возможностей наземного комплекса управления, разрабатываются на современной электронной базе устройства сбора данных (УСД). УСД предназначено для сбора потоков данных, обмена информацией по двум магистральным последовательным интерфейсам с резервированием, запоминания и последующего воспроизведения принятых данных и массивов, формирования телеметрического кадра для выдачи сообщений в радиопередающее устройство и в проводную наземную линию [3]. В состав УСД входит значительное количество электрорадиоизделий (ЭРИ): резисторы, конденсаторы, фильтры нижних частот. Актуальна оценка показателей надежности ЭРИ, входящих в состав УСД.

Анализ требований к надежности электрорадиоизделий и расчет показателей

Проведен анализ требований по надежности к устройствам УСД:

- вероятность безотказной работы устройства УСД не менее 0,995 за время непрерывной работы 48 часов в условиях эксплуатации;
- ресурс работы устройства УСД не менее 25000 ч.

По условиям эксплуатации устройство УСД относится к классу 5 по ГОСТ РВ20.39.301-98, к группе 5.2 согласно ГОСТ РВ20.39.304-98. По числу уровней качества функционирования устройство УСД относится к виду I по ГОСТ РВ 20.39.301-98.

Расчетная оценка показателей надежности проводится в соответствии с требованиями ГОСТ РВ20.57.304-98 элементарным методом на основании данных справочника «Надежность ЭРИ» 22 ЦНИИИИ МО с использованием автоматизированной системы расчета надежности (АСРН).

В основу расчета положена последовательная структурная схема надежности [4].

Расчетная оценка выполняется при следующих предположениях:

- закон распределения времени между отказами экспоненциальный;
- поток отказов стационарный;
- отказы – события случайные и независимые.

С учетом вышеперечисленных предположений вероятность безотказной работы рассчитывается

$$P(t_{б.р}) = \exp(-\lambda_3 \cdot t),$$

где λ_3 – суммарная эксплуатационная интенсивность отказов полученная в, $t_{б.р}$ – время безотказной работы.

Суммарная эксплуатационная интенсивность отказов устройства УСД XXXXX определяется

$$\lambda_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L \lambda_{б} \cdot K_3 \cdot K_p \cdot K_c \cdot K_{ст}$$

где N – количество типов ЭРИ в рассматриваемом элементе (узле) изде-

лия; L – количество ЭРИ данного типа; $\lambda_{б.р.}$ – базовое значение эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ приведенное из справочника «Надежность ЭРИ»; K_c – коэффициент, учитывающий влияние условий эксплуатации на надежность ЭРИ; K_p – коэффициент режима, учитывающий изменение λ_b в зависимости от электрической нагрузки и температуры окружающей среды; K_c – коэффициент сложности ЭРИ; $K_{ст}$ – коэффициент конструктивно-технологических особенностей ЭРИ.

Расчет показателей надежности проведен с помощью автоматизированной системы расчета надежности (АСРН), которая разработана на базе справочника «Надежность электрорадиоизделий». Дополнительные возможности АСРН: экспорт результатов расчета в форматы HTML (от англ. HyperText Markup Language – «язык гипертекстовой разметки» – стандартизированный язык разметки документов во Всемирной паутине) и RTF (от англ. Rich Text Format – богатый; «формат обогащённого текста»).

Программная оболочка системы АСРН имеет понятную раскладку инструментов для расчета надежности сложных систем. В первую очередь создается новый проект кнопкой «Создать», в появившемся окне задается имя проекта расчета далее перемещаемся в рабочее окно программы АСРН (рисунок 1). Осуществлен расчет проектной надежности УСД с помощью выбранного программного средства.

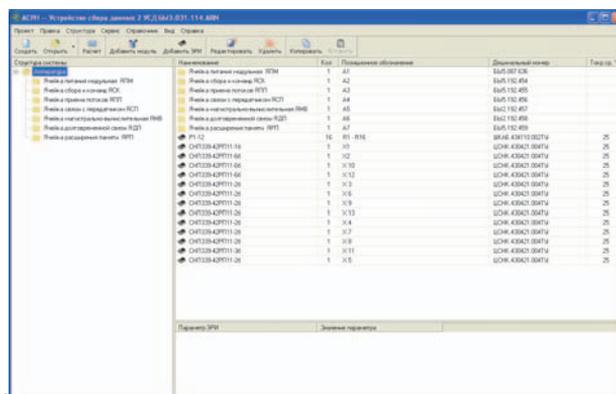


Рисунок 1 – Рабочее окно программы автоматизированной системы расчета надежности

После создания проекта расчета становятся активными следующие операции:

- добавление модуля;
- добавление ЭРИ;
- редактирование выбранного модуля (ЭРИ);
- удаление выбранного модуля (ЭРИ);
- копирование выбранного модуля (ЭРИ);
- расчет надежности выбранного модуля.

В процессе создания проекта расчета в нем формируется корневой узел с названием «Аппаратура», далее как уже описывалось выше в программе можно задать 3 уровня разукрупнения объекта (добавление модуля) включая корневой

узел.

Для того, чтобы добавить ЭРИ, необходимо в дереве структуры выбрать родительский элемент, затем вызвать пункт «Добавить ЭРИ», как показано на рисунке 2.

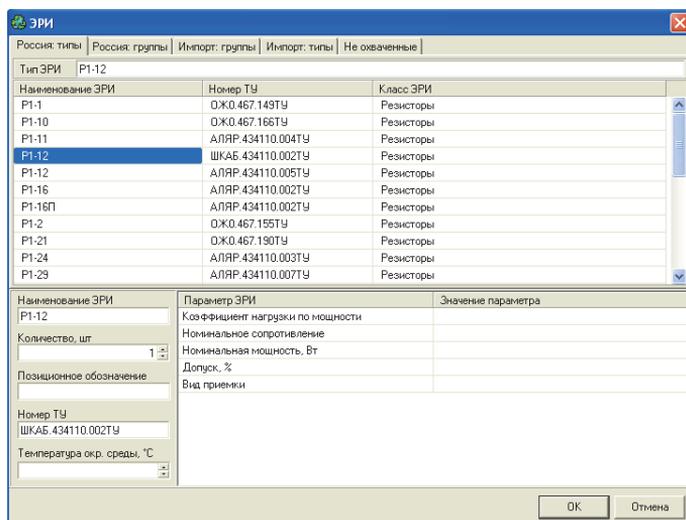


Рисунок 2 – Окно добавления электрорадиоизделия

На экране появится окно, в котором необходимо выбрать тип или группу ЭРИ отечественного или иностранного производства, заполнить параметры ЭРИ. Так же, можно выбрать ЭРИ, не входящие в номенклатуру «Справочника».

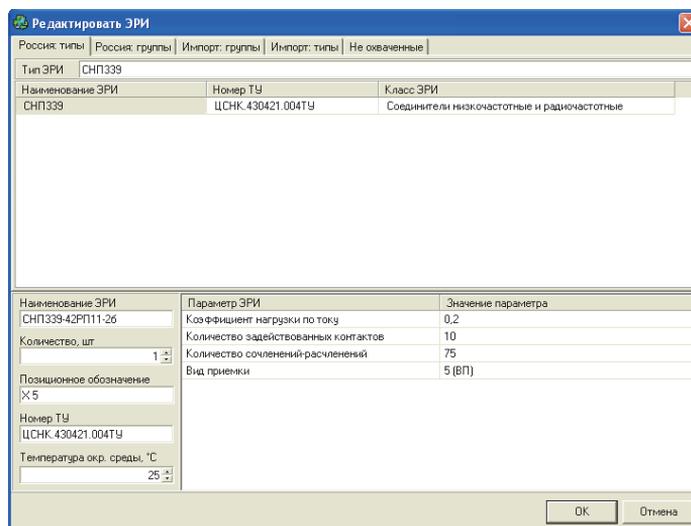


Рисунок 3 – Пример электрорадиоизделия с заполненными параметрами

Верхняя часть окна состоит из 5-ти вкладок, содержащих информацию о добавляемом ЭРИ. Нижняя часть состоит из панели отображения общих параметров ЭРИ (левая часть) и списка параметров ЭРИ, необходимых для расчета надежности.

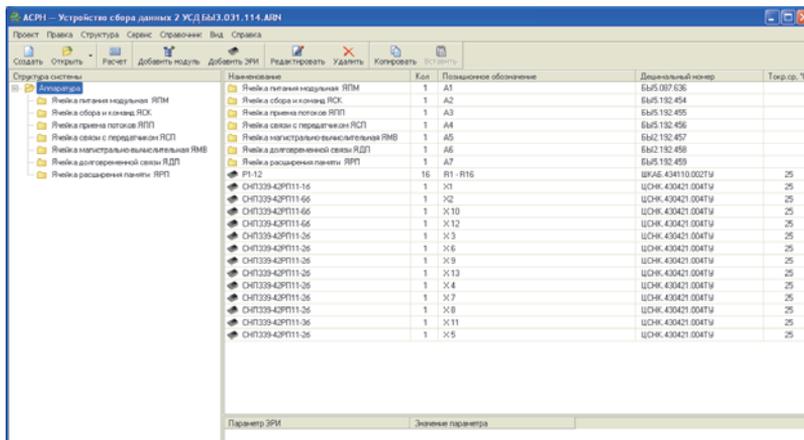


Рисунок 4 – Добавленные электрорадиоизделия в конце списка

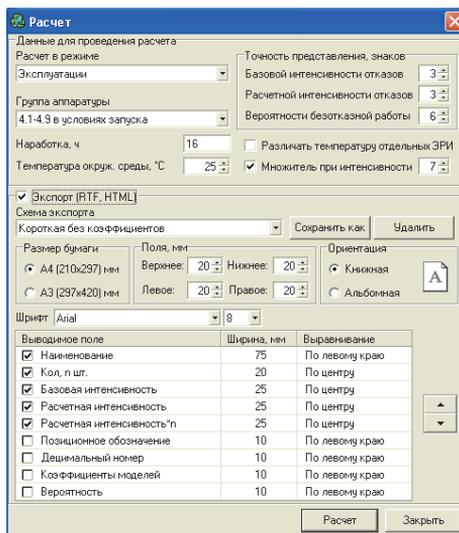


Рисунок 5 – Окно «Расчет»

Наименование	Кол.	Позиционное обозначение	Децимальный номер	Бр 10 ⁷ , 1/ч	Бр 10 ⁶ , 1/ч	Бр 10 ⁵ , 1/ч	РВ	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Аппаратура	1	А6	Б42132.458	-	162,540	162,540	0,9997						
Релей в логическом модуле РЛМ	1	А5	Б42132.457	-	289,720	300,700	0,9994						
Релей в приемном модуле РЛМ	1	А2	Б42132.454	-	94,719	94,719	0,9996						
Релей в сборе и концев. РОК	1	А3	Б42132.455	-	94,719	94,719	0,9996						
Релей в приемном модуле РЛМ	1	А4	Б42132.456	-	94,719	94,719	0,9996						
Релей в цепи с передатчиком РСП	1	А5	Б42132.457	-	94,719	94,719	0,9996						
Релей в магистральной выносной линии РМВ	1	А6	Б42132.458	-	94,719	94,719	0,9996						
Релей в долговременной линии РДП	1	А7	Б42132.459	-	94,719	94,719	0,9996						
Релей в расширенной цепи РРТ	16	РН-12	Б42132.459	-	94,719	94,719	0,9996						
СНТ239-4ЭР111-16	1	X1	СНТ239-4ЭР111-16	0,400	0,337	0,337	0,9999	Kp=0,330	Kp=0,1	Ka=0,3	Ka=15	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-66	1	X2	СНТ239-4ЭР111-66	0,104	0,378	0,378	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,2	Ka=2	Ka=75	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-26	1	X10	СНТ239-4ЭР111-26	0,104	0,505	0,505	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,3	Ka=3	Ka=75	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-66	1	X12	СНТ239-4ЭР111-66	0,104	0,700	0,700	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,5	Ka=5	Ka=75	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-26	1	X3	СНТ239-4ЭР111-26	0,104	0,700	0,700	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,5	Ka=5	Ka=75	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-26	1	X4	СНТ239-4ЭР111-26	0,104	0,809	0,809	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,5	Ka=5	Ka=75	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-26	1	X5	СНТ239-4ЭР111-26	0,104	1,040	1,040	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,5	Ka=5	Ka=75	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-26	1	X9	СНТ239-4ЭР111-26	0,104	0,430	0,430	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,5	Ka=5	Ka=75	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-26	1	X13	СНТ239-4ЭР111-26	0,104	0,300	0,300	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,5	Ka=5	Ka=75	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-26	1	X7	СНТ239-4ЭР111-26	0,104	0,857	0,857	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,5	Ka=5	Ka=75	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-26	1	X8	СНТ239-4ЭР111-26	0,104	0,857	0,857	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,5	Ka=5	Ka=75	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-36	1	X11	СНТ239-4ЭР111-36	0,104	0,857	0,857	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,5	Ka=5	Ka=75	Kp=1	
СНТ239-4ЭР111-26	1	X5	СНТ239-4ЭР111-26	0,104	0,857	0,857	0,9999	Kp=0,470	Ka=0,5	Ka=5	Ka=75	Kp=1	

Рисунок 6 – Дерево рассчитанных значений

Таблица 1 – Показатели надежности электрорадиоизделий устройства сбора данных

Наименование	Кол. п, шт.	$\lambda \cdot 10^7 \cdot n, 1/ч$	Позиционное обозначение	Децимальный номер	Вероятность безотказной работы
Модули					
Ячейка питания модульная ЯПМ	1	116,30743	A1	БЫ...	0,9994419
Ячейка сбора и команд ЯСК	1	59,87864	A2	БЫ....	0,9997126
Ячейка приема потоков ЯПП	1	25,22425	A3	БЫ....	0,9998789
Ячейка связи с передатчиком ЯСП	1	13,66374	A4	БЫ....	0,9999344
Резисторы					
P1-12	16	2,60978	R1 - R16	ШК.YYYY.00 2ТУ	0,9999875
Соединители низкочастотные и радиочастотные					
Наименование	Кол, п шт.	$\lambda \cdot 10^7 \cdot n, 1/ч$	Позиционное обозначение	Децимальный номер	Вероятность
СНП339-42РП11-16	1	0,44960	X1	ЦС. YYYY.004ТУ	0,9999978
СНП339-42РП11-66	1	0,78267	X2	ЦС. YYYY.004ТУ	0,9999962
СНП339-42РП11-66	1	0,53105	X 10	ЦС. YYYY.004ТУ	0,9999975
СНП339-42РП11-66	1	1,16080	X 12	ЦС. YYYY.004ТУ	0,9999944
СНП339-42РП11-26	1	0,93313	X 3	ЦС.430421.00 4ТУ	0,9999955
СНП339-42РП11-26	1	0,93313	X 6	ЦС. YYYY.004ТУ	0,9999955
СНП339-42РП11-26	1	0,93313	X 9	ЦС. YYYY.004ТУ	0,9999955

ЭРИ, не входящие в номенклатуру «Справочника...» вводятся либо из созданной Вами базы данных (фильтрация при вводе), либо заполняется перечень параметров и наименование изделия.

Если все необходимые параметры ЭРИ заполнены, то ЭРИ будет добавлено в выбранный модуль в конец списка (рисунок 3 и рисунок 4).

Если мы добавили все ЭРИ входящие в состав узлов аппаратуры можно перейти во вкладку «Расчет» нажав на одноименную кнопку в рабочем окне программы (рисунок 5).

Возможно отобразить результаты расчета в виде дерева в том случае, если экспорт данных не выбран, как показано на рисунке 6.

Коэффициенты моделей выводятся с точностью до 3-х знаков. Если такой точности недостаточно (значение меньше 0,001) то коэффициенты отображаются в экспоненциальном формате.

Результаты расчета вероятности безотказной работы УСД в условиях эксплуатации, в течение 48 часов непрерывной работы, представлены в таблице 1.

Выведен отчет по проверке в режиме «Эксплуатация» для аппаратуры: устройство сбора данных. Расчетная интенсивность отказов: $323,74895 \cdot 10^{-7}$, [1/ч]. Вероятность безотказной работы 0,9984472.

Вывод

Полученное расчетное значение вероятности безотказной работы устройства сбора данных в режиме эксплуатации за $t_{\text{оп}} = 48$ ч составляет 0,9984472. Принятые схемно-конструктивные решения и выбранная элементная база устройств сбора данных серии БЫ.ХХХХ обеспечивают выполнение требований технического задания в части характеристик надежности электрорадиоизделий, так как удовлетворяет требованиям к надежности элементов ракетно-космической техники.

Литература

1. Аббасова Т.С., Комраков А.А. Восстановление и проверка корректности телеметрических данных // Информационно-технологический Вестник. № 2(04). 2015. С. 55-64.
2. Комраков А.А. Унификация программного обеспечения для декомпозиции телеметрических данных // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 5-3. С. 71-74.
3. Артющенко В.М., Васильев Н.А., Аббасова Т.С. Комплекс полунатурного моделирования систем автоматического управления летательных аппаратов и ракетно-космической техники // Современные образовательные технологии, используемые в очном, заочном и дополнительном образовании / Сборник – Королев МО: Изд-во «Канцлер», Финансово-технологическая академия, ФТА. 2014. С. 17-22 (426 с.).
4. Vibrant Go hale, Gosh S.K., Armband Gupta. Classification of Attacks on Wireless Mobile Ad Hoc Networks and Vehicular Ad Hoc Networks. 196-217 p. Security of Self-Organizing Networks. MANET, WSN, WMN, VANET. CRC Press, 2011. 595 p.

УДК 629.7.047.2

**Оперативная оценка факта применения экипажем
летательного аппарата средств принудительного
аварийного покидания в авиационном происшествии**

А.Н. Афанасьев, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела –
начальник отделения,
Д.В. Усачёв, старший инженер-испытатель,
Войсковая часть 15650-16, г. Щёлково-10, Московская область

В статье проведен анализ основных признаков, позволяющих оперативно оценить факт приведения в действие или обосновать неприменение экипажем средств принудительного аварийного покидания летательного аппарата в авиационном происшествии.

Авиационное происшествие, аварийная обстановка, средство принудительного аварийного покидания, катапультное кресло, ручка катапультирования.

**Rapid assessment of the fact of use by the crew of the aircraft means
of a compulsory emergency evacuation in aviation accident**

A.N. Afanasyev, Ph.D (Tech.), deputy head of department - head of department,
D.V. Usachev, test engineer,
Army part 15650-16, Shchelkovo-10, Moscow region

The article analyzes the main features that allow to quickly assess the fact of actuation or justify the non-use by the crew of means of forced emergency abandonment of the aircraft in an aviation accident.

Aircraft accident, emergency situation, means of forced emergency escape, ejection seat, ejection handle.

Для работы в составе комиссий по расследованию авиационных происшествий (АП) с боевыми летательными аппаратами (ЛА) авиации Вооружённых сил Российской Федерации, оборудованными системами аварийного покидания экипажей, привлекаются специалисты по средствам принудительного аварийного покидания (СПАП) ЛА. Как правило, специалисты по СПАП ЛА участвуют в расследовании АП, в результате которых произошло травмирование или гибель членов экипажа.

В процессе расследования АП специалисты по СПАП ЛА могут оказаться в ситуации, когда множество фактов, технических признаков и обстоятельств не поддаются взаимной увязке. В таких случаях количество версий о причинах травмиррования или гибели лётного экипажа становится значительным, что снижает оперативность установления объективных причин неблагоприятного для лётного экипажа исхода АП, так как требуется всесторонняя проработка всех возможных версий и вариантов срабатывания СПАП ЛА в АП.

Первые признаки, указывающие на применение экипажами ЛА СПАП в аварийной ситуации

Принудительное аварийное покидание экипажем ЛА в аварийной ситуации может производиться путём:

- катапультирования лётчика в кресле катапультной установки (КУ);
- выстреливания лётчика за привязную-подвесную систему с помощью телескопического стреляющего механизма катапультной системы;
- вытягивания лётчика за привязную-подвесную систему с помощью буксирующего реактивного двигателя твёрдого топлива.

Лётчики покидают ЛА через аварийный выход, образующийся путём сброса откидной части фонаря (ОЧФ) или разрушения остекления фонаря. Разрушение остекления фонаря может производиться с помощью специальных отбойников, установленных на катапультном кресле, или же с применением специальной системы разрушения остекления фонаря (СРОФ), основанной на применении детонирующих удлинённых зарядов (ДУЗ). ДУЗ крепятся на внутреннюю поверхность остекления фонаря ЛА, образуя специальный контур. В процессе аварийного покидания ЛА экипажем на ДУЗ поступает электроимпульс и происходит разрушение остекления фонаря вдоль контура прокладки ДУЗ.

При расследовании АП с целью оперативного установления объективных причин гибели или травмирования лётного состава специалист по СПАП ЛА должен сначала ответить на вопрос: применял ли (пытался ли применить) экипаж СПАП в аварийной ситуации? Поэтому, первоочередной задачей для специалиста по СПАП является обнаружение признаков, указывающих на факт приведения в действие экипажем ЛА комплекса СПАП в аварийной ситуации.

Большое значение для оперативного установления факта применения или неприменения экипажем СПАП ЛА в процессе расследования АП имеет тщательный анализ данных о расположении элементов СПАП на месте падения ЛА. Одними из первых характеристик, подлежащих оценке в начале исследования СПАП ЛА, являются удалённость ОЧФ от места расположения основных фрагментов кабины ЛА и его состояние.

Обнаружение фрагментов катапультного кресла в одном месте, а также близость расположения фрагментов кабины ЛА, заголовника кресла, купола парашюта, стабилизирующих штанг кресла, ОЧФ, элементов носимого аварийного запаса (НАЗ) свидетельствуют о том, что разрушение катапультного кресла произошло при его нахождении внутри кабины ЛА. Значительное удаление ОЧФ от места падения ЛА свидетельствует о приведении экипажем комплекса СПАП в аварийной ситуации, о сбросе ОЧФ до столкновения ЛА с поверхностью земли.

На ЛА, оборудованных СРОФ, основными признаками, указывающими на штатное срабатывание системы до начала разрушения ЛА, являются: расположение фрагментов остекления ОЧФ на значительном удалении от её каркаса; наличие следов оплавления на кромках разрушенного остекления фонаря. Следы выглядят в виде побелевшей полосы вдоль кромки остекления (см. рисунок 1).

Штатное срабатывание СРОФ происходит практически одновременно с вытягиванием РК. Поэтому, применительно к указанному на рисунке 1 случаю, наиболее вероятно, что комплекс СПАП ЛА был приведен в действие экипажем

до начала разрушения ЛА.



Рисунок 1 – Фрагмент остекления фонаря кабины самолёта типа Як-130 (стрелкой указаны следы оплавления остекления)

Основными признаками, подтверждающими факт не приведения в действие комплекса СПАП ЛА экипажем в аварийной ситуации, являются обнаружение ручек катапультирования (РК) в исходном, зафиксированном положении. При этом дополнительными признаками, подтверждающими правильность предположения, являются нахождение программного вала механизма управления катапультированием (МУК) в исходном положении (см. рисунок 2) или исходное состояние стопоров, фиксирующих программный вал, поручни РК, корпус РК.



Рисунок 2 – Программный вал МУК (в исходном положении, риски совмещены)

В некоторых типах катапультирных кресел исходное положение РК контролируется с помощью специальных индикаторов. РК может быть зафиксирована в исходном положении с помощью контровочной проволоки (см. рисунки 3, 4).

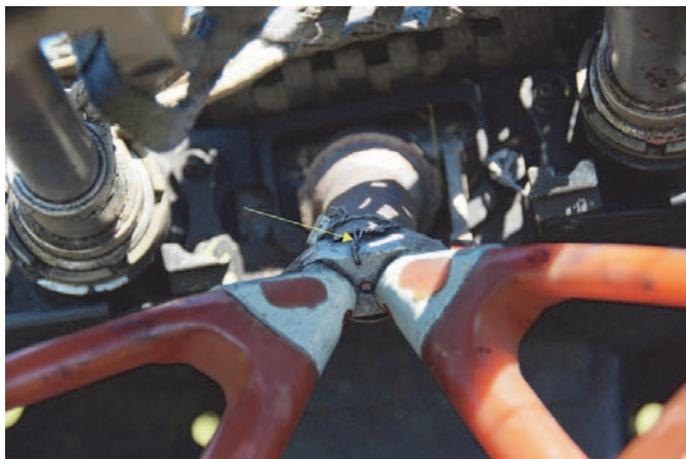
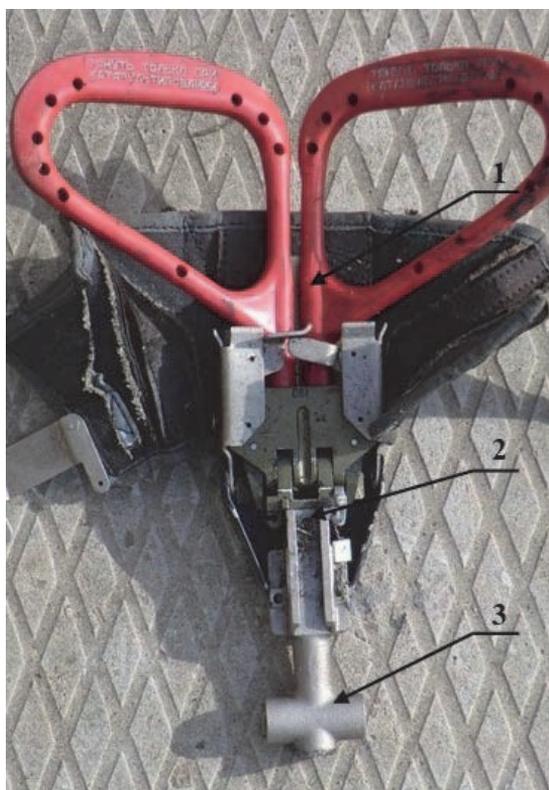


Рисунок 3 – Фиксация РК в исходном положении с помощью контрольной проволоки (указана стрелкой)



1 – ручки РК; 2 – место соединения РК с МУК (законтрено); 3 – часть МУК кресла

Рисунок 4 – РК КУ типа К-36ДМ серии 2

Рекомендации по оперативному установлению факта применения экипажем ЛА СПАП в аварийной ситуации

При обнаружении РК в исходном положении нельзя делать поспешные выводы о неприменении экипажем СПАП в АП, так как возможны случаи, когда

экипаж, приняв решение на катапультирование, не успел вытянуть РК после снятия их со стопора. Поэтому, сначала необходимо обследовать РК на предмет её возможного расстопорения лётчиком в аварийной ситуации.

Наличие на разбросанных фрагментах, принадлежащих одному устройству (механизму) КУ признаков какого-либо одного внешнего воздействия, сопоставимых с определённым положением элементов устройства (механизма), позволяет оценить состояние устройства (механизма) в момент внешнего воздействия на устройство (механизм). Например, если обнаружены ручки РК без следов значительного механического воздействия (см. рисунок 5) и, при этом, обнаружен обрыв троса поручня в месте крепления первого командного шарика, то наиболее вероятно, что разрушение троса РК произошло при нахождении РК в исходном положении, в стакане МУК.



Рисунок 5 – Фрагменты РК КУ типа К-36Л-3,5Я

Вероятнее всего, механическое воздействие осуществлялось на трос с шариком через разрушающийся корпус МУК, так как в данном случае трудно представить разрушение троса вследствие приложения большого механического усилия на сам поручень РК. Указанное позволяет делать предположение, что на момент начала разрушения РК находилась в исходном положении, а значит, КУ в действие не приводилась.

Обнаружение на месте АП РК катапультирных кресел типа ВС-1БРИ самолётов Л-39, находящихся в своих гнёздах (см. рисунок 6) свидетельствует об их исходном положении на момент начала разрушения ЛА, так как снятие РК с гнёзд без обжатия стопоров невозможно.



1 – корпус гнезда; 2 – замок РК; 3 – хомут; 4 – фрагмент поручня РК
Рисунок 6 – Корпусы РК катапультного кресла ВС-1БРИ

Штатное расположение РК в гнезде на чашке катапультного кресла ВС-1БРИ представлено на рисунке 7.



Рисунок 7 – Расположение РК на чашке катапультного кресла типа ВС-1БРИ

Указанное обстоятельство позволяет предположить, что в момент начала разрушения ЛА замки РК были закрыты, СПАП ЛА в действие не приводились.

Поручни РК катапультных кресел типа К-36Д-3,5 имеют возможность отклоняться вперёд от чашки кресла и фиксироваться в данном положении с помощью специальных стопоров. В отклонённое положение поручни РК согласно руководству по технической эксплуатации кресла устанавливаются при экстренной эвакуации летчика из кабины ЛА, а также при проведении работ по техническому обслуживанию ЛА в кабине на земле. На рисунке 8 представлены поручни

РК КУ типа К-36Д-3,5 с основанием, на котором видно шарнирное соединение, предназначенное для обеспечения отклонения РК вперёд.



Рисунок 8 – Поручни РК КУ типа К-36Д-3,5 с основанием, находящимся в отклонённом положении (стрелкой указано место разрушения штока шарнирного соединения)

Как видно на рисунке, основание поручней РК без повреждений. Шарнирное соединение находится в положении, соответствующем отклонённому вперёд от передней стенки чашки кресла. На основании поручней РК находятся фиксирующие стопоры, предназначенные для фиксации поручней РК в одном из двух положений: отклонённое, не отклонённое. На головках фиксирующих стопоров механические повреждения отсутствуют.

В данном случае была произведена проверка возможности свободного хода шарнирного соединения, в результате которой замечаний не выявлено. Анализ приведенных признаков позволил сделать предположение, что поручни катапультирования в процессе развития аварийной ситуации находились в убранном (отклонённом вперёд) положении и летчиком в действие не приводились.

На катапультном кресле типа К-36ДМ РК представляет собой два поручня конструктивно соединённые между собой посредством корпуса шарикового замка (см. рисунок 9).

Шариковый замок позволяет лётчику вытянуть РК из корпуса МУК только после её расстопорения посредством обжатия поручней РК. При этом, цилиндрический корпус шарикового замка РК выходит из цилиндрической полости (стакана), находящейся в верхней части корпуса МУК.

Очевидно, что отделение нерасстопоренной РК от МУК невозможно без деформации внутренней поверхности стакана шарикового замка РК на МУК, а также образования потёртостей и следов скольжения на поверхности шариков самого замка на РК.



**Рисунок 9 – РК и МУК катапультного кресла типа К-36ДМ
(стрелкой указано место вставки РК в МУК)**

Таким образом, если РК и МУК катапультного кресла типа К-36ДМ разбившегося самолёта обнаружены отдельно и на поверхностях шариков замка РК и внутренней поверхности стакана МУК следов, характерных их взаимному механическому воздействию не имеется, то высока вероятность факта расстопорения РК лётчиком до момента начала разрушения катапультного кресла. Наиболее вероятно, что член экипажа успел обжать поручни катапультирования и расстопорить РК до столкновения самолёта с землёй.

Выводы

1 Несвоевременность установления причины неблагоприятного для экипажа ЛА исхода конкретного АП может негативно сказаться на боеготовности и моральном духе всего лётного состава боевой авиации ВС РФ.

2 Рекомендации, выработанные на основе анализа результатов исследований технического состояния фрагментов СПАП ЛА, выполненных в процессе расследований АП за последние годы, призваны повысить оперативность оценки факта приведения в действие или неприменения экипажами боевых ЛА СПАП в аварийной ситуации.

Литература

- 1 Гуськов А.В. Научно-технический отчёт по исследованию средств аварийного покидания самолета Л-39 № 734218 (бортовой № 16) // В/ч 15650. 2018. 19 стр.
- 2 Гуськов А.В. Научно-технический отчёт по исследованию средств аварийного покидания самолета Су-24М2 № 1241639 (бортовой № 39) // В/ч 15650. 2015. 18 стр.

- 3 Афанасьев А.Н. Научно-технический отчёт по исследованию средств принудительного аварийного покидания самолета Су-24М № 0415302 // В/ч 15650. 2006. 17 стр.
- 4 Сосунов М.В. Научно-технический отчёт по исследованию средств аварийного покидания самолета Су-27П № 36911035207 (бортовой № 15) // В/ч 15650. 2016. 30 стр.
- 5 Погребняк С.В., Алфёров М.В. Научно-технический отчёт по исследованию средств аварийного покидания самолёта Як-130 № 13011011002 (бортовой № 32) // В/ч 15650. 2014. 18 стр.
- 6 Сосунов М.В., Ходаков С.В. Научно-технический отчёт по исследованию средств аварийного покидания самолета Л-39 № 533419 (бортовой № 93) // В/ч 15650. 2009. 28 стр.

УДК 629.7.036.54

Способ определения концентрации газа, растворённого в криогенном топливе, при испытаниях ракетных двигателей

В.А. Бершадский, доктор технических наук, профессор кафедры
«Техника и технологии»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Приведено обоснование необходимости определения концентрации растворённого газа в результате анализа представленной пробы раствора при испытаниях жидкостных ракетных двигателей на криогенных компонентах топлива. Изложены основные особенности способа, разработанного для оперативного определения концентрации гелия в жидком водороде. Приведены сведения о практическом использовании разработанного способа при экспериментальном определении характеристик агрегатов подачи жидкого водорода в двигатель.

Криогенные компоненты топлива, неконденсируемый газ, имитация эксплуатационных условий, испытания двигателей, абсорбция и десорбция газа, газ гелий, жидкий водород, концентрация газа в растворе.

Method for determining the concentration of gas dissolved In cryogenic fuel during tests of rocket engines

V.A. Bershadskiy, doctor of Technical Sciences, Professor
Department of technical and technology,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article substantiates the need to determine the concentration of dissolved gas as a result of analysis of the presented sample of the solution during tests of liquid rocket engines on cryogenic fuel components. The main features of the method developed for the rapid determination of the concentration of helium in liquid hydrogen are described. Information is given about the practical use of the developed method in the experimental determination of the characteristics of liquid hydrogen supply units in the engine.

Cryogenic fuel components, non-condensable gas, simulation of operating conditions, engine tests, gas absorption and desorption, helium gas, liquid hydrogen, gas concentration in solution.

Обоснование необходимости разработки способа

Растворение неконденсируемого газа в компонентах топлива (абсорбция) и его выделение из жидкой фазы (десорбция) являются частью термодинамических процессов, происходящих в элементах систем топливоподачи жидкостных

ракетных двигательных установок (ДУ) [3].

Образование двухфазного потока при десорбции растворённого газа, связанной с изменениями давления и температуры в потоке компонента топлива, оказывает отрицательное влияние на работоспособность агрегатов ЖРД и в ряде случаев приводит к их отказам в работе [2,7].

Для подтверждения надёжного функционирования ДУ в условиях полёта при стендовой экспериментальной отработке ЖРД предусмотрена имитация различных вариантов эксплуатационных факторов [6, 8], в том числе и имитация газосодержания в компонентах топлива. Имитация эксплуатационных условий приближает функционирование ЖРД при наземной отработке к режимам работы в полёте.

Технология имитации газосодержания при испытаниях предусматривает обязательное выполнение следующих операций:

- расчётное прогнозирование процессов абсорбции и десорбции газа с образованием двухфазного потока в системе топливоподдачи ЖРД при режимах натурной эксплуатации ДУ;
- приготовление раствора в расходном баке испытательного стенда после наполнения его компонентом топлива;
- оперативное, дистанционное определение концентрации газа в растворе перед запуском двигателя;
- поддержание необходимой величины концентрации газа в растворе в течение времени функционирования двигателя на проводимом стендовом испытании.

В настоящей статье рассмотрен вопрос об определении концентрации неконденсируемого газа в криогенных компонентах топлива (ККТ) в первую очередь гелия в жидком водороде. Важность рассмотрения этого вопроса применительно к ККТ жидкий водород связана с большой растворимостью газообразного гелия в жидком водороде. Она в 17 раз превышает растворимость гелия в жидком кислороде, что вызывает опасность кавитации из-за образования двухфазного потока при десорбции газа и срыва в работе топливных насосов в условиях эксплуатации двигателя.

Например, в работе [4] было показано, что десорбция гелия, растворённого в жидком водороде, приводит к образованию двухфазного потока, при котором величина критического объёмного содержания газовой фазы на входе в насос (при предельно допустимом уменьшении его напора) в 3 раза меньше, чем при парообразовании в чистом жидком водороде. Это обуславливает необходимость подтверждения безотказного функционирования водородных насосов при величине объёмного содержания газопаровой фазы в потоке жидкого водорода, ожидаемого для режимов полёта.

Следует обратить внимание на то, что в общем случае растворы газов в компонентах топлива являются разбавленными и в соответствии с законом Рауля считаются идеальными растворами [9]. Согласно закону Генри концентрация газа в идеальном растворе теоретически может быть рассчитана по зависимости вида

$$n_{гж} = p_{г} / K, \quad (1)$$

где $n_{гж}$ – мольная концентрация газа в жидком растворителе, $p_{г}$ – парциальное давление газа над раствором, соответствующее состоянию насыщения растворителя газом, K – коэффициент, характеризующий растворимость газа в конкретном растворителе.

Наиболее продвинутым способом экспериментального определения концентрации раствора считается хроматографический метод анализа [1]. Этот способ позволяет напрямую определить величину концентрации газа в растворе в результате: отбора пробы из раствора и её газификации, разделения смеси на составляющие и определения их теплопроводности, использования предварительно осуществлённых градуировок детектора.

Однако, опыт применения хроматографического анализа к определению концентрации гелия в жидком водороде [4] показал недостаточную эффективность этого метода из-за следующих обстоятельств:

- дистанционный отбор пробы происходит с уменьшением давления и повышением температуры, что приводит к преждевременному выделению гелия из раствора и делает отобранную пробу непредставительной;
- детектор состава газифицированной смеси из-за близких величин коэффициентов теплопроводности гелия и водорода различает эти газы с большой погрешностью;
- оперативность определения концентрации газа в растворе не обеспечивается в виду необходимости проведения трудоёмких операций по расшифровке графических изображений состава смеси газов, полученных с помощью детектора.

Указанные обстоятельства привели к необходимости самостоятельной разработки способа, информация об особенностях применения которого не была опубликована.

Особенности и результаты разработки способа оперативного определения концентрации растворённого газа

На первом этапе разработки были рассмотрены справочные данные по равновесному составу газовой и жидкой фаз системы газообразный гелий – жидкий водород, приведенные в работе [10]. В результате анализа равновесного состава этой системы в области значений температуры от 16 до 26 К и давления ≤ 1 МПа, характерных для режимов проведения испытаний ЖРД, были сформированы расчётные зависимости вида

$$p_{г} = p - p_{s}; \quad (2)$$

$$K = 1,945 \cdot \exp(68,54 / T_{ж}); \quad (3)$$

$$\rho_{гж} = p_{г} \cdot \mu_{г} \cdot \rho_{ж} / (K \cdot \mu_{ж}); \quad (4)$$

где p и $T_{ж}$ – измеренные значения давления газа над раствором (МПа) и температуры жидкого раствора (К); $p_{г}$ и p_{s} – парциальные значения давления газа и пара жидкости (МПа), величины которых соответствуют состояниям насыщения жидкости газом и насыщения чистой жидкости при температуре $T_{ж}$; $\mu_{г}$ и $\mu_{ж}$ – молекулярная масса газа и жидкости (кг); K – коэффициент растворимости (МПа); $\rho_{ж}$ –

плотность жидкости (кг/м^3); $\rho_{\text{гж}}$ – массовая концентрация газа, растворённого в объёме жидкости (кг/м^3).

Зависимости (2)-(4) были применены для оперативного определения концентрации растворённого газа.

Возможность применения эмпирической зависимости (3), полученной при анализе данных работы [10], подтверждена сопоставлением результатов расчёта с экспериментальными данными, что показано на рисунке 1. Среднеквадратичная погрешность определения величины K в диапазоне параметров, указанных на рисунке 1, не превышает 3%.

Разработка способа оперативного определения концентрации гелия в жидком водороде являлась одним из результатов исследований характера и интенсивности изменений параметров термодинамических процессов абсорбции и десорбции неконденсируемого газа в криогенных компонентах топлива применительно к экспериментальной отработке систем топливоподдачи кислородно-водородных ЖРД и их агрегатов [4].

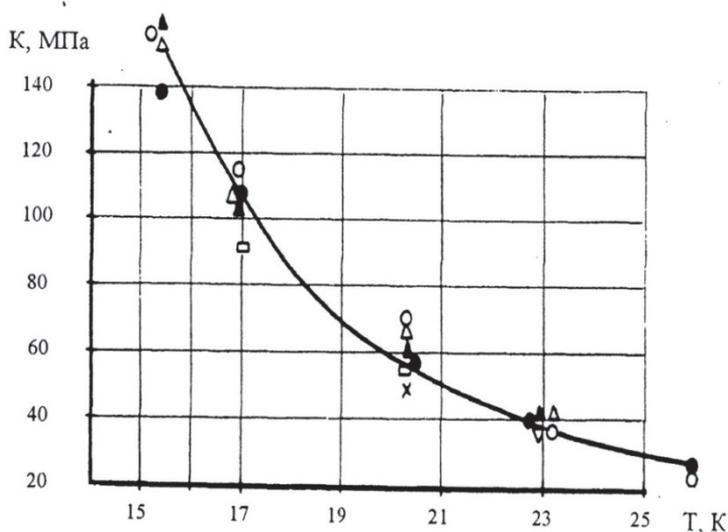


Рисунок 1 – Сопоставление результатов расчёта по зависимости (3) с экспериментальными данными

В результате указанных исследований были разработаны, защищены шестью авторскими свидетельствами на изобретения и апробированы различные способы. На основе проведенного анализа этих разработок для практического применения определения концентрации газообразного гелия в жидком водороде был выбран способ (Авторское свидетельство на изобретение СССР № 151598 от 06.11.80), принцип действия которого и реализованное устройство кратко пояснены с помощью рисунков 2 и 3.

Устройство представляет собой емкость 2, погружённую в ККТ в расходном баке стенда и оснащённую клапанами отбора пробы 3 и 4 и клапаном дренажа 5 (рис. 2). Ёмкость 2 должна быть погружена в ККТ для анализа представительной пробы, находящейся при температуре раствора и парциального давления

растворённого газа.

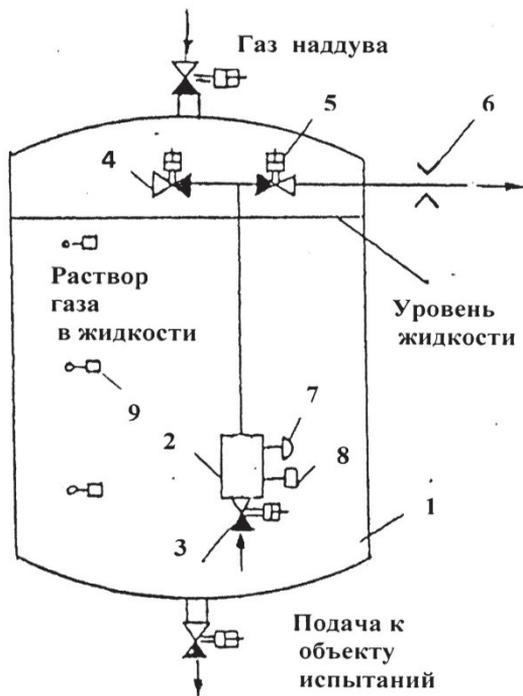


Рисунок 2 – Устройство для оперативного проведения анализа

После завершения операции растворения гелия в жидком водороде при поддержании необходимого давления гелия в газовом объёме бака 1 для определения концентрации газа в растворе производят отбор пробы в предварительно откакумированную емкость 2 при открытых клапанах 3 и 4 и закрытом клапане 5.

После отбора пробы клапаны 3 и 4 закрывают и производят плавное уменьшение давления в ёмкости 2 через клапан 5. С момента времени t_2 начинается десорбция газа из раствора в пробе при расходе газовой фазы через дозирующее устройство 6. При этом реализуется термодинамический процесс десорбции с изменением давления p , температуры $T_{ж}$ и сплошности среды $C_{ж}$ в ёмкости малого объёма с отобранной пробой. Характер изменений параметров процесса в пробе качественно отражает рисунок 3. Изменения величин параметров в пробе фиксируют средства измерений давления и температуры 7 и 8.

Принцип действия способа основан на косвенном определении величины $\rho_{гж}$ – массовой концентрации газа в растворе по результатам прямых измерений p и $T_{ж}$ – параметров состояния жидкого раствора при десорбции газа в представительной пробе, которая находится при температуре и давлении приготовленного жидкого раствора перед измерениями параметров её термодинамического состояния в процессе десорбции.

Начало десорбции газа в пробе раствора в течение времени от t_2 до t_3 характеризуется неизменной величиной давления, соответствующий состоянию

газонасыщения при $p_r = p - p_s$. Изменения давления p и температуры $T_{ж}$, определённые в этот момент времени, являются экспериментальными величинами для автоматического расчётного определения $\rho_{гж}$ с использованием зависимостей (2)-(4).

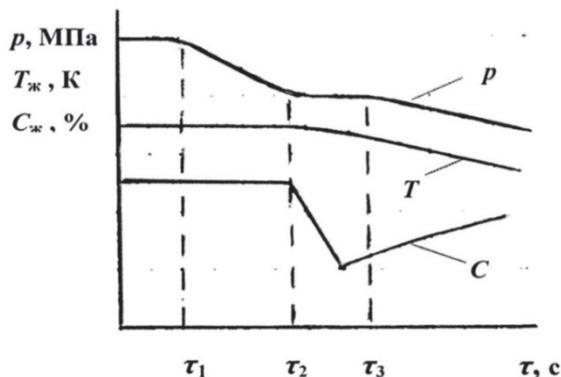


Рисунок 3 – Характер изменений параметров при реализации процесса десорбции

По информации, полученной в результате практического применения этого способа, было установлено, что в диапазоне значений $\rho_{гж} = 0,13 - 0,52$ кг/м³ относительная погрешность оперативного определения этой величины составляет ≤ 15 % при $T_{ж} = 20,4$ К. и скорости уменьшения давления в ёмкости с отобранной пробой $\leq 0,02$ (МПа / с).

Следует обратить внимание на то, что с увеличением концентрации газа в растворе по сравнению с указанным диапазоном в связи с существенным увеличением p_r или уменьшением $T_{ж}$ величина относительной погрешности может возрасти из-за проявления не идеальности раствора гелия в жидком водороде.

Не идеальность раствора, установленная в период проведения исследований, проявляется в увеличении $p_s = f(T_{ж})$ по сравнению с величинами, указанными в существующей технической литературе по свойствам жидкого водорода. Можно предположить, что это явление обусловлено ослаблением межмолекулярных связей при увеличении концентрации гелия в жидком водороде.

Разработанный способ применялся на этапе автономной обработки агрегатов ЖРД. Например в работе [5] приведены кавитационные характеристики насосов ТНА, полученные при испытаниях с имитацией содержания гелия в жидком водороде для определения условий безотказного функционирования двигателей РД0120 и КВД1.

Заключение

При экспериментальном исследовании процессов абсорбции и десорбции неконденсируемого газа в криогенном топливе для испытаний ЖРД с имитацией эксплуатационных условий разработан способ оперативного определения концентрации газа в растворе.

Разработанный способ основан на косвенном определении массовой концентрации гелия в жидком водороде с использованием измерений параметров термодинамического состояния раствора в представительной пробе, изменяю-

щихся в процессе десорбции газа.

Возможность практического применения разработанного способа подтверждена на этапе автономной отработки агрегатов ЖРД при определении кавитационных характеристик насосов ТНА двигателей РД0120 и КВД1 с имитацией эксплуатационных условий в части содержания гелия в жидком водороде.

Литература

1. Авдеева А.А. Хроматография в энергетике // М: Энергия. 1980. 272 с.
2. Бершадский В.А. Влияние свойств газовой фазы в газожидкостном потоке на энергетические, кавитационные и динамические характеристики лопастных насосов / Артюхов Ю.А., Бершадский В.А., Петров В.И. // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 3. С.120-125.
3. Бершадский В.А., Соколов Б.А., Туманин Е.Н. Результаты исследований интенсивности растворения неконденсируемого газа в жидких компонентах топлива двигательных установок // Космическая техника и технологии. 2019. № 1. С. 50-57.
4. Бершадский В.А. Моделирование условий эксплуатации водородно-кислородных ЖРД на компонентах топлива с растворённым газом при стендовой отработке: диссертация...канд.технич.наук: 05.07.05 / НИИХМ. Загорск. 1984. 192 с.
5. Бершадский В.А. Методика имитации газосодержания в жидком водороде при стендовых испытаниях двигателей // Космонавтика: международный научный журнал. 2012. № 3-4. С.92-99.
6. Бершадский В.А., Коломенцев А.И. Основы технологии стендовых испытаний двигательных установок жидкостных ракет. Автономная отработка // М: Изд-во МАИ. 2014. 214 с.
7. Венгерский Э.В., Морозов В.А., Усов Г.Л. Гидродинамика двухфазных потоков в системе питания энергетических установок // М: Машиностроение. 1982. 128 с.
8. Жуковский А.Е., Кондрусев В.С., Окорочков В.В. Испытания жидкостных ракетных двигателей: учебник // М: Машиностроение. 1992. 352 с.
9. Кириллин В.А., Шейндлин А.Е., Шпильрайн Э.Э. Термодинамика растворов // М: Энергия. 1980. 83 с.
10. Свойства жидкого и твёрдого водорода: справочник / Есельсон Б.Н., Благой Ю.П., Григорьев В.Н. [и др.] // М: Изд-во стандартов. 1969. 134 с.

УДК 613.693+612.084+57.04

Международная кооперация в изоляционных исследованиях

А.Р. Куссмауль, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Государственный научный центр Российской Федерации –
Институт медико-биологических проблем Российской академии наук
(ГНЦ РФ-ИМБП РАН), г. Москва

Изоляционные эксперименты, предоставляющие возможность изучения действия факторов космического полета на организм и отработки технологий для использования на борту космических кораблей, космических и напланетных станций, также являются платформой для эффективной международной кооперации. Координация усилий приводит к взаимообогащению сторон (знания, опыт, технические, финансовые и методические возможности сторон) и дает возможность повысить эффективность проводимых исследований. Такое сотрудничество позволит обеспечить жизнедеятельность человека в дальних космических полетах и сделать возможной широкую коммерциализацию космических технологий.

Изоляционные исследования, международное сотрудничество, пилотируемое освоение дальнего космоса.

International cooperation in isolation studies

A.R. Kussmaul, Ph.D., Senior Researcher,
Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
(IBMP RAS), Moscow

Isolation experiments providing an opportunity to study the effects of space flight factors on human body and to develop technologies for use on board spacecraft, space and planetary stations serve also as a platform for international cooperation. Coordination of efforts leads to mutual enrichment (knowledge, experience, technical, financial and methodological capabilities of parties) and increase the effectiveness of research. Such cooperation will ensure the human life being in long-distance space flights and widespread commercialization of space technology.

Isolation studies, international cooperation, human deep space exploration.

Наземные изоляционные эксперименты предоставляют уникальную возможность не только изучить действие ряда негативных факторов космического полета на организм с целью разработки средств и методов профилактики такого воздействия, но и отработать передовые космические технологии для дальнейшего использования на борту космических кораблей, космических и напланетных станций. Во время таких экспериментов можно протестировать как научную, так и медицинскую аппаратуру, в том числе в ходе одновременного исполь-

зования, а также осуществить опосредованную оценку эргономических свойств гермопомещений, например, кают космических кораблей, и используемой в них аппаратуры. В процессе подготовки и проведения исследований также формируются и отрабатываются на практике механизмы взаимодействия различных организаций, участвующих в проекте. Эти организации могут представлять не только страну, на территории которой проводится эксперимент, но и другие государства. Таким образом, изоляционные исследования служат, в том числе, платформой для эффективной реализации международной кооперации, являющейся необходимым условием успешного проведения крупнейших космических проектов.

Институт медико-биологических проблем (ИМБП) на протяжении многих лет реализует международные изоляционные проекты. В качестве партнеров и участников в них выступают как космические агентства, так и научные учреждения, коммерческие компании и другие организации стран всего мира.

Большинство таких исследований проводится в наземном экспериментальном комплексе (НЭК) (рис. 1). Комплекс был создан по техническому заданию, утвержденному С.П. Королевым в 1964 году, введен в эксплуатацию в 1970 году и в дальнейшем модернизирован с учетом расширения спектра исследуемых проблем [5, С.499, С.508-509].

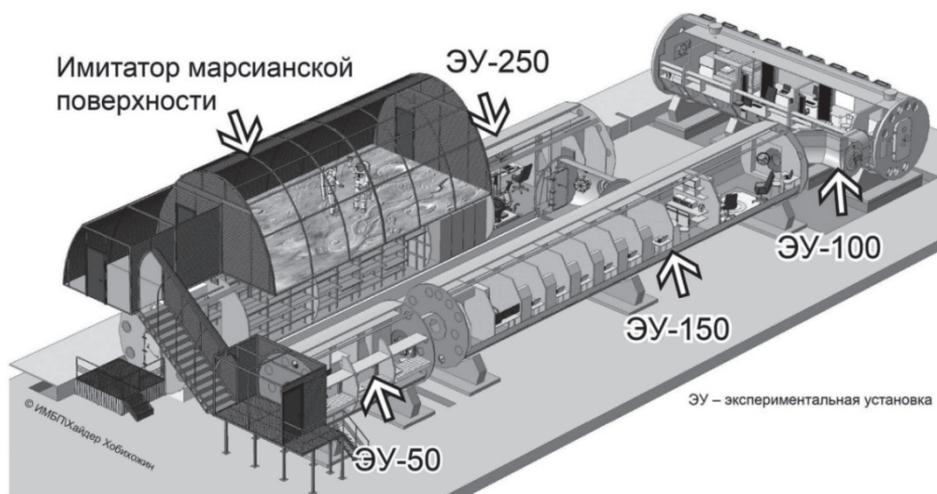


Рисунок 1 – Общий вид наземного медико-технического экспериментального комплекса

По главным целям, которые организаторы ставят в ходе их проведения, изоляционные проекты могут быть разделены на несколько основных групп:

1) исследования, которые служат контролем к будущему реальному полету, условия которого известны заранее и максимально повторяются на Земле (например, проект HUBES-94);

2) эксперименты, направленные на углубленное изучение одного или нескольких факторов космического полета, зачастую новых (например, SFINCSS-99);

3) исследования, моделирующие принципиально новый тип космических миссий (например, «Марс-500») [9, С.7].

Некоторыми исследователями в отдельную группу выделяют технологические испытания перспективных систем жизнеобеспечения, направленные на тестирование новой аппаратуры и технологий [8, С.61], однако такие испытания могут быть также частью любого из вышеперечисленных типов изоляционного проекта.

Один из первых международных изоляционных проектов – HUBES-94 (Human Behaviour in Extended Spaceflight, «Поведение человека в длительном космическом полете») – был проведен в 1994-1995 гг. в рамках соглашения с Европейским космическим агентством (ESA). Этот эксперимент послужил одним из этапов подготовки реального полета европейского астронавта (программа EURO-MIR-95). Максимально близко к реальности были смоделированы условия жизни и профессиональной деятельности члена экипажа длительного космического полета (длительность полета, научная программа, циклограмма, используемая система профилактики, реализация гигиенических процедур, состав атмосферы в гермообъекте). Для научной программы специалисты ESA отобрали на конкурсной основе 31 научную заявку, представленную научными коллективами из Германии, Великобритании, Италии, Голландии, Норвегии, России, США, Франции, Чехии, Швейцарии. Эксперимент позволил получить уникальный опыт постановки совместных международных наземных исследований, обработки и анализа массива различных данных, кроме того, были широко задействованы перспективные на тот момент компьютерные технологии и программное обеспечение, а также средства связи [5, С.501-503].

В проекте «ЭКОПСИ-95» («Экология и психология») с 90-суточной изоляцией, проведенном в 1995-1996 гг., исследовали, как влияют биологические объекты (растения) на формирование замкнутой среды обитания на космических аппаратах. Более того, растения рассматривались как средства повышения психофизиологической комфортности длительного пребывания в условиях изоляции. Одной из ключевых составляющих проекта было проведение эксперимента «Оранжерея». Аппаратура для него была разработана совместно ИМБП и Институтом космических исследований Болгарской академии наук, с ее помощью предполагалось изучать рост растений в космосе. В рамках проекта были получены данные для разработки будущих перспективных систем жизнеобеспечения с использованием растений, они использовались в дальнейшем при создании экспериментальных оранжерейных установок для космических полетов [5, С.503-504].

Значимой вехой в истории международного сотрудничества в наземных исследованиях стал эксперимент SCFINCSS-99 (Simulation of Flight of International Crew on Space Station, «Имитация полета международного экипажа на космической станции»), проведенный в 1999-2000 гг. В ходе проекта моделировали условия функционирования Международной космической станции и оценивали, как влияет длительная изоляция в замкнутом объеме на взаимодействия внутри международных экипажей, неоднородных как по национальному, так и по гендерному составу. Всего в эксперименте в качестве членов экипажей (испытателей-добровольцев) приняли участие 21 человек из России, Японии, Германии,

Канады, Франции. Циклограмма деятельности основных групп, участвующих в эксперименте, была аналогичной орбитальной станции «Мир». Программа проекта включала 80 научных экспериментов, представленных научными коллективами из России, Японии, Канады, Германии, США, Норвегии, Швеции, Чехии, Австрии [9, С.22-23]. На основе полученных данных был сформулирован ряд организационных и методических рекомендаций по отбору и подготовке экипажей, управляющих структур, обслуживающего персонала, а также многим другим аспектам подготовки и проведения экспериментов, которые должны учитываться как при проведении изоляционных исследований, так и при взаимодействии в рамках международных проектов в космосе [9, С.5-20, 575-581].

Результаты этих проектов, в первую очередь, были важны для совершенствования медико-биологического и психологического обеспечения длительных космических полетов, но помимо этого был накоплен уникальный опыт по осуществлению международного сотрудничества в совместных научных проектах. В трех описываемых выше экспериментах было проведено 140 научных исследований, из них 50 выполнялось зарубежными учеными. Стоит упомянуть, что затраты российской стороны не превысили 10% от общих затрат на осуществление этих работ [8, С.61, 5, С.507].

Один из наиболее масштабных изоляционных проектов – проект «МАРС-500» по имитации пилотируемого полета на Марс, реализованный в 2007-2011 гг. В качестве партнеров проекта выступили Европейское космическое агентство (ESA), Китайский центр подготовки космонавтов (КЦПК), Немецкий аэрокосмический центр (DLR), Итальянское космическое агентство (ASI), Малазийское космическое агентство (ANGKASA), научно-исследовательские и коммерческие организации из Южной Кореи, Италии, Германии, Австрии, Испании, США, Республики Беларусь, Республики Казахстан. Некоторые российские эксперименты в рамках проекта проводились при участии специалистов из Венгрии и Чехии [10, С.516].

В ходе эксперимента изучали, как осуществляется взаимодействие в контуре «человек – окружающая среда», а также как изоляция в условиях, моделирующих длительный марсианский полет, влияет на состояние здоровья и работоспособность членов экипажа [6, С.4, 7, С.5].

Программа проекта состояла из несколько этапов – 14-суточной, 105-суточной и 520-суточную изоляции. На этапе 105-суточной изоляции в эксперименте участвовали кандидаты, отобранные для участия ESA, – гражданин Франции и гражданин Германии, в 520-суточной миссии кроме представителей ESA (гражданина Франции и гражданина Италии) в состав экипажа вошел кандидат от КЦПК (гражданин Китая) (рис. 2).

Распределение научных экспериментов в изоляциях проекта представлено в таблице 1 [1, С.8, 2, С.15].

Успешное проведение длительных международных изоляционных исследований на протяжении более 25 лет позволило разработать совместный международный проект SIRIUS (Scientific International Research In Unique terrestrial Station, «Международное научное исследование в уникальном наземном комплексе»). Проект реализуется ИМБП под эгидой Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» совместно с Программой исследований

человека Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (HRP NASA) при взаимодействии с ФГБУ «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина» и ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева».



Рисунок 2 – Экипаж 520-суточной изоляции проекта «Марс-500» (слева направо, сверху вниз): Сухроб Камолов (Россия), Romain Charles (Франция), Александр Смолевский (Россия), Wang Yue (Китай), Алексей Ситев (Россия), Diego Urbina (Италия)

Как и в проекте «Марс-500», программа проекта SIRIUS состоит из нескольких изоляционных экспериментов, длительность которых постепенно увеличивается (от 17 до 365 суток). Эксперимент моделирует значимые события, возникающие в ходе длительного пребывания членов экипажа на космической станции, а также при высадке на планету, и направлен на разработку рекомендаций по профилактике и решению психологических и физиологических проблем будущих длительных и сверхдлительных космических полетов [3, С.4-5, 4, С.4-5].

К настоящему моменту завершены эксперименты с 17- и 120-суточной изоляцией, запланировано проведение 240- и 365-суточной изоляции. Предполагается провести несколько годовых изоляций в случае успешной реализации предыдущих этапов проекта.

В экспериментах с 17- и 120-суточной изоляцией принимали участие иностранные члены экипажа: в 17-суточной – гражданин Германии, в 120-

суточной – два гражданина США (рис. 3).

Таблица 1 – Исследования, проводимые во время проектов «Марс-500» и SIRIUS

Примечание: РП – российский проект, ИП – иностранный проект

Направление	«Марс-500»				SIRIUS			
	105 суток		520 суток		17 суток		120 суток	
	Кол-во РП	Кол-во ИП	Кол-во РП	Кол-во ИП	Кол-во РП	Кол-во ИП	Кол-во РП	Кол-во ИП
Физиология	12	6	17	9	14	2	15	9
Психология и психофизиология	11	11	16	10	2	4	9	13
Биохимия, иммунология, биология/ Иммуни-тет и метаболизм	16	4	24	10	11	-	13	1
Микробиология и санитарно-гигиенические исследования	4	1	7	1	3	-	7	2
Операционно-технологические эксперименты	7	1	10	1	-	-	5	3
Телемедицина	-	-	-	-	2	-	2	-
Комплексные исследования	-	-	-	-	2	4	-	-
Всего	50	23	74	31	34	10	51	28

Количество экспериментов с участием иностранных специалистов в проекте увеличивается с каждой следующей изоляцией (см. табл. 1) [3, С.19-22, 4, С.24-26].

Если в 17-суточной изоляции большую часть таких экспериментов представляли исследования основного партнера по проекту – NASA, то в 120-суточной приняли участие специалисты, научные организации и компании из Италии, Бельгии, Германии, Франции и др. В настоящий момент формируется научная программа следующей (8-месячной) изоляции, помимо участвующих ранее стран получены заявки от ОАЭ, Японии, Австралии, Канады и ряда других стран.



Рисунок 3 – Экипаж 120-суточной изоляции проекта SIRIUS (слева направо, сверху вниз): Евгений Тарелкин (Россия), Дарья Жидова (Россия), Анастасия Степанова (Россия), Стефания Федяй (Россия), Allen Mirkadyrov (США), Reinhold Povilaitis (США)

В целях предотвращения дублирования исследований, оптимизации работы, а также уменьшения трудозатрат испытателей при подготовке таких проектов группами российских и зарубежных ученых разработаны научные соглашения, позволяющие проводить интеграцию сходных научных программ и заявок. Стороны согласуют перечни определяемых параметров и сроки обследования испытателей-добровольцев.

Многие иностранные компании принимают участие в таких проектах не в качестве исследователей, а в качестве партнеров или спонсоров, предоставляя материально-техническое обеспечение в рамках партнерских программ. Так, в проекте «Марс-500» компании Fresenius Medical Care, Medisana, Fortis и др. предоставили в безвозмездное пользование научную и медицинскую аппаратуру, предметы личного пользования, а немецкие продуктовые компании (Apetito, Kellogg's, HiPP и др.) поставили продукты питания для экипажа.

Привлечение иностранных организаций в изоляционные проекты и проведение совместных изоляционных исследований позволяют:

- иметь представление о современных и перспективных методах исследований и актуализировать его;
- поддерживать активные рабочие контакты с зарубежными исследовательскими центрами;
- существенно расширить круг возможных участников таких исследований;
- реализовывать методы и использовать аппаратуру, которые по разным

причинам не доступны российским исследователям;

- использовать материальные возможности зарубежных научных организаций или отдельных участников.

Такое взаимодействие выгодно всем участвующим сторонам, его польза для дальнейшего развития пилотируемых полетов очевидна, в первую очередь, для освоения дальнего космоса. Но, кроме того, важным достижением таких проектов является то, что многие совместные разработки, возникающие в ходе их реализации, перспективны для дальнейшего применения на Земле.

Так, например, в проекте SIRIUS в рамках партнерского соглашения с Puratos Group (Бельгия) проведено тестирование кваса, разработанного с использованием новейших технологий работы с пробиотическими организмами. По предварительным данным, использование этого кваса может стимулировать качественные изменения показателей иммунитета и нормализовать работу желудочно-кишечного тракта в условиях стресса. Планируется доработать данный продукт с целью дальнейшего использования в длительных космических экспедициях, а также на Земле.

Министерством образования и науки Италии был профинансирован проект компании PER DORMIRE по тестированию в проекте кровати SmartBed. Такая кровать с помощью специальных датчиков анализирует сердцебиение, давление, потоотделение, температуру и др. показатели. В дальнейшем, эти кровати могут использоваться в послеполетной реабилитации космонавтов, а также в широкой медицинской практике в клиниках и санаториях различного профиля и др.

В рамках соглашения с DLR проведено тестирование новейших технологий антимикробной обработки поверхностей для безопасности длительных космических полетов (AGXX IN SPACE), которые также могут применяться на Земле как в здравоохранении, так и в пищевой промышленности. Также проводились исследования по изучению воздействия физической нагрузки в качестве противодействия ухудшению настроения и снижению познавательной способности в условиях изоляции, использованию бесконтактных методов для контроля сердечной вегетативной нервной системы и др. Эти разработки также могут быть широко востребованы в практике здравоохранения.

Помимо проведения изоляционных исследований на собственной базе, ИМБП принимает участие в подобных исследованиях, реализуемых партнерами. Так, во время научно-исследовательского эксперимента «Марс-160» российская участница Анастасия Степанова выполняла программу психологических исследований ИМБП «Когнитивная психология и психология малых групп». Эксперимент по моделированию условий пилотируемой экспедиции к Марсу с изоляцией международного экипажа проводился американской общественной организацией «Марсианское общество». 1-й этап (80 суток) был реализован в 2016 году на Марсианской исследовательской станции в пустыне штата Юта MDRS, 2-й этап (30 суток) – в 2017 году на Арктической базе FMARS на острове Девон, Канадского Арктического архипелага [8, С.62].

Очевидно, что при организации крупномасштабных международных проектов стороны неизменно сталкиваются с рядом проблем, таких, как:

1. Недостаточное количество информации, позволяющей сделать обоснованно-

ванные прогнозы о возможностях использования результатов того или иного проекта.

2. Слишком большое (или неопределенное) время от начала реализации проекта до получения результата и, как следствие, высокая рискованность проектов.

3. Сложности, связанные с корректным определением баланса вкладов сторон.

4. Юридические проблемы, в том числе защита прав на владение интеллектуальной собственностью, ответственность партнеров и многие другие.

5. Проблемы обеспечения конфиденциальности научной и коммерческой информации для пользователей при подготовке и проведении работ в рамках международного исследовательского проекта.

6. Сложившиеся организационные подходы и процедуры работы с коммерческими пользователями и инвесторами, принятые в различных странах.

7. Вопросы экспорта/импорта оборудования и материалов.

8. Визовые режимы и необходимость оформления более длительных виз, чем ими регламентированные.

Однако при наличии заинтересованности сторон и учитывая большой опыт ИМБП в части реализации подобных проектов, все вышеупомянутые проблемы находят решение, представляющее собой компромисс для всех заинтересованных лиц.

Круг стран, вовлеченных в международное сотрудничество с ИМБП, расширяется с каждым годом. Координация усилий приводит не только к взаимообогащению сторон (накопленные знания, практический опыт, технические, финансовые и методические возможности сторон), но и дает возможность избежать ненужного дублирования сходных процедур, оптимизировать циклограмму деятельности экипажей, повысить эффективность проводимых мероприятий и исследований. Очевидно, что такое сотрудничество позволит обеспечить жизнедеятельность человека в дальних космических полетах и сделать возможной широкую коммерциализацию космических технологий.

Автор выражает признательность за помощь в подготовке статьи и подборе материалов Белаковскому Марку Самуиловичу, заведующему отделом ГНЦ РФ-ИМБП РАН и Агапцевой Татьяне Николаевне, заместителю заведующего отделом ГНЦ РФ-ИМБП РАН.

Литература

1. Белаковский М.С., Волошин О.В., Демин Е.П., Моруков Б.В. Проект «Марс-500». Завершение 520-суточной изоляции // М.: ГНЦ РФ-ИМБП РАН; Воронеж: Научная книга. 2011. 16 с.
2. Белаковский М.С., Волошин О. В., Моргунов П.С. Проект «Марс-500». Этап третий: 520-суточная изоляция // М.: ГНЦ РФ-ИМБП РАН; Воронеж: Научная книга. 2010. 28 с.
3. Белаковский М.С., Волошин О.В., Суворов А.В. Международный научный проект SIRIUS. Этап первый: SIRIUS-17 // М.: ГНЦ РФ-ИМБП РАН; Воронеж: Научная книга. 2018. 24 с.

4. Белаковский М.С., Волошин О.В., Суворов А.В. Международный научный проект SIRIUS. Этап второй: SIRIUS-19 // М.: ГНЦ РФ-ИМБП РАН; Воронеж: Научная книга. 2019. 28 с.
5. Белаковский М.С., Демин Е.П. Эксперименты HUBES, ЭКОПСИ-95 и SFINCSS-99 // В сб. Космическая медицина и биология: Сборник научных статей / Под ред. А.И. Григорьева, И.Б. Ушакова // Воронеж: Научная книга. 2013. С. 499-507.
6. Григорьев А.И., Моруков Б.В. Марс все ближе // Наука в России. 2011. Т.181. № 1. С.4.
7. Григорьев А.И., Ушаков И.Б., Моруков Б.В. К первым итогам международного мегаэксперимента «Марс-500» // Пилотируемые полеты в космос. 2012. № 1 (3). С. 5-14.
8. Гуцин В.И., Binsted К., Демин Е.П., Комиссарова Д.В., Белаковский М.С. Опыт и перспективы модельных изоляционных экспериментов в России и США // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 5 спец-выпуск. С. 61-63.
9. Модельный эксперимент с длительной изоляцией: проблемы и достижения / Под ред. В.М. Баранова // М.: Фирма «Слово». 2001. 590 с.
10. Моруков Б.В., Белаковский М.С., Демин Е.П. Эксперимент с 520-суточным пребыванием экипажа в условиях изоляции (Проект «Марс-500») // В сб. Космическая медицина и биология: Сборник научных статей / Под ред. А.И. Григорьева, И.Б. Ушакова // Воронеж: Научная книга. 2013. С. 508-516.

УДК 621.398

Повышение точности результатов измерений при передаче данных остатками совместно с двоичным кодом

А.П. Мороз, доктор технических наук, профессор,
Академик Российской академии космонавтики,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область,

Д.Н. Прасолов, инженер 1-й категории,
Акционерное общество «Научно-производственное объединение
измерительной техники» (АО «НПО ИТ»), г. Королев, Московская область

В статье предложена методика повышения точности результатов измерений при передаче данных остатками совместно с данными в обычном двоичном коде. Показано, что предложенная методика передачи данных остатками совместно с данными в обычном двоичном коде обеспечивает значительное повышение точности результатов измерений при одиночных искажениях бит передаваемых данных.

Непрерывность параметра, полуслова-остатки, точность измерений.

**Increase of the accuracy the results of measuring
of transfer the information by rests with binary code**

Al.P. Moroz, doctor of science, Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,
D.N. Prasolov, engineer, Joint stock company «Scientific and Production Association
of Measuring Equipment» (JSC «NPO IT»), Korolev, Moscow region

In clause the technique of increase of accuracy of results of measurements is offered at data transmission by the rests together with data in a usual binary code. It is shown, that the offered technique provides substantial increase of accuracy of results of measurements at single distortions of bats of transferred data.

A continuity of parameter, a half-word-rests, accuracy of measurements.

Рассмотрим способ передачи значений функционального телеметрируемого параметра чётными и нечётными выборками [1].

Представление данных [2] чётных и нечётных выборок при передаче их по каналу связи существенно отличается. Нечётные выборки передаются двоичным кодом в традиционной позиционной системе счисления, чётные – двумя одинаковыми полусловами-остатками, получаемыми при делении передаваемого значения на один и тот же модуль сравнения [1, 3]. В случае восьмибитовых слов

чётные выборки будут представлены остатками от деления измеренных значений на модуль сравнения 16. Представление измерений остатками может дать более высокую точность, чем двоичным кодом [4-6]. Поэтому на приемной стороне четные и нечетные составляющие ряда измерений будут иметь неодинаковую точность. Совместную обработку таких измерений некорректно выполнять по алгоритмам обработки равноточных измерений. Для реализации потенциальной точности предложенного способа передачи выборок [1] предлагается их обрабатывать сериями так, чтобы более точные измерения оказывали большее влияние на величину получаемой обобщённой оценки.

Различную точность принятых четных и нечетных составляющих ряда измерений предлагается учитывать при их совместной обработке путем введения вспомогательных коэффициентов (весов) неравноточных составляющих. Чем точнее результат отдельного измерения, тем меньше его среднее квадратичное отклонение (СКО) σ^2 , и, соответственно, тем больше должен быть его вес, определяющий вклад в результирующее значение [7]. Поэтому в качестве веса отдельной принятой i -ой выборки будем использовать коэффициент p_i , обратно пропорциональный квадрату СКО σ_i^2 погрешности чётного или нечётного измерения:

$$p_i = \frac{k}{\sigma_i^2}, \quad (1)$$

где k – некоторое, специальным образом определяемое, число. Обработка результатов измерений, учитывающая веса отдельных составляющих, обеспечит достижение двух положительных эффектов:

1. Измерение с более высокой точностью вносит больший вклад в конечный результат обработки серии из нескольких неравноточных измерений.
2. Сильно снижается вес измерений при снижении точности в связи с тем, что в знаменателе у коэффициента p_i стоит σ_i^2 , а не σ_i .

Это вполне логично, так как на практике при формировании обобщающих выводов доверие к грубым измерениям невысоко.

В целом результирующая оценка по серии неравноточных измерений, учитывающая точность каждого измерения, имеет более высокую точность, чем отдельно взятое самое точное измерение.

Рассмотрим методику обработки серии из n неравноточных измерений x_1, x_2, \dots, x_n . Полагаем, что n – нечётное число, хотя это и не принципиально. Тогда усреднённый результат выборок \bar{x} , привязанный к моменту опроса телеметрируемого параметра в точке $\frac{n+1}{2}$, предлагается определять в соответствии со следующим выражением:

$$\bar{x} = p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_n x_n. \quad (2)$$

Найдём выражение для определения значений весовых коэффициентов p_i . Для этого запишем систему следующих уравнений:

$$\begin{cases} p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1; \\ \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{1}{\sigma_n^2} = a. \end{cases} \quad (3)$$

Для обеспечения первого равенства в системе уравнений (3) необходимо определить нормирующий коэффициент k , зависящий от значений дисперсий

σ_i^2 оцениваемой серии неравноточных измерений. С учётом выражения (1) представим выражение (3) в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{k}{\sigma_1^2} + \frac{k}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{k}{\sigma_n^2} = 1; \\ \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{1}{\sigma_n^2} = a. \end{cases} \quad (4)$$

Разделим обе части второго уравнения системы (4) на a , после чего приравняем левые части обоих уравнений:

$$\frac{k}{\sigma_1^2} + \frac{k}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{k}{\sigma_n^2} = \frac{1}{a\sigma_1^2} + \frac{1}{a\sigma_2^2} + \dots + \frac{1}{a\sigma_n^2}. \quad (5)$$

Отсюда получаем значение k :

$$k = \frac{1}{a}. \quad (6)$$

С учётом (6) выражение (2) принимает следующий вид:

$$\bar{x} = \frac{1}{a} \left(\frac{x_1}{\sigma_1^2} + \frac{x_2}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{x_n}{\sigma_n^2} \right). \quad (7)$$

Методика определения значений дисперсий для каждого из трёх рассмотренных способов передачи и обработки данных предложена в [1]. С учётом её определим выигрыш в повышении точности измерений функциональных параметров при использовании предлагаемой методики обработки неравноточных измерений, полученных при чередовании способов представления передаваемых данных.

Рассмотрим способ обработки результатов серий измерений, содержащих по три выборки: измерение, переданное остатками, затем измерение, переданное двоичным кодом и третье измерение, переданное остатками. Дисперсия измерений составляет: для двоичного кода $\sigma_{\text{дк}}^2 = 1715,36$, при передаче остатками – $\sigma_{\text{ост}}^2 = 515$ [1].

1. Передается серия из трех выборок x_i с неизменным значением параметра $x_i = (0,0,0)$ с искажением символа двоичного кода в $x_2 = 0$:

- при передаче исказился первый (младший) бит слова, передававшегося двоичным кодом, т.е. передавали «0», приняли «1». По формуле (7) получаем усреднённую оценку \bar{x} серии измерений, т.е. уточняем $\bar{x}_2 = \bar{x}_{1\text{p}} = 218,34 \times 1/1715,36 = 0,127$; абсолютная погрешность уточнённого результата измерения $\Delta_{\text{с1p}} = \bar{x}_{1\text{p}} - x_2 = 0,127$;

- при передаче исказился второй бит слова в двоичном коде, т.е. передавали «0», приняли «2». Тогда уточнённое значение $\bar{x}_2 = \bar{x}_{2\text{p}} = 218,34 \times 2/1715,36 = 0,25$; абсолютная погрешность $\Delta_{\text{с2p}} = 0,25$;

- при передаче исказился третий бит слова в двоичном коде, т.е. принятое искаженное значение слова равно четырём. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{3\text{p}} = 218,34 \times 4/1715,36 = 0,51$; абсолютная погрешность $\Delta_{\text{с3p}} = 0,51$;

- при передаче исказился четвертый бит слова в двоичном коде, т.е. принятое искаженное значение слова равно восьми. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{4\text{p}} = 218,34 \times 8/1715,36 = 1,02$; абсолютная погрешность $\Delta_{\text{с4p}} = 1,02$;

- при передаче исказился пятый бит слова в двоичном коде, т.е. принятое значение равно 16. В таком случае происходит переход принятого двоичного слова из первого во второй модульный интервал, что вносит дополнительную погрешность для следующего измерения остатками, равную 16. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{5\text{p}} =$

$218,34(16/1715,36+16/515) = 8,73$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c5p} = 8,73$;

- при передаче исказился шестой бит слова в двоичном коде, т.е. принятое значение равно 32. В таком случае происходит переход принятого слова из первого в третий модульный интервал, что вносит дополнительную погрешность для следующего измерения остатками, равную 32. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{6p} = 218,34(32/1715,36+32/515) = 17,47$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c6p} = 17,47$;

- при передаче исказился седьмой бит слова в двоичном коде, т.е. принятое слово равно 64. При этом происходит переход этого слова из первого в четвертый модульный интервал, что вносит дополнительную погрешность для следующего измерения остатками, равную 64. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{7p} = 218,34(64/1715,36+64/515) = 34,93$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c7p} = 34,93$;

- при передаче исказился восьмой бит слова в двоичном коде, т.е. принятое значение равно 128. При этом происходит переход этого слова из первого в восьмой модульный интервал, что вносит дополнительную погрешность для следующего измерения остатками, равную 128. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{8p} = 218,34(128/1715,36+128/515) = 71,07$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c8p} = 71,07$.

Вычислим математическое ожидание и дисперсию погрешности уточнённой оценки \bar{x}_2 по принятой серии из трех измерений $x_i = (0,0,0)$: измерение передавалось остатками, затем двоичным кодом и еще одно измерение – остатками, при неизменном значении параметра. При искажении одного символа в x_2 математическое ожидание M_{c0} погрешности равно $M_{c0} = (0,13+0,25+0,51+1,02+8,73+17,47+34,93+71,07)/8 = 16,76$. Дисперсия погрешности равна $D_{c0} = (0,13-16,76)^2 + (0,25-16,76)^2 + (0,51-16,76)^2 + (1,02-16,76)^2 + (8,73-16,76)^2 + (17,47-16,76)^2 + (34,93-16,76)^2 + (71,07-16,76)^2 = 550,71$. Отношение дисперсии D_{dk} погрешности измерений при передаче слов двоичным кодом к дисперсии D_{c0} уточнённой оценки \bar{x}_2 $D_{dk}/D_{c0} = 1715,36/550,71 = 3,11$.

2. Передается серия из трех выборок x_i с неизменным значением параметра $x_i = (0,0,0)$ с искажением одного символа остатка в x_1 или x_3 :

- при передаче исказился первый (младший) бит слова из двух остатков. Слово «0» состоит из младшего полуслова из четырех единиц и старшего полуслова из четырех нулей [1]. Поэтому искажение любой из четырех единиц в младшем остатке не приведет к появлению погрешности передачи. Искажение любого из четырех нулей в старшем полуслове приведет к появлению такой же погрешности, как и при аналогичном искажении бита в слове с двоичным кодом. По формуле (7) получаем: $\bar{x}_2 = \bar{x}_{1p} = 218,34 \times 0 = 0$; абсолютная погрешность $\Delta_{c1p} = 0$;

- при передаче исказился второй бит слова из остатков, при этом принятое значение равно нулю. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{2p} = 218,34 \times 0 = 0$; $\Delta_{c2p} = 0$;

- при передаче исказился третий бит слова из остатков, при этом принятое значение равно нулю. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{3p} = 218,34 \times 0 = 0$; $\Delta_{c3p} = 0$;

- при передаче исказился четвертый бит слова из остатков, при этом принятое значение равно нулю. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{4p} = 218,34 \times 0 = 0$; $\Delta_{c4p} = 0$;

- при передаче исказился пятый бит слова из остатков, при этом принятое значение равно 16 [1]. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{5p} = 218,34 \times 16 / 515 = 128,34 \times 0,031 = 6,77$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c5p} = 6,77$;

- при передаче исказился шестой бит слова из остатков, при этом принятое значение равно 32. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{6p} = 218,34 \times 32 / 515 = 218,34 \times 0,062 = 13,54$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c6p} = 13,54$;

- при передаче исказился седьмой бит слова из остатков, при этом принятое значение равно 64. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{7p} = 218,34 \times 64 / 515 = 218,34 \times 0,124 = 27,08$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c7p} = 27,08$;

- при передаче исказился восьмой бит слова из остатков, при этом принятое значение равно 128. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{8p} = 218,34 \times 128 / 515 = 218,34 \times 0,248 = 54,16$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c8p} = 54,16$.

Вычислим математическое ожидание и дисперсию погрешности уточнённой оценки \bar{x}_2 по принятой серии из трех измерений $x_i = (0,0,0)$: измерение передавалось остатками, затем – двоичным кодом и еще одно измерение – остатками, при неизменном значении параметра. При искажении одного символа в x_1 или в x_3 математическое ожидание M_{c0} погрешности равно $M_{c0} = (6,77 + 13,54 + 27,08 + 54,16) / 8 = 12,7$. Дисперсия погрешности равна

$$D_{c0} = ((0-12,7)^2 + (0-12,7)^2 + (0-12,7)^2 + (0-12,7)^2 + (6,77-12,7)^2 + (13,54-12,7)^2 + (27,08-12,7)^2 + (54,16-12,7)^2) / 8 = 324,87.$$

Отношение дисперсии D_{dk} погрешности измерений при передаче слов двоичным кодом к дисперсии D_{c0} оценки \bar{x}_2 , уточнённой по серии из трех слов, равно $D_{dk} / D_{c0} = 1715,36 / 324,87 = 5,28$.

3. Передаётся серия из трёх выборок $x_i = (0,1,2)$ с шагом изменения параметра, равным единице, с искажением второго слова x_2 :

- при передаче исказился первый (младший) бит слова в двоичном коде, т.е. передавали «1», приняли «0». По формуле (7) получаем: $\bar{x}_2 = \bar{x}_{1p} = 218,34 \times 2 / 515 = 0,87$; погрешность $\Delta_{c1p} = 0,13$;

- при передаче исказился второй бит слова в двоичном коде, т.е. передавали «1», приняли «3». Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{2p} = 218,34(3/1715,36 + 2/515) = 1,25$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c2p} = 0,25$;

- при передаче исказился третий бит слова в двоичном коде, т.е. передавали «1», приняли «5». Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{3p} = 218,34(5/1715 + 2/515) = 1,53$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c3p} = 0,53$;

- при передаче исказился четвертый бит слова в двоичном коде, т.е. передавали «1», приняли «9». Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{4p} = 218,34(9/1715 + 2/515) = 1,97$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c4p} = 0,97$;

- при передаче исказился пятый бит слова в двоичном коде, т.е. передавали «1», приняли «17», что больше 16. Происходит переход значения принятого слова из первого во второй модульный интервал, что вносит дополнительную погрешность для следующего измерения остатками, равную 16. Получаем: $\bar{x}_2 = \bar{x}_{5p} = 218,34(17/1715,36 + (16 + 2)/515) = 9,83$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c5p} = 8,83$;

- при передаче исказился шестой бит слова в двоичном коде, т.е. передавали «1», приняли «33», что больше 32. Происходит переход значения принятого слова из первого в третий модульный интервал, что вносит дополнительную по-

грешность для следующего измерения остатками, равную 32. Получаем: $\bar{x}_2 = \bar{x}_{6p} = 218,34(33/1715,36+(32+ +2)/515) = 18,78$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c6p} = 17,78$;

- при передаче исказился седьмой бит слова в двоичном коде, т.е. передавали «1», приняли «65», что больше 64. Происходит переход значения принятого слова из первого в четвертый модульный интервал, что вносит дополнительную погрешность для следующего измерения остатками, равную 64. Получаем: $\bar{x}_2 = \bar{x}_{7p} = 218,34(65/1715+(64+ +2)/515) = 37,12$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c7p} = 36,12$;

- при передаче исказился восьмой бит слова в двоичном коде, т.е. передавали «1», приняли «129», что больше 128. Происходит переход этого слова из первого в восьмой модульный интервал, что вносит дополнительную погрешность для следующего измерения остатками, равную 128. Получаем: $\bar{x}_2 = \bar{x}_{8p} = 218,34(129/1715+(128+ +2)/515) = 71,5$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c8p} = 70,5$.

Вычислим математическое ожидание и дисперсию погрешности уточнённой оценки \bar{x}_2 по принятой серии из трех измерений $x_i = (0,1,2)$: измерение передавалось остатками, затем двоичным кодом и третье измерение – остатками, с шагом изменения параметра, равным единице.

При искажении одного символа слова x_2 математическое ожидание $M_{c1} = (0,13+0,25+0,53+0,97+8,83+17,78+36,12+70,5)/8 = 17,01$. Дисперсия

$$D_{c1} = (0,13-17,01)^2+(0,25-17,01)^2+(0,53-17,01)^2+(0,97-17,01)^2+ +(8,83-17,01)^2+(17,78-17,01)^2+(36,12-17,01)^2+(70,5-17,01)^2 = 562,07.$$

Отношение дисперсии D_{dk} погрешности измерений при передаче слов двоичным кодом к дисперсии D_{c1} оценки \bar{x}_2 , уточнённой по серии из трех слов, равно $D_{dk}/D_{c1} = 1715,36/562,07 = 3,05$.

4. Передаётся серия их трёх выборов $x_i = (0,1,2)$ с единичным шагом изменения параметра x_i с искажением символа остатка в $x_i = 0$:

- при передаче исказился первый (младший) бит слова из двух остатков. Нулевое слово состоит из младшего остатка из четырех единиц, старшего остатка из четырех нулей. Поэтому искажение любой из четырех единиц в младшем остатке не приведет к погрешности передачи, и слово из остатков при приеме равно нулю [1]. Искажение любого из четырех нулей в старшем остатке приведет к значению погрешности для слова из двух остатков, такому же, как и при аналогичном искажении бита в слове в двоичном коде. По формуле (7) получаем усреднённую оценку $\bar{x}_2 = \bar{x}_{1p} = 218,34(1/1715,36+2/515) = 2,16$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c1p} = 1,16$;

- при передаче исказился второй бит в x_i , т.е. принятое слово декодируется как $x_i = 0$. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{2p} = 218,34(1/1715,36+2/515) = 2,16$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c2p} = 1,16$;

- при передаче исказился третий бит слова x_i , т.е. принятое слово декодируется как $x_i = 0$. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{3p} = 218,34(1/1715,36+ +2/515) = 2,16$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c3p} = 1,16$;

- при передаче исказился четвертый бит слова x_i , т.е. принятое слово декодируется как $x_i = 0$. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{4p} = 218,34(1/1715,36+ +2/515) = 2,16$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c4p} = 1,16$;

- при передаче исказился пятый бит слова x_1 , т.е. принятое слово декодируется как $x_1 = 16$. Тогда

$\bar{x}_2 = \bar{x}_{5p} = 218,34 \times (16/515 + 1/1715,36 + 2/515) = 8,95$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c5p} = 7,95$;

- при передаче исказился шестой бит в x_1 , т.е. принятое слово декодируется как $x_1 = 32$. Получаем: $\bar{x}_2 = \bar{x}_{6p} = 218,34(32/515 + 1/1715,36 + 2/515) = 15,79$; абсолютная погрешность $\Delta_{c6p} = 14,79$;

- при передаче исказился седьмой бит слова x_1 , т.е. принятое слово декодируется как $x_1 = 64$. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{7p} = 218,34(64/515 + 1/1715 + 2/515) = 29,17$; абсолютная погрешность $\Delta_{c7p} = 28,17$;

- при передаче исказился восьмой бит слова x_1 , т.е. принятое слово декодируется как $x_1 = 128$. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{8p} = 218,34(128/515 + 1/1715 + 2/515) = 57,03$; абсолютная погрешность $\Delta_{c8p} = 57,03$.

Вычислим математическое ожидание и дисперсию погрешности уточнённой оценки \bar{x}_2 по принятой серии из трех измерений $x_i = (0,1,2)$.

При искажении одного символа слова x_2 математическое ожидание $M_{c1} = (1,16 \times 4 + 7,95 + 14,79 + 28,17 + 57,03)/8 = 14,07$; Дисперсия

$$D_{c1} = (1,16 - 14,07)^2 + (7,95 - 14,07)^2 + (14,79 - 14,07)^2 + (28,17 - 14,07)^2 + (57,03 - 14,07)^2 = 343,63.$$

Отношение дисперсии D_{dk} погрешности измерений при передаче слов двоичным кодом к дисперсии D_{c1} оценки \bar{x}_2 , уточнённой по серии из трех слов, равно $D_{dk}/D_{c1} = 1715,36/343,63 = 4,99$.

5 Передаётся серия их трёх выборок $x_i = (0,1,2)$ с единичным шагом изменения параметра x_i с искажением символа остатка в $x_3 = 2$:

- при передаче исказился первый бит слова из двух одинаковых остатков, т.е. передавали «2», приняли «3». По формуле (7) получаем уточнённый результат измерения: $\bar{x}_2 = \bar{x}_{1p} = 218,34(1/1715,36 + 3/515) = 1,39$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c1p} = 0,39$;

- при передаче исказился второй бит слова x_3 , т.е. передавали «2», приняли «2». Уточнённый результат $\bar{x}_2 = \bar{x}_{2p} = 218,34(1/1715,36 + 2/515) = 0,98$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c2p} = 0,02$;

- при передаче исказился третий бит слова x_3 , т.е. передавали «2», приняли «6». Уточнённый результат $\bar{x}_2 = \bar{x}_{3p} = 218,34(1/1715,36 + 6/515) = 2,67$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c3p} = 1,67$;

- при передаче исказился четвертый бит слова x_3 , т.е. передавали «2», приняли «10». Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{4p} = 218,34(1/1715,36 + 10/515) = 4,37$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c4p} = 3,37$;

- при передаче исказился пятый бит слова x_3 , т.е. передавали «2», приняли «3». Уточнённый результат $\bar{x}_2 = \bar{x}_{5p} = 218,34(1/1715,36 + 3/515) = 1,39$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c5p} = 0,39$;

- при передаче исказился шестой бит слова x_3 , т.е. передавали «2», приняли «2». Уточнённый результат $\bar{x}_2 = \bar{x}_{6p} = 218,34(1/1715,36 + 2/515) = 0,98$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c6p} = 0,02$;

- при передаче исказился седьмой бит слова x_3 , т.е. передавали «2», приняли «6». Уточнённый результат $\bar{x}_2 = \bar{x}_{7p} = 218,34(1/1715,36 + 6/515) = 2,67$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c7p} = 1,67$;

- при передаче исказился восьмой бит слова x_3 , т.е. передавали «2», приняли «10». Уточнённый результат $\bar{x}_2 = \bar{x}_{8p} = 218,34(1/1715,36 + 10/515) = 4,37$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c8p} = 3,37$.

Вычислим математическое ожидание и дисперсию погрешности уточнённой оценки \bar{x}_2 по принятой серии из трех измерений $x_i = (0,1,2)$.

При искажении одного символа в x_3 математическое ожидание $M_{c1} = (0,39+0,02+1,67+3,37)2/8 = 1,36$. Дисперсия $D_{c1} = (2(0,39-1,56)^2 + 2(0,02-1,56)^2 + 2(1,67-1,56)^2 + 2(3,37-1,56)^2)/8 = 2,56$.

Отношение дисперсии D_{dk} погрешности измерений при передаче слов двоичным кодом к дисперсии D_{c1} оценки \bar{x}_2 , уточнённой по серии из трех слов, равно $D_{dk}/D_{c1} = 1715,36/2,56 = 670,06$.

6. Передаётся серия их трёх выборок $x_i = (16,16,16)$ без изменения параметра с искажением символа остатка в слове x_3 . Значение $x_3 = 16$ состоит из младшего остатка, равного 14, и старшего остатка, равного одному [1]. Рассмотрим следующие случаи:

- при передаче исказился первый (младший) бит младшего остатка, равного 14, т.е. этот остаток при приеме стал равен 15, а слово из двух остатков при приеме стало равно 16. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{1p} = 218,34 \times (16/515 + 16/1715,36 + 16/515) = 15,57$; погрешность $\Delta_{c1p} = 0,43$;

- при передаче исказился второй бит младшего остатка, равного 14, т.е. этот остаток при приеме равен 12, а принятое слово из двух остатков равно 48. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{2p} = 218,34(16/515 + 16/1715,36 + 48/515) = 29,04$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c2p} = 13,04$;

- при передаче исказился третий бит младшего остатка, равного 14, т.е. этот остаток при приеме равен 10, а принятое слово из двух остатков равно 80. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{3p} = 218,34(16/515 + 16/1715,36 + 80/515) = 42,58$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c3p} = 26,58$;

- при передаче исказился четвертый бит младшего остатка, равного 14, т.е. этот остаток при приеме стал равен 6, а принятое слово из двух остатков равно 144. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{4p} = 218,34(16/515 + 16/1715,36 + 144/515) = 69,78$; абсолютная погрешность $\Delta_{c4p} = 53,78$;

- при передаче исказился первый бит старшего остатка, равного единице, т.е. этот остаток при приеме стал равен нулю, а принятое слово из двух остатков равно 16. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{5p} = 218,34(16/515 + 16/1715,36 + 16/515) = 15,57$; абсолютная погрешность $\Delta_{c5p} = 0,43$;

- при передаче исказился второй бит старшего остатка, равного единице, тогда этот остаток при приеме равен трем, а принятое слово из двух остатков равно 48. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{6p} = 218,34(16/515 + 16/1715,36 + 48/515) = 29,04$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c6p} = 13,04$;

- при передаче исказился третий бит старшего остатка, равного единице, тогда этот остаток при приеме равен пяти, а принятое слово из двух остатков равно 80. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{7p} = 218,34(16/515 + 16/1715,36 + 80/515) = 42,58$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c7p} = 26,58$;

- при передаче исказился четвертый бит старшего остатка, равного единице, и этот остаток при приеме равен девяти, а принятое слово из двух остатков

равно 144. Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{8p} = 218,34(16/515 + 16/1715,36 + 144/515) = 69,78$; абсолютная погрешность $\Delta_{c8p} = 53,78$.

Вычислим математическое ожидание и дисперсию погрешности уточнённой оценки \bar{x}_2 по принятой серии из трех измерений $x_i = (16,16,16)$. При искажении одного символа в x_3 математическое ожидание

$$M_{c0} = (0,43 + 13,04 + 26,58 + 53,87)2/8 = 23,48; D_{c0} = \{(0,43 - 23,48)^2 + (13,04 - 23,48)^2 + (26,58 - 23,48)^2 + (53,87 - 23,48)^2\}2/8 = 164,61.$$

Отношение дисперсии D_{dk} погрешности измерений при передаче слов двоичным кодом к дисперсии D_{c0} оценки \bar{x}_2 , уточнённой по серии из трех слов, равно $D_{dk}/D_{c0} = 1715,36/164,61 = 10,42$.

7. Рассмотрим передачу серии из трех выборок $x_i = (16,16,16)$ с нулевым шагом приращения. При передаче искажается символ слова x_2 :

- при передаче искажился первый (младший) бит слова x_2 , т.е. передавали «16», приняли «17». Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{1p} = 218,34(16/515 + 17/1715,36 + 16/515) = 15,7$; абсолютная погрешность $\Delta_{c1p} = 0,3$;

- при передаче искажился второй бит слова x_2 , т.е. передавали «16», приняли «18». Тогда

$$\bar{x}_2 = \bar{x}_{2p} = 218,34(16/515 + 18/1715,36 + 16/515) = 15,83; \text{ абсолютная погрешность измерения } \Delta_{c2p} = 0,17;$$

- при передаче искажился третий бит слова x_2 , т.е. передавали «16», приняли «20». Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{3p} = 218,34(16/515 + 20/1715,36 + 16/515) = 16,16$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c3p} = 0,16$;

- при передаче искажился четвертый бит слова x_2 , т.е. передавали «16», приняли «24». Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{4p} = 218,34(16/515 + 24/1715,36 + 16/515) = 16,6$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c4p} = 0,6$;

- при передаче искажился пятый бит слова x_2 , т.е. передавали «16», приняли «0». Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{5p} = 218,34(16/515 + 16/515) = 13,54$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c5p} = 2,46$;

- при передаче искажился шестой бит слова x_2 , т.е. передавали «16», приняли «48». Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{6p} = 218,34(16/515 + 48/1715,36 + 16/515) = 19,65$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c6p} = 3,65$;

- при передаче искажился седьмой бит слова x_2 , т.е. передавали «16», приняли «80». Тогда

$$\bar{x}_2 = \bar{x}_{7p} = 218,34(16/515 + 80/1715,36 + 16/515) = 23,8; \text{ абсолютная погрешность измерения } \Delta_{c7p} = 7,8;$$

- при передаче искажился восьмой бит слова x_2 , т.е. передавали «16», приняли «144». Тогда $\bar{x}_2 = \bar{x}_{8p} = 218,34(16/515 + 144/1715,36 + 16/515) = 32,75$; абсолютная погрешность измерения $\Delta_{c8p} = 16,75$.

Вычислим математическое ожидание и дисперсию погрешности уточнённой оценки \bar{x}_2 по серии из трех измерений $x_i = (16,16,16)$. При искажении одного символа в x_2 $M_{c0} = (0,3 + 0,17 + 0,16 + 0,6 + 2,46 + 3,65 + 7,8 + 16,75)/8 = 3,97$. Дисперсия $D_{c0} = \{(0,3 - 3,97)^2 + (0,17 - 3,97)^2 + (0,16 - 3,97)^2 + (0,6 - 3,97)^2 + (2,46 - 3,97)^2 + (3,65 - 3,97)^2 + (7,8 - 3,97)^2 + (16,75 - 3,97)^2\}/8 = 29,35$.

Отношение дисперсии D_{dk} погрешности измерений при передаче слов двоичным кодом к дисперсии D_{c0} оценки \bar{x}_2 , уточнённой по серии из трех слов, равно $D_{dk}/D_{c1} = 1715,36/29,35 = 58,44$.

Характер зависимостей сохраняется при передаче других чисел.

Выводы

1. Рассмотрены три способа передачи данных измерений функциональных параметров: при представлении передаваемых слов традиционным позиционным двоичным кодом, при представлении слов двумя одинаковыми полусловами-остатками от деления значения слова на модуль сравнения, а также при использовании чередования передаваемых слов, представляемых первым и вторым способами.

2. Достоинством традиционного позиционного способа представления передаваемых данных является отсутствие неоднозначности значений принятых результатов измерений, а недостатком – низкая точность измерений при искажении передаваемых битов по сравнению со способом представления данных остатками.

3. Проанализированы погрешности, присущие каждому из трёх рассмотренных способов, при возникновении в процессе передачи искажений отдельных бит в принимаемых словах. Сравнивались абсолютные погрешности и дисперсии погрешностей оценок принятых измерений при нулевом и единичном приращении величины параметра.

4. При передаче данных с чередованием представления передаваемых слов традиционным позиционным двоичным кодом и представления слов двумя одинаковыми полусловами-остатками от деления значения слова на модуль сравнения, принимаемые чётные и нечётные измерения будут отличаться по точности. При совместной обработке чётных и нечётных измерений традиционным способом не реализуется потенциальная точность измерений.

5. Для реализации потенциальной точности измерений предлагается методика совместной обработки принимаемых данных сериями из трёх смежных слов из чётных и нечётных измерений. В каждую серию отбираются два принятых слова, представленных остатками, и находящееся между ними слово с традиционным позиционным представлением. Результирующее значение получают суммированием с весами значений трёх смежных слов. Веса обратно пропорциональны значениям дисперсий соответствующих слов.

6. Результаты моделирования показали, что методика совместной обработки сериями из трёх слов с весами позволяет существенно повысить точность результатов измерений по сравнению с представлением передаваемых данных в двоичном коде.

Литература

1. Мороз А.П., Прасолов Д.Н. Способы представления данных полусловами-остатками для повышения достоверности передачи информации // Информационно-технологический вестник. 2019. Т. 19. № 1. С. 37-47.
2. Мороз А.П. Повышение эффективности телеметрирования быстроменяющихся параметров при натурных испытаниях летательных аппаратов / А.П. Мороз: монография: Королев МО. ФТА. 2012. 224 с.
3. Виноградов И.М. Основы теории чисел // М.: Наука. 1972. 168с.
4. Мороз А.П. Усовершенствованная теорема об остатках для обработки инфор-

- мации о знакопеременных процессах // Двойные технологии. М.: Российская инженерная академия / Международная инженерная академия. № 3 (24). 2003. С. 9-12.
5. Мороз А.П. Теорема об остатках: Доклад второй международной научной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы» 18-21 ноября 2003 г. Сб. тр. Т. 4 // М.: МГТУ. 2004. С. 7-10.
 6. Мороз А.П. Теоретико-числовые основы повышения эффективности контроля быстроменяющихся параметров на основе представления результатов телеизмерений в остаточных классах: Доклад Всероссийской НТК по радиационной стойкости электронных систем «Стойкость-2004» 1-2 июня 2004 г. Статья опубликована также в журнале «Вопросы атомной науки и техники». Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру // М: ЦНИИАтоминформ. 2005. № 3-4. С. 34-39.
 7. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции: в 4 т. Т.1: Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции // М. 1972. 742 с.

УДК 629.7: 334.01

**Оценка эффективности импортозамещения
в авиационно-космическом сегменте
военно-промышленного комплекса с учетом минимизации рисков**

К.О. Ушакова, инженер-конструктор 2 категории,
АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»,
г. Королев, Московская область,

В.Г. Исаев, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Управления качеством и стандартизации»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

В 2014 году странами НАТО были введены ограничения на поставку импортного оборудования и комплектующих в Российскую Федерацию. В связи с чем была актуализирована проблема национальной безопасности, решение которой требует разработки и применения целого комплекса мер – экономических, организационных и правовых.

Государство впервые за много лет столкнулось с реальной необходимостью импортозамещения. Вопросы импортозамещения являются стратегически важными, от их решения зависит обеспечение обороноспособности национальной экономики. Государство перешло к стратегии импортозамещения и поддержке отечественного производителя.

Импортозамещение, оборонно-промышленный комплекс, минимизация рисков.

**Assessment of the effectiveness of import substitution in the aerospace
segment of the military-industrial complex taking into account
risk minimization**

K.O. Ushakova, the 2nd rank design engineer in Joint Stock Company
«Corporation «Tactical Missiles», Korolev, Moscow region,

V.G. Isaev, Candidate of Technical Sciences, head of the Department of Quality
Management and Standardization,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

In 2014, Russian Federation was restricted in importing of foreign equipment and component parts by countries that were NATO members. In that situation, the importance of national security issues increased. To deal with those issues, a range of different measures such as economical, organizational and legal were to be applied.

After a long time, once again Russian Federation faced the problems concerning import substitution. National security issues are strategically important, solving these issues effects national economics defense potential. Russian Federation followed

the import substitution strategy and started to support domestic producers.

Import substitution, defense industry, risk minimization.

Разработка современной авиационной и ракетно-космической техники невозможно без использования электрорадиоизделий (ЭРИ). Электрорадиоизделия применяются при создании систем управления образцов РКТ, систем управления вооружением, систем прицеливания, вычислительных и многих других систем.

На уровне министерств Российской Федерации были разработаны программы по замене материалов и электронной компонентной базы иностранного производства на отечественные в первую очередь в авиационно-космическом сегменте военно-промышленного комплекса.

Впервые за многие годы Россия столкнулась с реальной потребностью в импортозамещении. Вопросы импортозамещения стратегически важны и от их решения зависит обороноспособность страны и эффективность функционирования национальной экономики. Государство перешло к стратегии импортозамещения и поддержке отечественного производителя.

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 13.05.2017 г. № 208 [1] принята Стратегия экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года, которая направлена на обеспечение противодействия вызовам и угрозам экономической безопасности, предотвращение кризисных явлений в ресурсно-сырьевой, производственной, научно-технологической и финансовой сферах, а также недопущение снижения качества жизни граждан. А импортозамещение является фактором экономической безопасности государства.

В России государство инициировало импортозамещение во всех отраслях, и потому выступает в качестве активного и крупного закупщика. В России импортозамещение в государственных закупках регулируется государственным правом, которое закреплено в 44-ФЗ [2] и 223-ФЗ [3].

До 2014 года закупка электронной компонентной базы (ЭКБ) импортного производства для укомплектования отечественной продукции допускалось любой номенклатуры и у любых фирм – производителей без ограничений. При этом ЭРИ импортного производства, произведенные каждой конкретной фирмой, зачастую конструктивно существенно отличались от аналогичных по назначению ЭРИ других производителей, что приводило к отсутствию их унификации в образцах радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), разработанной не только смежными, но и одними и теми же отечественными организациями. Это не позволяет в отечественных условиях создать прямые аналоги всей примененной номенклатуры ЭРИ импортного производства. Кроме того, стоимость российских аналогов зачастую значительно превышает стоимость их зарубежных прототипов.

Вопрос импортозамещения в области разработки и производства ЭКБ отечественного производства – актуальная проблема.

Для ее решения требуется грамотное техническое руководство, выявление приоритетных задач и определения сроков их реализации при выделении реальных объемов финансирования. То есть должна реализовываться комплексная

государственная политика в области импортозамещения ЭКБ.

Поскольку импортное производственное и радиоизмерительное оборудование по большей части имели отечественные аналоги или зарубежные аналоги из стран, которые не поддерживают санкции, основные усилия государства были направлены на разработку мер по импортозамещению материалов и ЭКБ.

Реализация мероприятий по импортозамещению материалов и ЭКБ импортного производства в образцах ВВСТ столкнулась с рядом проблем объективного и субъективного характера. Среди них можно выделить отсутствие конструкционных материалов и ЭРИ отечественного производства с необходимыми техническими характеристиками, что приводит к необходимости проведения НИОКР (научно-исследовательская опытно-конструкторская работа), целью которых является разработка электрорадиоизделий аналогов. В процессе выбора конструктивных решений, выполняемых в ходе НИОКР, во многих случаях были применены ЭРИ и конструкционные материалы импортного производства, имеющие отечественные аналоги, что свидетельствует о недостаточной осведомленности конструкторов и слабом контроле экспертных организаций. При проведении НИОКР по разработке отечественных аналогов электрорадиоизделий и конструкционных материалов необходимо решить проблемы нехватки отечественных технологий, оборудования, контрольно-измерительных приборов, а также материалов и сырья. В результате проведения НИОКР во многих случаях получают ЭРИ и КМ (конструкционные материалы), не являющиеся полными аналогами импортных. Проведение НИОКР по разработке существующих ЭРИ и конструкционных материалов приводит к увеличению отставания в области разработки перспективных ЭРИ и конструкционных материалов.

Вследствие этого возрастают затраты на модернизацию и тестирование существующего оборудования в процессе реализации политики импортозамещения. Все эти проблемы усугубляются отсутствием подготовленных кадров, отечественного программного обеспечения по разработке и низкоуровневому программированию цифровых ЭРИ. Отсутствие специализированных структур на предприятиях оборонной промышленности и информации о результатах замены электронных компонентов и конструкционных материалов отечественными аналогами не приводит к повышению эффективности процесса импортозамещения. Кроме того, в России отсутствуют методы оценки достигнутых результатов импортозамещения и их эффективности.

Несмотря на то, что в последние годы уделяется большое внимание развитию отечественных ЭРИ, продолжается использование ЭРИ импортного производства. Основные причины этого – отсутствие методики управления импортозамещением электронной компонентной базы на предприятиях ОПК.

Для решения данной проблемы авторами предлагается внедрение методики управления импортозамещением электронной компонентной базы на предприятиях ОПК, участвующих в программе импортозамещения. Суть методики заключается в выборе альтернативных методов формирования тактики импортозамещения в каждом конкретном случае, принимая решение на базе метода анализа иерархий.

Метод анализа иерархий относится к классу критериальных методов и часто используется при принятии управленческих решений. Суть метода заклю-

чается в определении критериев, по которым принимается решение конкретной проблемы. При этом составляются альтернативные варианты решения проблемы и затем выбираются наилучшие. При решении проблемы методом Саати сначала выявляется проблема и формулируется цель. Затем определяются критерии, по которым предполагается оценивать результаты достижения поставленной цели. Далее критерии объединяются в альтернативные варианты, позволяющие получить рациональное решение проблемы. Строятся дерево иерархии критериев, матрица парных сравнений критериев и матрицы парных сравнений альтернатив. После построения матриц проводится их анализ, и определяются веса альтернативных решений в иерархической системе.

1. Выделение проблемы. Определение цели.

Целью проекта является определение рационального варианта решения проблемы по импортозамещению конкретных электронных компонентов из существующих альтернатив.

2. Выбор основных критериев для достижения цели.

Для оценки эффективности импортозамещения каждого конкретного электрорадиоизделия импортного производства авторами предлагается использовать следующие критерии:

- риск замены на ЭРИ ОП, являющееся неполным аналогом;
- риски, связанные со сроками замены ЭРИ ИП;
- наличие потребности в данном ЭРИ ИП в других изделиях;
- риск прекращения производства ЭРИ ИП;
- наличие «закладок» в ЭРИ ИП;
- категория «industrial» ЭРИ ИП несоответствующая ВТ;
- наличие санкций по данной группе ЭРИ ИП;
- сроки хранения для создания страховых запасов.

3. Выбор группы альтернатив, представляющих наибольший интерес.

Перечисленные критерии были сведены в группы альтернатив по возможным вариантам действий, представляющих наибольший интерес, и среди них выделены следующие четыре альтернативных варианта импортозамещения для конкретного электрорадиоизделия импортного производства:

- замена на существующий отечественный аналог;
- замена на разрешенный импортный аналог;
- постановка ОКР;
- создание страховых запасов.

4. Построение дерева иерархии критериев.

Для графического представления о ситуации по принятию решений и последующего анализа этой ситуации авторами построено дерево иерархии и представлено на рисунке 1.

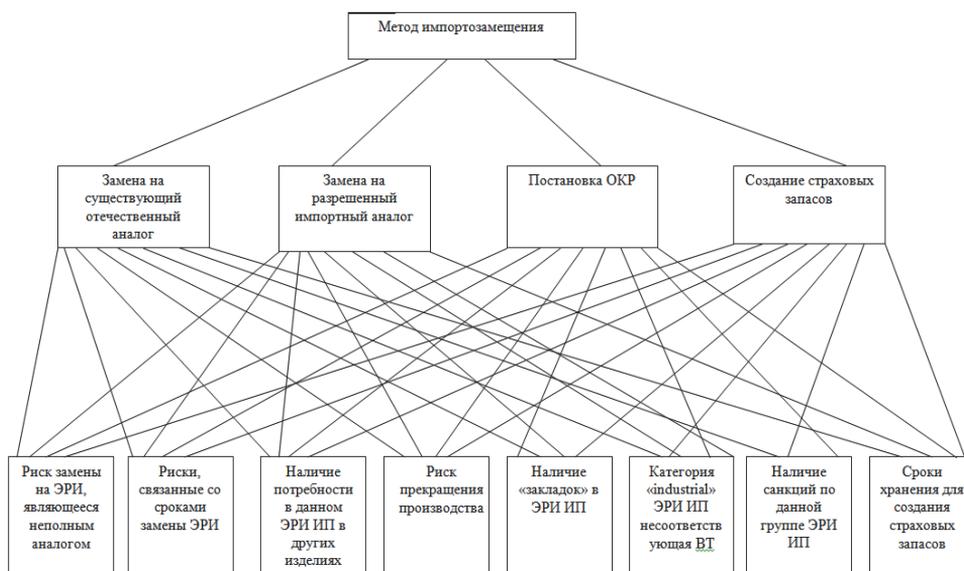


Рисунок 1 – Дерево иерархии для выбора метода проведения мероприятия по импортозамещению

Для сравнения предложенных критериев в соответствии с методом Саати авторами были использованы качественные характеристики и осуществлен их перевод в количественные по девятибальной шкале, показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Качественные варианты сравнения и соответствующие им количественные баллы

Качественное сравнение	Количественный аналог	Качественное сравнение	Количественный аналог
равно, одинаково, безразлично	1	равно, одинаково, безразлично	1
немного лучше, важнее	3	немного хуже, <u>менее важнее</u>	1/3
лучше, важнее	5	хуже, менее важно	1/5
значительно лучше, важнее	7	значительно хуже, менее важно	1/7
принципиально лучше, важнее	9	принципиально хуже, менее важно	1/9

На основании результатов попарного сравнения с учетом таблицы 1 составляется таблица-матрица баллов сравнений критериев.

Таблица 2 – Матрица баллов сравнений критериев

	Риск замены на ЭРИ, являющийся неполным аналогом	Риски связанные со сроками замены ЭРИ	Наличие потребности в данном ЭРИ ИП в других изделиях	Риск прекращения производства	Наличие «заказов» в ЭРИ ИП	Категория «industrial» ЭРИ ИП не соответствует вукующая ВД	Наличие санкций по данной группе ЭРИ ИП	Сроки хранения для создания страховых запасов
Риск замены на ЭРИ, являющийся неполным аналогом	1	3	7	1/5	1/7	5	1/9	2
Риски связанные со сроками замены ЭРИ	1/3	1	3	1/3	1/5	3	1/3	3
Наличие потребности в данном ЭРИ ИП в других изделиях	1/7	1/3	1	1/5	1/7	3	1	2
Риск прекращения производства	5	3	5	1	5	5	1/3	1/5
Наличие «заказов» в ЭРИ ИП	7	5	7	1/5	1	3	5	3
Категория «industrial» ЭРИ ИП несоответствующая ВД	1/5	1/3	1/3	1/5	1/3	1	5	3
Наличие санкций по данной группе ЭРИ ИП	9	3	1	3	1/5	1/5	1	1/7
Сроки хранения для создания страховых запасов	1/2	1/3	1/2	5	1/3	1/3	7	1

5. Построение матриц парных сравнений альтернатив по критериям.

Матрицы для сравнения разработанных альтернативных решений для каждого из критериев строятся аналогичным образом, как и матрица, представленная в таблице 2.

Таблица 3 – Матрица сравнения альтернативы по критерию «Риск замены на ЭРИ, являющийся неполным аналогом»

Риск замены на ЭРИ, являющийся неполным аналогом	Замена на существующий отечественный	Замена на разрешенный импортный	Постановка ОКР	Создание страховых запасов
Замена на существующий отечественный	1	1/3	9	1/9
Замена на разрешенный импортный	3	1	7	1/5
Постановка ОКР	1/9	1/9	1	1/9
Создание страховых запасов	9	5	9	1

Таблица 4 – Матрица сравнения альтернативы по критерию «Риски связанные со сроками замены ЭРИ»

Риски связанные со сроками замены ЭРИ	Замена на существующий отечественный	Замена на разрешенный импортный	Постановка ОКР	Создание страховых запасов
Замена на существующий отечественный	1	1/5	9	1/9
Замена на разрешенный импортный	5	1	7	1/5
Постановка ОКР	1/9	1/9	1	1/9
Создание страховых запасов	9	5	9	1

Таблица 5 – Матрица сравнения альтернативы по критерию «Наличие потребности в данном ЭРИ ИП в других изделиях»

Наличие потребности в данном ЭРИ ИП в других изделиях	Замена на существующий отечественный	Замена на разрешенный импортный	Постановка ОКР	Создание страховых запасов
Замена на существующий отечественный	1	5	9	9
Замена на разрешенный импортный	1/5	1	7	1
Постановка ОКР	1/9	1/9	1	9
Создание страховых запасов	1/9	1	1/9	1

Таблица 6 – Матрица сравнения альтернативы по критерию «Риск прекращения производства»

Риск прекращения производства	Замена на существующий отечественный	Замена на разрешенный импортный	Постановка ОКР	Создание страховых запасов
Замена на существующий отечественный	1	5	9	9
Замена на разрешенный импортный	1/5	1	5	1/3
Постановка ОКР	1/9	1/5	1	1,7
Создание страховых запасов	1/9	3	7	1

Таблица 7 – Матрица сравнения альтернативы по критерию

Наличие «закладок» в ЭРИ ИП	Замена на существующий отечественный	Замена на разрешенный импортный	Постановка ОКР	Создание страховых запасов
Замена на существующий отечественный	1	9	1	9
Замена на разрешенный импортный	1/9	1	1/9	1
Постановка ОКР	1	9	1	9
Создание страховых запасов	1/9	1	1/9	1

Таблица 8 – Матрица сравнения альтернативы по критерию «Категория «industrial» ЭРИ ИП несоответствующая ВТ»

Категория «industrial» ЭРИ ИП несоответствующая ВТ	Замена на существующий отечественный	Замена на разрешенный импортный	Постановка ОКР	Создание страховых запасов
Замена на существующий отечественный	1	5	1	5
Замена на разрешенный импортный	1/5	1	1/3	1/5
Постановка ОКР	1	3	1	3
Создание страховых запасов	1/5	5	1/3	1

6. Анализ полученных матриц.

С каждой из матриц, представленных в таблицах 2-10, проводятся следующие действия.

Сначала матрицы нормируются. Нормирование проводится следующим образом. Все элементы каждого столбца сначала суммируются, а затем каждый элемент матрицы делится на полученную сумму элементов соответствующего столбца.

Затем определяются веса строк, вычисляя среднее значение в каждой строке последней из полученных матриц.

Результирующий столбец представляет веса строк матрицы, то есть веса критериев с точки зрения цели. Таким образом, результирующий столбец является весовым столбцом критериев для цели.

Таблица 9 – Матрица сравнения альтернативы по критерию «Наличие санкций по данной группе ЭРИ ИП»

Наличие санкций по данной группе ЭРИ ИП	Замена на существующий отечественный	Замена на разрешенный импортный	Постановка ОКР	Создание страховых запасов
Замена на существующий отечественный	1	1	1	3
Замена на разрешенный импортный	1	1	5	7
Постановка ОКР	1	1/5	1	1/5
Создание страховых запасов	1/3	1/9	5	1

Таблица 10 – Матрица сравнения альтернативы по критерию «Сроки хранения для создания страховых запасов»

Сроки хранения для создания страховых запасов	Замена на существующий отечественный	Замена на разрешенный импортный	Постановка ОКР	Создание страховых запасов
Замена на существующий отечественный	1	1	2	3
Замена на разрешенный импортный	1	1	5	1/7
Постановка ОКР	1/2	1/5	1	1/5
Создание страховых запасов	1/3	7	5	1

7. Промежуточный анализ

Для рассмотренного в примере конкретного ЭРИ импортного производства наиболее весомым является риск наличие «закладок» в ЭРИ импортного производства (20.8%) и риск прекращения производства (20.7%), далее следует риск сроки хранения для создания страховых запасов (13.0%), потом идет наличие санкций по данной группе ЭРИ ИП (12.6%) и риск замены на ЭРИ, являющийся неполным аналогом (11.7%). Риски связанные со сроками замены ЭРИ (7.9%), категория «industrial» ЭРИ ИП несоответствующая ВТ (7.7%) и наличие потребности в данном ЭРИ ИП в других изделиях (5.5%) имеют наименьшие весовые коэффициенты.

Перечисленные в пункте 6 действия необходимо повторить для всех матриц попарного сравнения альтернативных решений по выбранным критериям. В

итоге получают результаты, которые представлены в таблицах 12 и 13.

Таблица 11 – Вес критериев с точки зрения цели

Критерии	Вес	Вес, %
Риск замены на ЭРИ, являющийся неполным аналогом	0.12	11.7
Риски связанные со сроками замены ЭРИ	0.08	7.9
Наличие потребности в данном ЭРИ ИП в других изделиях	0.06	5.5
Риск прекращения производства	0.21	20.7
Наличие «закладок» в ЭРИ ИП	0.21	20.8
Категория « <u>industrial</u> » ЭРИ ИП несоответствующая ВТ	0.08	7.7
Наличие санкций по данной группе ЭРИ ИП	0.13	12.6
Сроки хранения для создания страховых запасов	0.13	13.0

Таблица 12 – Вес альтернативы с точки зрения конкретного примера

	Риск замены на ЭРИ, являющийся неполным аналогом	Риски связанные со сроками замены ЭРИ	Наличие потребности в данном ЭРИ ИП в других изделиях	Риск прекращения производства	Наличие «закладок» в ЭРИ ИП	Категория « <u>industrial</u> » ЭРИ ИП несоответствующая ВТ	Наличие санкций по данной группе ЭРИ ИП	Сроки хранения для создания страховых запасов
Замена на <u>существующий</u> отечественный	13.8	13.0	59.5	62.9	45.0	42.3	27.0	32.7
Замена на <u>разрешенный</u> импортный	19.8	22.5	18.5	12.7	5.0	7.5	44.2	22.0
Постановка ОКР	3.7	3.7	15.2	4.0	45.0	33.3	12.2	8.0
Создание страховых запасов	62.7	60.8	6.9	20.4	5.0	16.9	16.7	37.3

8. Далее необходимо умножить полученную матрицу на столбец весов критериев по цели.

Таблица 13 – Веса альтернатив с точки зрения достижения поставленной цели для конкретного ЭРИ ИП

Альтернативные решения	Вес, %
Замена на <u>существующий</u> отечественный	39.2
Замена на <u>разрешенный</u> импортный	17.8
Постановка ОКР	16.9
Создание страховых запасов	26.1

В результате проведенных расчетов получаем веса альтернативных решений с точки зрения достижения цели для конкретного ЭРИ импортного производства (см. таблицу 13). Как следует из таблицы 13, альтернатива принятия ре-

шения по замене электрорадиоизделия импортного производства «замена на существующий отечественный» является наилучшей для выбранной цели. Если требуется выбрать две альтернативы то, это будут, во-первых, «замена существующего отечественного» и во-вторых «создание страховых запасов».

Анализ данных, представленных в таблице 13, показывает следующее. Рассчитанные веса перечисленных альтернативных решений по своим значениям являются довольно близкими друг к другу. Из этого следует, что все альтернативные варианты замены конкретного электрорадиоизделия импортного производства в том числе и для детального рассмотрения и анализа выбраны верно.

Данный метод рекомендуется использовать для выбора наиболее оптимального варианта импортозамещения на предприятиях оборонно-промышленного комплекса.

Литература

1. Указ Президента РФ от 13.05.2017 № 208 «О Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года».
2. Федеральный закон «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» № 44-ФЗ от 05.04.2013, ред. от 01.05.2019.
3. Федеральный закон «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц» № 223-ФЗ от 18.07.2011, ред. от 28.11.2018.

УДК 004.04

Особенности проектирования систем поддержки принятия решений с элементами адаптации

Э.Э. Акимкина, аспирант,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Рассмотрены вопросы повышения эффективности систем поддержки принятия решений на основе многомерных хранилищ данных, имеющие существенное значение для выполнения требований по увеличению быстродействия систем. Показано, что эффективность функционирования системы поддержки принятия решений возрастает при введении в нее элементов обслуживания, которые позволяют учитывать изменение условий внешней и внутренней среды. Разработана методика проектирования системы поддержки принятия решений, учитывающая особенности ее адаптации к изменяющимся условиям с помощью элементов обслуживания.

Многомерный куб данных, элемент обслуживания, структуризация, визуализация, архитектурный план, юниверс.

Design features of decision support systems with adaptation elements

E.E. Akimkina, graduate student,

State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

Issues of increasing the effectiveness of decision support systems based on multidimensional data warehouses are considered, which are essential for fulfilling the requirements to increase system performance. It is shown that the effectiveness of the functioning of the decision support system increases with the introduction of service elements in it, which allow taking into account changes in the conditions of the external and internal environment. A methodology has been developed for designing a decision support system that takes into account the peculiarities of its adaptation to changing conditions using service elements.

Multidimensional data cube, service element, structuring, visualization, architectural plan, universe.

Введение

Высокое качество принятия решений при анализе сложных проблем, характеризующихся обработкой больших объемов информации, затруднительно достигнуть без привлечения средств вычислительной техники только на основе субъективной экспертной оценки аналитиков и специалистов. Опыт эксплуатации систем поддержки принятия решений (СППР) показал [1...6], что сущест-

вующие принципы их создания не учитывают изменение быстродействия отдельных элементов обслуживания (ЭО), которые зависят от текущей нагрузки на систему. Ситуацию с быстродействием СППР можно заметно улучшить в случае придания системе свойства адаптивности к изменяющимся условиям внешней и внутренней среды с целью оптимизации функционирования [7,8].

Разработка методики построения адаптивной системы поддержки принятия решений

При разработке методики нужно учитывать особенности адаптивной СППР, которые заключаются в способности функционировать в условиях изменения внешней среды, своей внутренней структуры, базы знаний, нормативно-правовой базы для управления, инструментальных средств поддержки, пользователей системы. В такую систему поступает информация, содержащая сведения от различных входных источников.

Для учета факторов, характерных для адаптивной СППР, исследованы адаптивные компьютерные средства – реализованные в виде серверов элементы обслуживания (ЭО) основных инструментов СППР запросов.

На основе анализа принципов построения и производительности систем поддержки принятия решений, в состав которых входят многомерные хранилища данных, поставлена научная задача, которая заключается в повышении эффективности использования информационного ресурса – увеличении количества обрабатываемых в единицу времени запросов. СППР с ЭО представляется как дискретная событийная система массового обслуживания. Количество обрабатываемых в единицу времени запросов стремится к максимуму и зависит от следующих переменных: вероятность использования ЭО при различной нагрузке, коэффициент использования ЭО при различной нагрузке, вероятность отказа в обслуживании ЭО, вероятность работы нескольких элементов обслуживания одновременно, среднее количество запросов в системе [9].

Для повышения эффективности СППР предложен алгоритм обслуживания запросов в СППР с использованием компьютерных средств адаптации – элементов обслуживания. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1 [7].

Полученные в результате построения математической и имитационной модели и проведения имитационных экспериментов результаты показали, что введение в СППР опции адаптации успешно решает задачу максимизации количества запросов, обрабатываемых в единицу времени [9]. С помощью определения процентной разницы между двумя числами подсчитано, что в среднем адаптивная система на 28% больше обеспечивает занятость обработкой запросов, чем система без очередей, и на 11% меньше допускает простои в работе, чем система с бесконечной очередью.

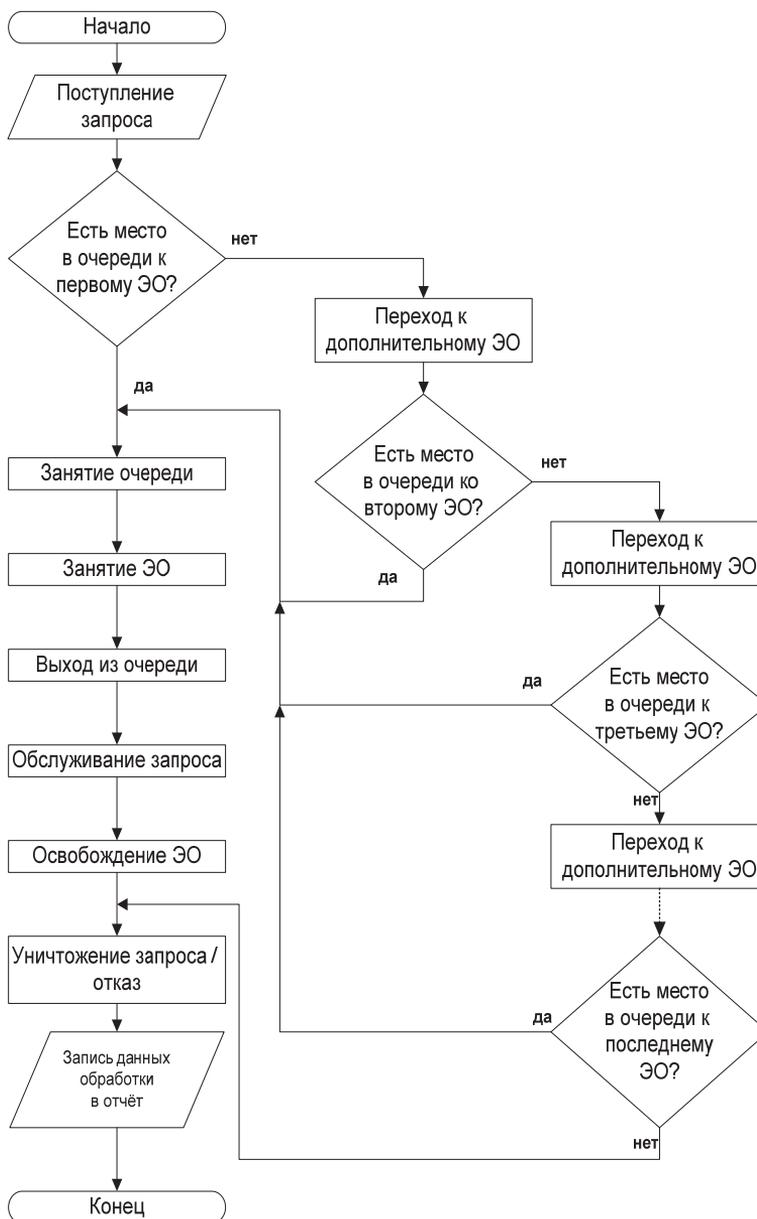


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма обслуживания запросов в адаптивной СППР (составлено автором)

Для того чтобы определить показатели, которые будут представлены в отчетах различного вида для поддержки принятия решений, необходимо проанализировать запросы и определить уровень структуризации показателей многомерных кубов по предложенному на рисунке 2 алгоритму [10], основанному на методе пошаговой детализации и методе графического представления данных.



Рисунок 2 – Алгоритм структуризации и визуализации показателей многомерных кубов данных (составлено автором)

Проведенные исследования способов обработки и хранения данных в многомерных кубах послужили основой для разработки методики построения архитектурного плана многомерного куба данных. В литературе куб данных отображается с помощью достаточно громоздкой модели (рисунок 3), которая к тому же не может отобразить количество измерений куба, превышающее три измерения (в общем случае куб многомерный). Поэтому на основе метода пошаговой детализации разработан алгоритм, который позволяет получить архитектурный план куба, лишенный этих недостатков. Схема алгоритма [10] приведена на рисунке 4.

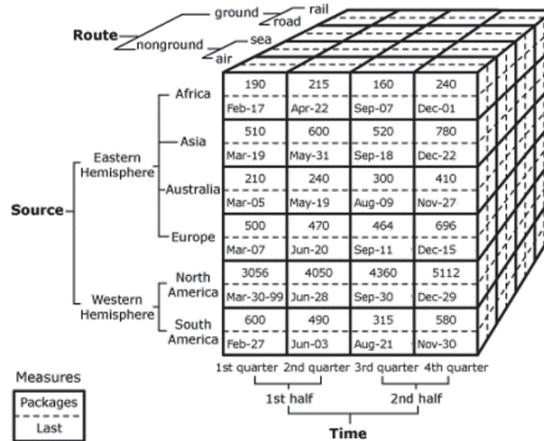


Рисунок 3 – Типовой план многомерного куба данных

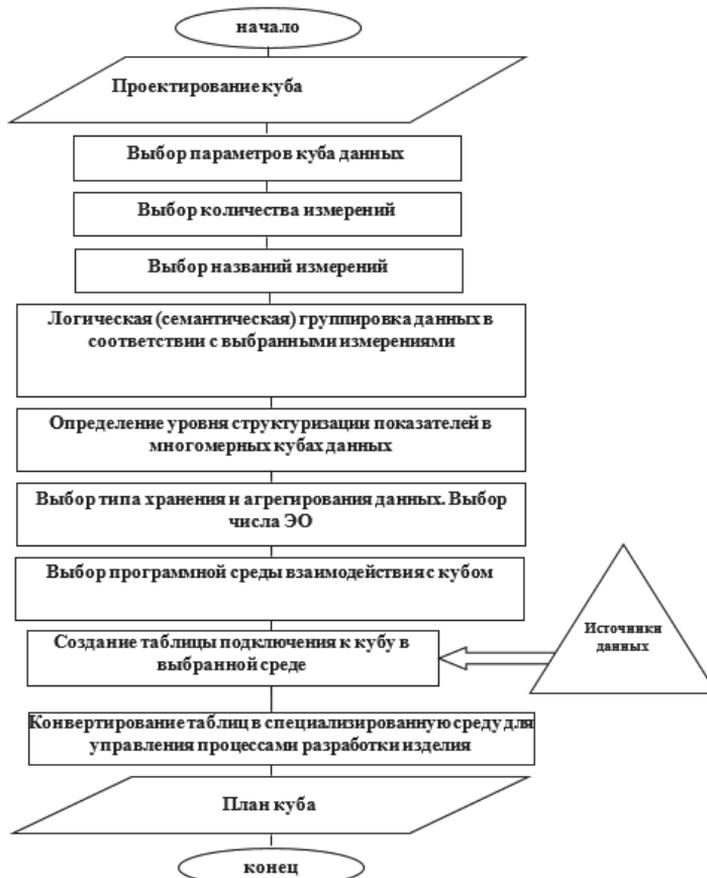


Рисунок 4 – Алгоритм построения архитектурного плана куба данных (составлено автором)

В таблице 1 представлен архитектурный план куба, построенный по предложенному алгоритму. Для обозначения типа оперативных данных, обраба-

тываемых СППР, использована буква «О». Для обозначения кода года использован формат даты, в которой год обозначается двумя последними цифрами (для уменьшения количества символов, выделяемых на дату). Код среды разработки состоит из нескольких кодов. Это означает, что для СППР может быть использованы несколько сред разработки. В частности, адаптивная система поддержки принятия решений для определения ключевых показателей эффективности работы сотрудников предприятия построена с использованием инструментов разработки BI, MS Excel и инструмента управления 1С, что и отражено в кодировке.

**Таблица 1 – Архитектурный план многомерного куба данных
(составлено автором)**

Идентификация	Классификация	Кодирование	Пример кодировки
Предприятие	[код предприятия] = [международный код страны] [аббревиатура предприятия]	<2 буквы> <5 букв>	RUNPOIT
Тип данных	[код типа данных]	<1 буква>	O
Календарный период	[код даты] = [код дня] [код месяца] [код года]	<2 цифры> <2 цифры> <2 цифры>	120520
Показатель эффективности	[код показателя] = [код формы] [код строки]	<3 буквы> <3 цифры>	KPI012
Отчет	[код отчета] = [код даты] [код типа данных] [.] [код предприятия]	<6 цифр> <1 буква> <7 букв>	120520O. RUNPOIT
Среда разработки	[код среды разработки] = [код среды разработки 1] [код среды разработки 2], ... , [код среды разработки n]	<Символьный тип произвольной длины>	BIMSEXCEL
Среда управления	[код среды управления]	<Символьный тип произвольной длины>	1C

План архитектурного куба от ER-модели отличается тем, что показывает не только идентификацию информационных объектов (выделение ключевых наборов атрибутов для определенного вида объектов), но и количество измерений (6 осей многомерного куба), а также сведения о среде разработки (development environment) и среде управления (management environment) процессами разработки изделия.

Наиболее распространённая среда, в которую конвертируются таблицы с данными, для управления процессами разработки в России – это среда 1С [11].

Наиболее часто используется загрузка данных из Excel в 1С, а также выгрузка данных из 1С в Excel, при обработке любых данных документации предприятия или статистических данных по выполненным работам и услугам, хранящихся в MS Excel [12]. На промышленных предприятиях, занимающихся про-

ектированием и изготовлением изделий сложных технических систем, данные и о параметрах изделий конвертируются в таблицы MS Excel. Это позволяет создавать несколько конфигураций деталей или сборок путем задания параметров во встроенной в среду компьютерного моделирования таблице Excel. Таблица параметров сохраняется в документе модели используемой компьютерной среды, при этом у нее не теряется связь с исходным файлом Excel. Для дальнейшего анализа данных о производимом изделии (например, стоимостных, эксплуатационных, данных о затратах электроэнергии на производство изделия и пр.) отдельные ячейки Excel могут быть выгружены в 1С.

На рисунке 5 приведено описание фрагмента алгоритма конвертирования таблицы с параметрами данных об изделиях из MS Excel в среду 1С.

```

Функция ФайлExcel_Импортировать.Лист(ИмяФайла, ИмяИлиНомер.Листа = 1,
Использовать.Заголовок = Ложь)
adFalse = 0;
// формируем строку подключения к OLE DB источнику данных с именем
"Microsoft.ACE.OLEDB.12.0"
HDR = ?(Использовать.Заголовок, "Yes", "No");
СтрокаСоединения = ФорматСтроки("Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0;Data
Source=%1; Extended Properties="""Excel 12.0;HDR=%2""", ИмяФайла, HDR);
// если лист задан не именем, а номером, требуется сначала найти имя листа
Если ТипЗнч(ИмяИлиНомер.Листа) = Тип("Число") Тогда
// проверяем, чтобы номер листа был не меньше единицы
Если ИмяИлиНомер.Листа < 1 Тогда
Сообщить("Ошибка в параметре. Номер листа не может быть меньше единицы");
Возврат Неопределено;
КонецЕсли;
// получаем массив всех листов в книге Excel
    
```

**Рисунок 5 – Фрагмент алгоритма извлечения данных из MS EXCEL в среду 1С
(составлено автором)**

Для того, чтобы исключить необходимость обращения к специалистам и предоставить возможность пользователю самостоятельно получать из МХД информацию и обрабатывать ее, используя язык предметной области, разработан алгоритм создания юниверса (рисунок 6) [13].

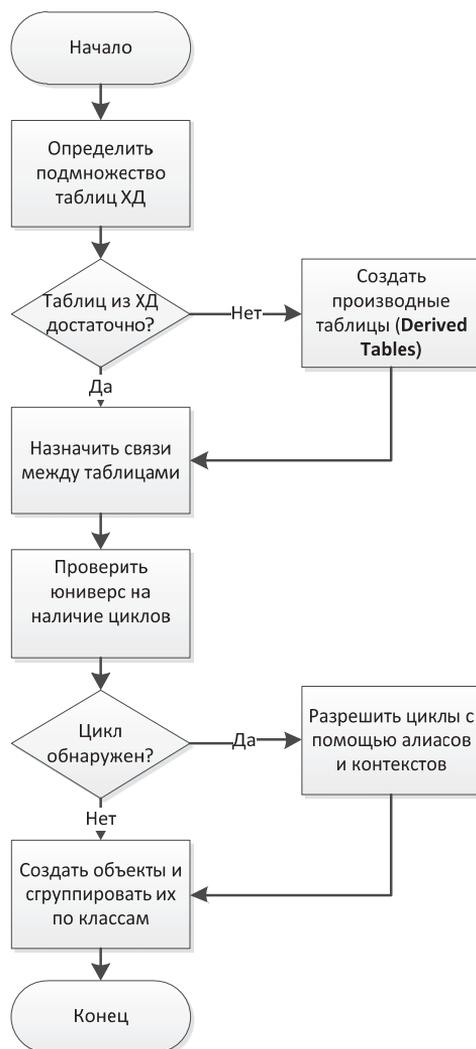


Рисунок 6 – Алгоритм создания юниверса

«Юниверс» в переводе на русский язык – «мир», «вселенная». Суть юниверса – простое представление необходимой пользователям части хранилища данных, то есть понятной всем пользователям, независимо от их уровня квалификации, всему «миру», всей «вселенной». Исторически прижился термин «юниверс». Если название «алгоритм построения юниверса» заменить на название «алгоритм построения вселенной», то это может быть воспринято весьма неоднозначно.

Методика проектирования адаптивной системы поддержки принятия решений основана на разработанных автором алгоритмах структуризации и визуализации многомерных кубов данных, построения архитектурного плана куба данных, построения юниверса.

Шаг 1. Выбор параметров куба данных: типа данных, календарного периода, оцениваемых системой показателей эффективности работы.

Шаг 2. Выбор количества измерений куба данных.

Шаг 3. Создание таблицы подключения к кубу в выбранной среде разработки.

Шаг 4. Структуризация и визуализация показателей многомерных кубов данных.

Шаг 6. Физическое проектирование многомерного хранилища данных, определение запросов и количества элементов обслуживания для обработки запросов.

Шаг 7. Расчет параметров обслуживания запросов (коэффициент использования ЭО, вероятность использования первого ЭО, вероятность отказа в обслуживании запроса, среднее количество запросов в системе в зависимости от различной нагрузки)

Шаг 8. Выбор средств для управления средой разработки.

Шаг 9. Разработка юниверса (простого представления необходимой пользователям части хранилища данных).

Шаг 10. Объединение данных в единую структуру с помощью связей.

Шаг 11. Определение структурных ошибок в физической модели хранилища данных и корректировка.

Проведена оценка увеличения количества обрабатываемых запросов. В системе поддержки принятия решений о ключевых показателях эффективности сотрудников предприятия были реализованы различные запросы. Анализировались статистические данные, характеризующие пользователей, заказавших определенные услуги исследуемого предприятия через его сайт. Эти статистические данные изображены в виде гистограммы, представленной на рисунке 7.

Для обработки статистических данных, поступивших на вход системы, использовался простой запрос по отбору пользователей.

Затем была оценена производительность при выполнении запросов с использованием элементов обслуживания с адаптацией и без этих элементов. Было проанализировано двадцать две серии входных данных и их обработка с помощью запросов. Результаты увеличения производительности показаны на рисунке 8.

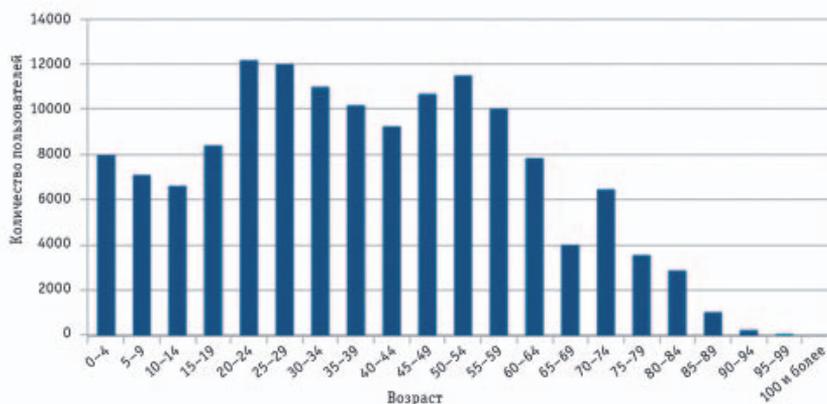


Рисунок 7 – Пример статистических данных о пользователях информационной системой предприятия, визуализированных с помощью гистограммы

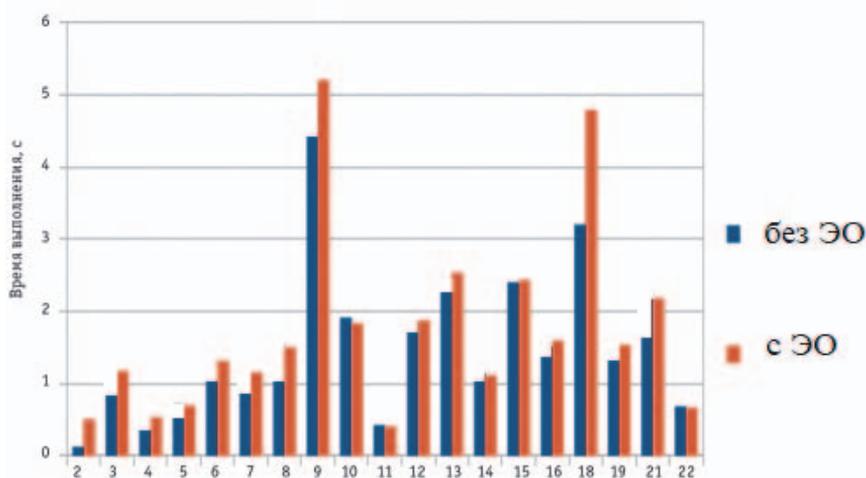


Рисунок 8 – Производительность при выполнении запросов пользователей (составлено автором)

Данные рисунка 8 позволяют сделать вывод о том, что время выполнения запроса с использованием ЭО с адаптацией уменьшается, особенно для запросов с большим временем обработки. В среднем, время на выполнение запроса уменьшается на 18%, следовательно, производительность обработки запросов увеличивается на 18%.

Результаты этого исследования были получены в ходе выполнения научной исследовательской опытно-конструкторской работы кафедры информационных технологий и управляющих систем «Расчет параметров системы управления обработкой больших данных», проведенной в 2020 году [14].

Заключение

1) На основе метода пошаговой детализации и метода графического представления данных разработаны алгоритм структуризации и визуализации показателей многомерных кубов данных и алгоритм построения архитектурного плана куба. Алгоритм структуризации и визуализации показателей отличается от существующих методов и способов представления многомерных данных тем, что показывает возможности обработки и визуализация показателей с помощью отечественных компьютерных сред. Алгоритм для построения архитектурного плана куба отличается от существующих планов тем, что имеет менее громоздкую структуру и показывает не только идентификацию информационных объектов (выделение ключевых наборов атрибутов для определенного вида объектов), но и количество измерений (количество осей многомерного куба), а также сведения о среде разработки и среде управления процессами разработки изделия.

2) Разработанный алгоритм построения юниверса осуществляет простое представление необходимой пользователям части хранилища данных, то есть понятной независимо от их уровня квалификации.

3) Разработанная на основе алгоритмов методика проектирования адаптивных систем поддержки принятия решений позволяет создать систему, которая

отличается от существующих тем, что она исключает необходимость обращения к специалистам, предоставляет возможность пользователю самостоятельно получать из хранилища данных информацию и обрабатывать ее, используя язык предметной области.

4) Производительность обработки запросов увеличилась на 18% по сравнению с существующими методами обработки запросов неадаптивных систем поддержки принятия решений.

Литература

1. Тиханьчев О.В. Теория и практика автоматизации поддержки принятия решений // М.: Эдитус. 2018. 76 с.
2. Акушко Д.В. OLAP-технологии как инструментарий поддержки принятия решений // Литье и металлургия. 2017. № 2 (87). С. 51-53.
3. Агеева А.Ф. Обзор современных систем поддержки принятия решений, созданных при помощи агентного подхода // Электронные информационные системы. 2018. № 4 (19). С. 29-46.
4. Артюшенко В.М., Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Пути наращивания эффективности инфокоммуникационных систем: монография / Под научной редакцией А.Б. Семенова // Москва. 2019. 232 с.
5. Аббасова Т.С. Задачи оптимизации инфокоммуникационных систем // Информационно-технологический вестник. 2018. № 3 (17). С. 55-65.
6. Kimball R., Ross M. The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling Third Edition // Published by John Wiley & Sons. Inc., Indianapolis, Indiana. Published simultaneously in Canada. 2013. 564 с.
7. Акимкина Э.Э. Оптимизация обработки данных в системах поддержки принятия решений с элементами обслуживания // Вестник ВГУ, серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 2. С. 79-85.
8. Аббасов Э.М., Акимкина Э.Э. Достижение максимальной производительности при работе с крупными хранилищами данных // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2016. № 6-1. С. 8-15.
9. Артюшенко В.М., Акимкина Э.Э. Имитационная модель адаптивной системы поддержки принятия решений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2018. № 2. С. 46-56.
10. Акимкина Э.Э. Структуризация и визуализация показателей в многомерных кубах данных // Информационно-технологический Вестник. 2018. № 4 (18). С. 79-87.
11. Узденёва, Т.А. Система поддержки принятия решений, интегрированная с «1С: Предприятие» // Молодой ученый. 2011. Т. 1/ № 3. С. 105-107.
12. Акимкина Э.Э. Рекомендации по развертыванию многомерных систем аналитической обработки данных // Информационно-технологический вестник. 2017. № 5(11). С. 68-80.
13. Акимкина Э.Э., Самаров К.Л., Васильев Н.А., Белюченко И.М. Оценка эффективности обслуживания клиентов в контексте системного анализа // Вопросы региональной экономики. 2016. № 2 (27). С. 123-134.
14. Расчет параметров системы управления обработкой больших данных: отчет о НИОКР / Акимкина Э.Э. // Королев: ГБОУ ВО «МГОТУ». 2020. 65 с.

УДК 621.396.96:621.26

Моделирование оценки влияния мультипликативных помех на разрешающую способность сигналов по критерию Вудворда в авиационных и ракетно-космических радиосистемах

В.М. Артюшенко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область,

В.И. Воловач, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования, Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

Рассмотрены и проанализированы алгоритмы моделирования влияния квазидетерминированных и флуктуационных мультипликативных помех на разрешающую способность систем обработки радиосигналов по задержке и частоте на основе критерия Вудворда. Показано, что при очень широкополосных мультипликативных помехах интервал разрешения по времени определяется только огибающей сигнала и не зависит от его фазовой структуры. Для сигналов с прямоугольной и колоколообразной огибающей он равен эквивалентной длительности сигнала. Приведены примеры вычисления интервалов разрешения при воздействии мультипликативных помех.

Алгоритмы моделирования, радиотехнические системы, быстрые и медленные мультипликативные помехи, разрешающая способность.

Modeling of the influence of multiplicative interference on the resolution the ability of signals according to the Woodward criterion in aviation and rocket and space applications radio systems

V.M. Artyushenko, doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department of information technologies and control systems, State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,

V.I. Volovach, doctor of technical Sciences, associate Professor, head of the Department «Information and electronic service»,

State budgetary educational institution of higher education

Volga region state University of service, Tolyatti

The influence of quasi-deterministic and fluctuating multiplicative noise on the resolution of radio signal processing systems in terms of delay and frequency based on the Woodward criterion is considered and analyzed. It is shown that for very wide-

band multiplicative interference, the time resolution interval is determined only by the envelope of the signal and does not depend on its phase structure. For rectangular and bell-shaped envelope signals, it is equal to the equivalent signal duration. Examples of calculation of resolution intervals under the influence of multiplicative interference are given.

Simulation algorithm, radio systems, fast and slow multiplicative interference, resolution.

Введение. Для широкого класса радиосистем, наряду с первичными характеристиками, определяющими качество их работы, такими как вероятность обнаружения сигнала и точность измерения его параметров, являются показатели, определяющие возможности раздельно обнаруживать или измерять параметры сигналов, отклики которых на выходе приемного устройства системы оказываются близко расположенными. Задача разрешения раздельного наблюдения или измерения параметров сигналов возникает, например, в радиолокации при наблюдении двух или нескольких близко расположенных целей. В этом случае сигналы всех целей являются полезными. При работе других радиосистем может возникнуть задача разрешения нескольких сигналов, один из которых является полезным, а другие мешающими. Мешающие сигналы могут создаваться другими однотипными радиосредствами и системами, работающими в непосредственной близости от рассматриваемой радиосистемы.

Заметим, что во многих случаях, когда в отсутствии мультипликативных (модулирующих) помех (МП) не возникают задачи разрешения, так как взаимное влияние сигналов друг на друга и на работу системы по каждому сигналу в отдельности несущественно, при наличии МП такое взаимное влияние может оказаться весьма заметным. Это связано с тем, что в сигналах, искаженных МП, появляется помеховая составляющая, которая может создавать выходной эффект приемника при тех значениях параметров сигнала, время прихода, смещение частоты, при которых в отсутствии МП выходной эффект пренебрежительно мал.

Влияние МП на разрешающую способность систем, линейная часть приемного устройства которых включает фильтр, согласованный с неискаженным сигналом, обусловлено также снижением мощности выходного сигнала по отношению к мощности аддитивных помех (АП).

Простейший критерий количественной оценки разрешающей способности был введен Релеем применительно к задачам теории оптических приборов. В соответствии с этим критерием два одинаковых точечных источника считаются разрешенными, если суммарный отклик прибора по соответствующей координате, параметру l , имеет два максимума. Очевидно, интервал между откликами, интервал разрешения, при котором выполняется сформулированное выше условие, совпадает с определенной соответствующим образом шириной отклика прибора. Впервые применительно к радиосигналам релеевский критерий разрешающей способности был рассмотрен Ф. Вудвордом [3].

Форма сигнала на выходе приемного устройства, оптимального при приеме неискаженного сигнала на фоне белого шума, по параметру l определяется функцией автокорреляции сигнала по этому параметру $\rho(l)$. Поэтому релеев-

ская характеристика разрешающей способности совпадает с шириной главного пика модуля функции автокорреляции. Часто интервал разрешения определяют по ширине квадрата модуля функции автокорреляции. Практически оба способа определения интервала разрешения эквивалентны.

В качестве меры интервала разрешения мы будем использовать ширину квадрата модуля функции автокорреляции. Количественно ширина главного пика квадрата модуля функции автокорреляции, интервал разрешения l_p , может оцениваться различным способом, например по некоторому, определенным образом заданному, уровню или по ширине эквивалентного по площади прямоугольника. Наибольшее распространение нашел второй метод оценки как в связи с простотой определения, так и в связи с однозначностью получаемых количественных результатов [2, 3]. При наличии флуктуационных МП, выходной сигнал приемного устройства представляет собой реализацию нестационарного случайного процесса. Следовательно, интервал разрешения может быть определен лишь в статистическом смысле, например, эквивалентная ширина функции, описывающая зависимость средней мощности выходного сигнала приемника от параметра l .

Критерий Вудворда. При оценке разрешающей способности он является в определенной мере условным и имеет смысл лишь применительно к разрешению сигналов одинаковой интенсивности. При выделении слабого сигнала на фоне сильного необходимо учитывать поведение функции автокорреляции сигнала $\rho(l)$ при всех значениях интервала Δl между сигналами, а не только в окрестностях главного пика функции автокорреляции $\Delta l \leq L$, где L – полная протяженность сигнала по параметру l . Это обстоятельство становится особенно важным при наличии МП. За счет воздействия МП, выходной сигнал приемного устройства уменьшается, а относительный уровень мощности сигнала за пределами его главного максимума возрастает. Поэтому при наличии МП увеличивается взаимное влияние сигналов за пределами главного максимума автокорреляционной функции искаженного сигнала. Помимо этого, критерию Вудворда присущ еще один недостаток. Он заключается в том, что этот критерий не позволяет учесть влияние АП на характеристики разрешения.

При использовании критерия Вудворда для количественной оценки разрешающей способности при наличии МП возникают дополнительные ограничения, связанные со спецификой данной задачи – наличием в сигнале, искаженном МП, двух составляющих. Отклик, создаваемый неискаженной частью сигнала, имеет ту же ширину по параметру разрешения, что и отклик приемного устройства на неискаженный сигнал.

Ширина отклика, создаваемого помеховой составляющей, может быть существенно больше. В тех случаях, когда распределение полной мощности сигнала, искаженного МП, на выходе линейной части приемного устройства по параметру l , суммы мощности неискаженной части и помеховой составляющей сигнала, не имеет резкого «выброса» в окрестностях точек, где располагаются неискаженные сигналы, использование критерия Вудворда для оценки влияния МП на характеристики разрешения не встречает затруднений. Это имеет место при следующих предположениях относительно энергетических характеристик сигнала на выходе линейной части приемного устройства:

- мощность неискаженной части сигнала мала по сравнению с мощностью помеховой составляющей $\sigma_s^2(l)$ в точке, где неискаженная часть достигает максимума;

- функция $\sigma_s^2(l)$ является достаточно гладкой и выпуклой на интервале, не меньшем, чем эквивалентная ширина этой функции.

В тех случаях, когда одно или оба из сформулированных условий не выполняются, применение критерия Вудворда может дать ошибочные результаты.

Хотя приведенные выше условия существенно ограничивают возможности применения критерия Вудворда при анализе влияния МП на условия разрешения сигналов, этот критерий удобен благодаря своей простоте. В тех случаях, когда сформулированные условия выполняются, он позволяет получить простые соотношения, пригодные для инженерных оценок. Рассмотрим и проанализируем влияние МП на разрешающую способность радиосистем по критерию Вудворда.

Моделирование оценки влияния МП на разрешающую способность по критерию Вудворда. Рассмотрим влияние квазидетерминированных и флуктуационных МП на разрешающую способность систем обработки радиосигналов по задержке τ и частоте ω на основе критерия Вудворда.

В отсутствие МП интервалы разрешения по задержке и частоте могут быть найдены исходя из выражений:

$$\tau_{p.0} = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{\rho}(\tau, 0)|^2 d\tau; \quad (1)$$

$$\omega_{p.0} = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{\rho}(0, \omega)|^2 d\omega, \quad (2)$$

где $\dot{\rho}(\tau, \Omega)$ – автокорреляционная функция сигнала.

Выражения (1), (2) определяют интервалы разрешения как ширину прямоугольника единичной высоты, эквивалентного по площади функции $|\dot{\rho}(\tau, 0)|^2 (|\dot{\rho}(0, \omega)|^2)$.

При наличии МП, квазидетерминированных или флуктуационных, имеет смысл говорить лишь о средних по ансамблю значениях величин, входящих в выражения (1), (2).

Заметим, что при наличии МП использование критерия Вудворда возможно лишь в тех случаях, когда уровень мощности неискаженной части сигнала мал по сравнению с мощностью помеховой составляющей сигнала при том значении параметра τ или ω , при котором неискаженная часть сигнала достигает максимума, а функция $\sigma_s^2(\tau, \omega)$, описывающая распределение мощности помеховой составляющей на плоскости τ, ω , является гладкой. При этом неискаженной частью сигнала можно пренебречь, а интервалы разрешения определять как эквивалентную ширину области, занимаемой помеховой составляющей. Тогда по аналогии с (1), (2) запишем соотношения для определения интервалов разрешения по задержке и частоте при наличии МП:

$$\tau_{p.м} = \frac{1}{\sigma_s^2(0,0)} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_s^2(\tau, 0) d\tau;$$

$$\omega_{p.м} = \frac{1}{\sigma_s^2(0,0)} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_s^2(0, \omega) d\omega, \quad (3)$$

где $\sigma_s^2(\tau, \omega)$ – дисперсия помеховой составляющей сигнала на выходе линейной части приемного устройства.

В выражении (3) предполагается, что функция $\sigma_s^2(\tau, \omega)$ имеет единствен-

ный максимум, совпадающий по обеим координатам с максимумом функции $|\dot{\rho}(\tau, \omega)|^2$. Последнее условие очевидно выполняется, если энергетический спектр функции помеховой модуляции $\dot{M}(t)$, симметричен относительно нуля.

Здесь $\dot{M}(t) = \eta(t)\exp\{i\varphi(t)\}$ – функция помеховой модуляции (ФПМ), полностью характеризующая паразитную модуляцию сигнала; $\eta(t) = \eta_0[1 + \xi(t)] \geq 0$ – безразмерный множитель, характеризующий изменения огибающей сигнала, вызванные МП (амплитудные искажения); η_0 – математическое ожидание $\eta(t)$; $\xi(t)$ – стационарный случайный процесс с нулевым средним, $[1 + \xi(t)] \geq 0$; $\varphi(t)$ – изменения фазы сигнала, вызванные МП (фазовые искажения)

Заметим, что корреляционная функция $\dot{M}(t)$ – действительная функция.

При весьма узкополосных МП, когда имеет место предельное соотношение

$$\sigma_s^2(\tau, \Omega) = 0,5 C^2 E^2 (\bar{\eta}^2 - \alpha_0^2) |\dot{\rho}(\tau, \Omega)|^2,$$

как и следовало ожидать, (3) переходит в (1), (2).

Здесь $\Omega = \omega_c - \omega_0$ – расстройка неискаженного флуктуационной МП сигнала $u(t)$, с несущей частотой ω_c , по отношению к частоте настройки фильтра ω_0 ; C – постоянный коэффициент, зависящий от коэффициента усиления фильтра; E – энергия сигнала; α_0 – характеризует часть сигнала неискаженного флуктуационной МП; $\dot{\rho}(\tau, \Omega)$ – автокорреляционная функция сигнала.

Прямая черта сверху, означает усреднении по множеству.

Выразим интервалы разрешения сигналов, искаженных МП, по времени прихода и частоте (3) непосредственно через характеристики входных сигналов и характеристики ФМП.

Математическое моделирование интервалов разрешения по частоте.

В соответствии с (3), для определения интервалов по частоте, прежде всего необходимо рассмотреть интеграл вида

$$I_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_s^2(0, \omega) d\omega.$$

Учитывая общее выражение для дисперсии флуктуаций сигнала, искаженного флуктуационной МП, на выходе линейной части приемного устройства, согласованного с неискаженным сигналом, для I_1 получим

$$I_1 = \frac{C^2 E^2}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) |\dot{\rho}(0, \omega + \Omega)|^2 d\Omega d\omega,$$

где $G_V(\Omega)$ – энергетический спектр флуктуаций ФПМ.

Поскольку, по определению,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{\rho}(0, \omega + \Omega)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{\rho}(0, x)|^2 dx = \omega_{p,0},$$

то при условии, что МП не изменяют средней мощности сигнала ($\overline{\eta^2(t)} = 1$), с учетом выражения [2]

$$G_V(0) = \frac{2\pi(1-\alpha_0^2)}{\Delta\Omega_M},$$

где $\Delta\Omega_M$ – эквивалентная ширина спектра флуктуаций ФПМ, имеем

$$I_1 = \frac{C^2 E^2}{4\pi} (1 - \alpha_0^2) \omega_{p,0}.$$

При этом для интервала разрешения сигналов по частоте при наличии МП $\omega_{p,m}$ получается весьма простое выражение

$$\omega_{p.m} = \frac{\omega_{p.0}(1-\alpha_0^2)}{2\delta_1^2(0,0)}, \quad (4)$$

где

$$\delta_1^2(\tau, \Omega) = \frac{\sigma_s^2(\tau, \Omega)}{c^2 E^2} \quad (5)$$

– нормированная дисперсия помеховой составляющей сигнала, определяемая выражением

$$\delta_1^2(\tau, \Omega) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\omega) |\dot{\rho}(\tau, \Omega + \omega)|^2 d\omega.$$

Величина $\delta_1^2(0,0)$ может быть просто выражена через характеристики ФПМ и огибающей сигнала при медленных и быстрых МП. В случае медленных МП, имеем

$$\delta_1^2(0,0) \simeq \text{Re} \left\{ a_0(0,0) \dot{B}_V(0) + a_1(0,0) \dot{B}'_V(0) + \frac{1}{2} a_2(0,0) \dot{B}''_V(0) \right\}. \quad (6)$$

где $\dot{B}'_V(\tau)$ – производные корреляционной функции флуктуаций ФПМ;

$$a_0(0,0) = |\dot{\rho}(0,0)|^2; a_1(0,0) = j2\text{Re} \left\{ \dot{\rho}(0,0) \frac{\partial}{\partial \Omega} \rho^*(0, \Omega) \right\}_{\Omega=0};$$

$$a_2(0,0) = -2\text{Re} \left\{ \dot{\rho}(0,0) \frac{\partial^2}{\partial \Omega^2} \rho^*(0, \Omega) \right\}_{\Omega=0} - 2 \left| \frac{\partial}{\partial \Omega} \dot{\rho}(0, \Omega) \right|_{\Omega=0}^2.$$

Учитывая, что $\dot{\rho}(0,0) = 1$, а для сигналов с четными огибающими при соответствующем выборе начала отсчета

$$\frac{\partial}{\partial \Omega} \dot{\rho}(0, \Omega) \Big|_{\Omega=0} = 0; \frac{\partial^2}{\partial \Omega^2} \dot{\rho}(0, \Omega) \Big|_{\Omega=0} = -\bar{t}^2,$$

где \bar{t}^2 – среднеквадратическая длительность сигнала [6], вместо (6) получим

$$2\delta_1^2(0,0) \simeq \dot{B}_V(0) + \bar{t}^2 \dot{B}''_V(0).$$

Полагая корреляционную функцию флуктуаций ФПМ $\dot{B}'_V(\tau)$ действительной функцией, искажения амплитуды и фазы принимаемого сигнала независимы, при принятой нормировки полной мощности сигнала, искаженного МП ($|\dot{M}(t)|^2 = 1$), имеем

$$\dot{B}_V(0) = 1 - \alpha_0^2; \dot{B}''_V(0) = -(1 - \alpha_0^2) \overline{\Delta \Omega_M^2}; \omega_{p.m} \simeq \frac{\omega_{p.0}}{1 - \Delta \Omega_M^2 \bar{t}^2}, \quad (7)$$

где $\Delta \Omega_M^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_V(\Omega) d\Omega / \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) d\Omega$ – среднеквадратическая ширина спектра ФПМ.

В случае быстрых МП в выражении

$$\delta_1^2(0,0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) |\dot{\rho}(0, \Omega)|^2 d\Omega, \quad (8)$$

входящем в общую формулу для $\omega_{p.m}$ (4), функция $G_V(\Omega)$ изменяется гораздо медленнее, чем $|\dot{\rho}(0, \Omega)|^2$.

Разлагая $G_V(\Omega)$ в ряд Тейлора в окрестностях точки $\Omega = 0$ и ограничиваясь тремя членами разложения, получим для случая, когда $G_V(\Omega) = G_V(-\Omega)$ [$G'_V(0) = 0$],

$$\omega_{p.m} \simeq \frac{\Delta \Omega_M}{1 + \frac{1}{2} \omega_{p.0}^2 G''_{V.0}(0)}, \quad (9)$$

где

$$\omega_{p.0}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |\dot{\rho}(0, \omega)|^2 d\omega / \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{\rho}(0, \omega)|^2 d\omega;$$

$$G_{V.0}(\Omega) = (G_V(0))^{-1} G_V(\Omega).$$

По мере увеличения ширины спектра ФПМ $\Delta\Omega_M$ функция $G_V''(0)$ монотонно убывает, если $G_V(\Omega)$ – гладкая выпуклая функция. При этом, как видно из (9), интервал разрешения $\omega_{p,m}$ стремится к $\Delta\Omega_M$, то есть разрешающая способность по частоте определяется шириной спектра ФПМ.

Заметим, что выражение (9) позволяет в общем виде оценить пределы справедливости такого вывода – установить значение $\Delta\Omega_M$, при котором $\omega_{p,m} \simeq \Delta\Omega_M$.

Математическое моделирование интервалов разрешения по времени.

При определении интервалов разрешения по времени в соответствии с (2.3) и выражением

$$\sigma_s^2(\tau, \Omega) = \frac{C^2 E^2}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\omega) |\dot{\rho}(\tau, \Omega + \omega)|^2 d\omega = C^2 E^2 \delta_1^2(\tau, \Omega),$$

где $\delta_1^2(\tau, \Omega) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\omega) |\dot{\rho}(\tau, \Omega + \omega)|^2 d\omega$ – нормированная дисперсия, необходимо рассмотреть интеграл

$$I_2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) |\dot{\rho}(\tau, \Omega)|^2 d\Omega d\omega.$$

Представляя $|\dot{\rho}(\tau, \Omega)|^2$ в виде двойного интеграла от комплексных огибающих сигнала по t_1 и t_2 , проведя последовательно интегрирование по τ и Ω , а затем после замены переменных $t_1 = t$, $t_1 - t_2 = x$, интегрируя по t , получим выражение для I_2 в виде однократного интеграла:

$$I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} B_V(x) |\dot{\rho}(x, 0)|^2 dx. \tag{10}$$

Подстановка (10) в (3) дает искомое выражение интеграла разрешения по времени при наличии МП

$$\tau_{p,m} = \int_{-\infty}^{\infty} B_V(\tau) |\dot{\rho}(\tau, 0)|^2 d\tau / 2\delta_1^2(0,0), \tag{11}$$

где $\delta_1^2(0,0)$ определяется выражением (5).

Произведем оценку влияния МП на интервалы разрешения по времени для сигналов у которых $|\dot{\rho}(\tau, \Omega)| = p(\tau)r(\Omega)$, где $p(\tau)$ – плотность вероятности случайной величины τ ; $r(\Omega)$ – коэффициент корреляции Ω . Для сигналов такого типа $I_2 = 2\tau_{p,0}\delta_1^2(0,0)$. Подставляя приведенное выражение в (3), нетрудно убедиться, что $\tau_{p,m} = \tau_{p,0}$, то есть МП не влияют на интервалы разрешения по времени при использовании сигналов, функция автокорреляции которых может быть представлена в виде $|\dot{\rho}(\tau, \Omega)| = p(\tau)r(\Omega)$. Такой функцией автокорреляции обладают, в частности, колокольные импульсные сигналы с постоянной частотой заполнения, а также с некоторым приближением импульсные сигналы с прямоугольной огибающей и постоянной частотой заполнения, сигналы с шумовой модуляцией и фазокодовой манипуляцией при больших значениях произведения ширины спектра на длительность сигнала [1, 4, 5].

При медленных МП корреляционную функцию $B_V(\tau)$, входящую в (11), можно представить рядом Тейлора в окрестностях точки $\tau = 0$ и ограничить первыми членами разложения, поскольку она изменяется медленнее, чем $|\dot{\rho}(\tau, 0)|^2$. Тогда с учетом (7), (8) получим

$$\tau_{p,m} \simeq \tau_{p,0} \frac{1 - \frac{1}{2}\Delta\Omega_M^2 \tau_{p,0}^2}{1 - \Delta\Omega_M^2 t^2}, \tag{12}$$

где

$$\overline{\tau_{p,0}^2} = \int_{-\infty}^{\infty} \tau^2 |\dot{\rho}(\tau, 0)|^2 d\tau / \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{\rho}(\tau, 0)|^2 d\tau = \frac{1}{\tau_{p,0}} \int_{-\infty}^{\infty} \tau^2 |\dot{\rho}(\tau, 0)|^2 d\tau.$$

В случае быстрых МП путем разложения в ряд Тейлора функции автокорреляции сигнала $\dot{\rho}(\tau, 0)$, которая изменяется гораздо медленнее, чем $B_V(\tau)$, из (11) с учетом (9) получим следующее приближенное выражение для интервала разрешения:

$$\tau_{p,м} \simeq \frac{2\pi}{\omega_{p,0}} \frac{1 - \overline{\tau_{k,V}^2} \Omega^2}{1 - \frac{1}{2} \omega_{p,0}^2 \overline{\tau_{k,V}^2}},$$

где

$$\overline{\tau_{k,V}^2} = \int_{-\infty}^{\infty} \tau^2 B_V(\tau) d\tau / \int_{-\infty}^{\infty} B_V(\tau) d\tau$$

– среднеквадратический интервал корреляции ФПМ; $\overline{\Omega^2}$ – среднеквадратическая ширина спектра сигнала.

При уменьшении интервала корреляции ФПМ, при увеличении ширины ее энергетического спектра, величина $\overline{\tau_{k,V}^2}$, как можно показать, монотонно стремится к нулю. В этом случае предельное значение интервала разрешения, при $\overline{\tau_{k,V}^2} \rightarrow 0$, определяется соотношением

$$\tau_{p,м} \simeq \frac{2\pi}{\omega_{p,0}}. \quad (13)$$

В соответствии с (2)

$$\omega_{p,0} = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{\rho}(0, \omega)|^2 d\omega = \frac{1}{4E^2} \iiint_{-\infty}^{\infty} U^2(t_1) U^2(t_2) \times$$

$$\times \exp\{j\omega(t_1 - t_2)\} dt_1 dt_2 d\omega,$$

где $U(t)$ – огибающая сигнала.

Учитывая, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\{j\omega(t_1 - t_2)\} d\omega = 2\pi\delta(t_1 - t_2),$$

из (13) и (14) получим

$$\tau_{p,м} \simeq \frac{4E^2}{\int_{-\infty}^{\infty} U^4(t) dt}.$$

Для сигналов с прямоугольными огибающими длительностью T : $2E = U^2 T$ и $\tau_{p,м} = T$. При колоколообразной огибающей сигнала $[U(t) = \exp\{-\pi t^2 / T^2\}]$ предельное значение интервала разрешения $\tau_{p,м}$ также определяется длительностью сигнала T .

Таким образом, при очень широкополосных МП интервал разрешения по времени определяется только огибающей сигнала и не зависит от его фазовой структуры. Для сигналов с прямоугольной и колоколообразной огибающей он равен эквивалентной длительности сигнала.

Примеры алгоритмов математического моделирования интервалов разрешения при воздействии МП. Математическое моделирование интервалов разрешения мы будем проводить в следующем порядке. Вначале определим интервалы разрешения при медленных и быстрых МП применительно к сигналам, заданным лишь формами своих огибающих и энергетических спектров, а затем на основе общих выражений (6) и (11) рассчитаем интервалы разрешения по частоте и времени прихода для конкретных зондирующих сигналов.

Рассмотрим сигнал, огибающая которого описывается функцией

$$U(t) = \begin{cases} \exp\left\{-\frac{\pi}{\Delta_T^2}\left(1 - \frac{T-\Delta_T}{2}\right)^2\right\}, & \infty > t > \frac{1}{2}(T - \Delta_T); \\ 1, & |t| \leq \frac{1}{2}(T - \Delta_T); \\ \exp\left\{\left\{-\frac{\pi}{\Delta_T^2}\left(1 + \frac{T-\Delta_T}{2}\right)^2\right\}\right\}, & -\infty < t < -\frac{1}{2}(T - \Delta_T), \end{cases} \quad (15)$$

а энергетический спектр - функцией

$$G_c(\omega) = \begin{cases} \exp\left\{-\frac{\pi}{\Delta_\omega^2}\left(\omega - \frac{\Delta\omega_c - \Delta\omega}{2}\right)^2\right\}, & \infty > \omega > \frac{1}{2}(\Delta\omega_c - \Delta\omega); \\ 1, & |\omega| \leq \frac{1}{2}(\Delta\omega_c - \Delta\omega); \\ \exp\left\{\left\{-\frac{\pi}{\Delta_\omega^2}\left(\omega + \frac{\Delta\omega_c - \Delta\omega}{2}\right)^2\right\}\right\}, & -\infty < \omega < -\frac{1}{2}(\Delta\omega_c - \Delta\omega), \end{cases} \quad (16)$$

где $T, \Delta\omega_c$ - соответственно, эквивалентная длительность и ширина спектра сигнала.

Введенные аппроксимации огибающих и энергетического спектра сигнала удобны тем, что позволяют описать путем изменения параметров $T, \Delta_T, \Delta\omega_c$ весьма широкий класс сигналов, близких к реальным. В частности, при $\Delta_T = 0$ выражение (15) описывает сигнал с прямоугольной огибающей, при $\Delta_T = T$ - сигнал с колоколообразной огибающей, при $0 < \Delta_T < T$ - сигналы, имеющие плоские вершины и фронты конечной длительности.

При описании сигналов с помощью соотношений (15), (16) необходимо учитывать, что огибающая и энергетический спектр радиоимпульсов с постоянной частотой заполнения однозначно связаны друг с другом через преобразование Фурье. Указанная связь отсутствует для широкополосных сигналов, для сигналов с внутриимпульсной угловой модуляцией. В связи с этим соотношения (15), (16)

особенно удобны для использования при оценке МП на условиях разрешения сигналов с внутриимпульсной угловой модуляцией.

Выразим параметры $\omega_{p,0}, \overline{\omega_{p,0}^2}, \tau_{p,0}, \overline{\tau_{p,0}^2}$, характеризующие свойства неискаженных сигналов в формулах (14), (9), (1), (12), через огибающую и энергетический спектр сигналов (15), (16).

Учитывая известные выражения для функции автокорреляции сигнала по задержке и частоте

$$\rho(0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U^2(t) \exp\{j\omega t\} dt / \int_{-\infty}^{\infty} U^2(t) dt;$$

$$\rho(\tau, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} G_c(\omega) \exp\{-j\omega\tau\} d\omega / \int_{-\infty}^{\infty} G_c(\omega) d\omega,$$

для интересующих нас параметров сигналов можно получить следующие соотношения:

$$\omega_{p,0} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} U^4(t) dt / \left[\int_{-\infty}^{\infty} U^2(t) dt\right]^2;$$

$$\overline{\omega_{p,0}^2} = -2\pi \int_{-\infty}^{\infty} U^2(t) [U^2(t)]'' dt / \left[\int_{-\infty}^{\infty} U^2(t) dt\right]^2, \quad (17)$$

$$\tau_{p,0} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} G_c^2(\omega) d\omega / \left[\int_{-\infty}^{\infty} G_c(\omega) d\omega\right]^2;$$

$$\overline{\tau_{p,0}^2} = -2\pi \int_{-\infty}^{\infty} G_c(\omega) G_c''(\omega) d\omega / \left[\int_{-\infty}^{\infty} G_c(\omega) d\omega\right]^2. \quad (18)$$

Подставляя (15), (16) в (17), (18) и далее в выражения для $\omega_{p,м}$ и $\tau_{p,м}$, по-

лучим:

– при медленных МП

$$\frac{\omega_{p,m}}{\omega_{p,0}} \simeq \left[1 - \frac{\Delta\Omega_M^2}{4\pi\sqrt{2}} \frac{T^2}{\delta T^3 + 2\sqrt{2}\delta T^2(1-\delta T) + \pi\delta T(1-\delta T)^2 + \frac{\pi\sqrt{2}}{3}(1-\delta T)^3} \right]^{-1},$$

$$\frac{\tau_{p,m}}{\tau_{p,0}} \simeq \frac{1 - \frac{1}{2}\Delta\Omega_M^2 \frac{\pi}{\Delta\omega_c^2 \delta\omega\sqrt{2}} \left[1 - \delta\omega \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right]^{-1}}{1 - \frac{\Delta\Omega_M^2}{4\pi\sqrt{2}} \frac{T^2}{\delta T^3 + 2\sqrt{2}\delta T^2(1-\delta T) + \pi\delta T(1-\delta T)^2 + \frac{\pi\sqrt{2}}{3}(1-\delta T)^3}}; \quad (19)$$

– при быстрых МП

$$\frac{\Delta\omega_{p,m}}{\Delta\Omega_M} \simeq \left[1 + \frac{1}{2} G''_{V,0}(0) \frac{\pi}{T^2 \delta T \left(1 - \frac{1}{2} \delta T \right)} \right]^{-1},$$

$$\tau_{p,m} \omega_{p,0} \simeq \frac{1 - \frac{1}{2} T_{k,V}^2 \frac{\Delta\omega_c^2}{2\pi} \left[\delta\omega^3 + 2\delta\omega^2(1-\delta\omega) + \frac{\pi}{2}\delta\omega(1-\delta\omega)^2 + \frac{\pi}{6}(1-\delta\omega)^3 \right]}{\frac{1}{2\pi} \left[1 - \frac{1}{2} T_{k,V}^2 \frac{\pi}{T^2 \delta T \left(1 - \frac{1}{2} \delta T \right)} \right]}, \quad (20)$$

где $\delta T = \Delta_T/T$; $\delta\omega = \Delta_\omega/\Delta\omega_c$.

В таблице 1 приведены выражения для $\omega_{p,m}$, $\tau_{p,m}$, полученные на основе (19), (20) для различных сочетаний прямоугольной и колоколообразной аппроксимации огибающих и спектров при условии, что спектр флуктуаций ФПМ имеет колоколообразную форму.

Таблица 1 – Выражения для различных сочетаний аппроксимации огибающих и спектров

Форма огибающей	Форма спектра	Медленные МП	Быстрые МП
Прямоугольная $\delta T = 0$	Любая	Интервалы разрешения по частоте	
		$\frac{\omega_{p,m}}{\omega_{p,0}} = \left(1 - \frac{\pi\xi^2}{6} \right)^{-1}$	-
Колоколообразная $\delta T = 1$	Любая	$\frac{\omega_{p,m}}{\omega_{p,0}} = \left(1 - \frac{\xi^2}{2} \right)^{-1}$	$\omega_{p,m} = \Delta\Omega_M \left(1 - \frac{1}{2\xi^2} \right)^{-1}$
Прямоугольная $\delta T = 0$	Колоколообразная $\delta\omega = 1$	Интервалы разрешения по времени	
		$\frac{\tau_{p,m}}{\tau_{p,0}} = \frac{1 - \frac{\xi^2}{4Q_y^2}}{1 - \frac{\pi\xi^2}{6}}$	-
Колоколообразная $\delta T = 1$	Колоколообразная $\delta\omega = 1$	$\frac{\tau_{p,m}}{\tau_{p,0}} = \frac{1 - \frac{\xi^2}{2Q_y^2}}{1 - \frac{1}{2}\xi^2}$	$\tau_{p,m} = \frac{2\pi}{\omega_{p,0}} \frac{2\xi^2 - Q_y^2}{2\xi^2 - 1} (\xi^2 \gg Q_y^2)$
Колоколообразная	Прямоугольная	-	$\tau_{p,m} = \frac{2\pi}{\omega_{p,0}} \frac{12\xi^2 - 2\pi Q_y^2}{12\xi^2 - 6} (\xi^2 \gg \frac{\pi}{6} Q_y^2)$

Заметим, что в некоторых графах таблицы 1 формулы отсутствуют, поскольку при прямоугольной огибающей сигнала $\overline{\omega_{p,0}^2} = \infty$, а при прямоугольном энергетическом спектре $\overline{\tau_{p,0}^2} = \infty$. В этих случаях необходимо пользоваться для вычисления $\tau_{p,0}$ и $\omega_{p,0}$ полными формулами: $Q_y = \Delta\omega_c T/2\pi$, $\xi = \Delta\Omega_M T/2\pi$.

Рассмотрим влияние МП на интервалы разрешения по времени и частоте для конкретных сигналов, узкополосных и широкополосных, используя для определения этих величин выражения (4), (3), (11). При вычислении будем полагать, что спектр флуктуаций ФПМ имеет колоколообразную форму.

Сигнал с постоянной частотой заполнения и колоколообразной огибающей. Подставляя выражение $\sigma_s^2(0, \Omega)$ для сигнала с колоколообразной огибающей, в (4), получим следующее соотношение для интервала разрешения по частоте:

$$\frac{\omega_{p.m}}{\omega_{p.o}} = \sqrt{1 + \xi^2}. \quad (21)$$

Нетрудно видеть, что при медленных и быстрых МП (21) совпадает с соответствующими выражениями, приведенными в таблице 1.

При сигналах с колоколообразной огибающей и постоянной частотой заполнения МП не влияют на интервалы разрешения по времени.

Линейно частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал. При колоколообразной огибающей сигнала, с учетом выражения для колоколообразного сигнала с постоянной частотой заполнения

$$\sigma_s^2(\tau, \Omega) = \frac{c^2 E^2 (\eta^2 - \alpha_0^2)}{2\sqrt{1+\xi^2}} \exp\left\{-\frac{\pi\tau^2}{T^2}\right\} \exp\left\{-\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi(1+\xi^2)}\right\},$$

опуская промежуточные математические вычисления, можно получить

$$\tau_{p.m} = \tau_{p.o} \frac{\sqrt{1+Q_y^2}\sqrt{1+\xi^2}}{\sqrt{1+\xi^2+Q_y^2}}. \quad (22)$$

Нетрудно видеть, что выражение (22) при $Q_y^2 \gg (1 + \xi^2)$ с точностью до постоянного множителя переходит в (21), что совершенно естественно, поскольку в функции автокорреляции ЛЧМ сигнала существует линейная связь между частотным и временным сдвигом.

В случае, когда ЛЧМ сигнал имеет прямоугольную огибающую, для вычисления интервала разрешения по времени прихода на основе выражения (3) можно использовать приближенное соотношение для $\sigma_s^2(0, \tau)$, справедливое уже при $\xi = \frac{1}{2\pi} \Delta\Omega_M T > 3$.

Тогда получим

$$\tau_{p.m} = \frac{1}{G_V(0)} \int_{-T}^T G_V\left(\frac{\tau Q_y}{T^2}\right) \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) d\tau. \quad (23)$$

Для случая колоколообразного спектра ФПМ

$$G_V(\Omega) = G_V(0) \exp\left\{-\frac{\pi\Omega^2}{\Delta\Omega_M^2}\right\},$$

из (23) получим

$$\tau_{p.m} = 2\tau_{p.o}\xi \left[\Phi\left(\frac{\sqrt{2\pi}Q_y}{\xi}\right) - \frac{\xi}{2\pi Q_y} \left(1 - \exp\left\{-\frac{\pi Q_y^2}{\xi^2}\right\}\right) \right], \quad (24)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt.$$

При $Q_y^2 \gg 1$ и $\xi/Q_y \ll 1$ из (24) получаем следующее приближенное соотношение:

$$\tau_{p.m} \simeq \tau_{p.o} \xi. \quad (25)$$

В этом случае (25) совпадает с (22).

Таким образом, при $Q_y^2 \gg \xi \geq 3$ влияние МП на интервал разрешения по задержке при использовании ЛЧМ сигналов не зависит от формы огибающей сигнала и определяется только шириной спектра ФПМ.

Фазоманипулированный (ФМ) сигнал с прямоугольной огибающей. Формально, после подстановки выражения

$$\frac{2\sigma_s^2(l\Delta t, 0)}{E^2(\eta^2 - \alpha_0^2)} \simeq \begin{cases} \frac{2\sigma_s^2(0, 0)}{E^2(\eta^2 - \alpha_0^2)}, & l = 0 \\ \frac{N - |l|}{N^2}, & |l| \leq N, \end{cases} \quad (26)$$

в (3) и необходимых вычислений получаем

$$\tau_{p.m} = \tau_{p.0} \left[1 + \frac{1 - \alpha_0^2}{2\delta_1^2(0, 0)} \right], \quad (27)$$

где $2\delta_1^2(0, 0)$ определяется выражением

$$\frac{2\sigma_s^2(l\Delta t, 0)}{E^2(\eta^2 - \alpha_0^2)} \simeq \frac{b}{2\xi} \Phi(\xi b \sqrt{\pi}) - \frac{1}{2\pi\xi^2} (1 - \exp\{-\pi\xi^2 b^2\}) - \frac{\pi b}{\xi} \left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega_M} \right)^2 \times \\ \times \left[\frac{1}{2} \Phi(\xi b \sqrt{\pi}) - \xi b \exp\{-\pi\xi^2 b^2\} \right] + \frac{1}{\xi} \left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega_M} \right)^2 [1 - (1 + \pi\xi^2 b^2) \exp\{-\pi\xi^2 b^2\}] + \dots,$$

при $\Omega = \tau = 0, b = 1$. Здесь $b = 1 - |\tau|/T$; $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp\{-t^2\} dt$ – интеграл вероятности; $l = \tau/\Delta t$; Δt – длительность одного элемента сигнала; $N = T/\Delta t$ – общее число элементов кода ФМ сигнала; Δt – интервал на котором фаза сигнала принимает значение 0 или π в зависимости от значения 0 или 1.

Заметим, что выражение (27), так же как (26), справедливо при $\xi \ll N$, причем, кроме того, предполагается $N \gg 1$.

Учитывая, что при $\xi > 3\delta_1^2(0, 0) \simeq \frac{1 - \alpha_0^2}{\xi}$, видим, что (27) совпадает с (25).

То есть критерий Вудворда указывает формально на одинаковое влияние МП на разрешающую способность по времени прихода как для ЧМ, так и для ФМ сигналов.

Однако использование критерия Вудворда при анализе влияния МП на условия разрешения ФМ сигналов при $\xi \ll N$ приводит к ошибочным результатам даже в тех случаях, когда неискаженная часть сигнала α_0^2 равна нулю.

Это связано с тем, что функция $\delta_1^2(\tau, 0)$ имеет ярко выраженный узкий выброс в точке $\tau = 0$, причем ширина указанного выброса равна $\tau_{p.0}$.

Таким образом, в данном случае даже при $\alpha_0^2 = 0$ не выполняется сформулированное выше условие применимости критерия Вудворда к оценке влияния МП на условия разрешения.

Отношение мощности помеховой составляющей выходного сигнала в точке $\tau = 0$ к ее мощности в точке $\tau = \tau_{p.0}$ в рассматриваемом примере, равно N/ξ , при $\xi > 3, N \gg 1$. Если указанное отношение велико, то два сигнала могут разрешаться уже при разности времени прихода, близкой к $\tau_{p.0}$. при прочих равных условиях сформулированное положение тем более справедливо, чем больше N , чем больше элементов кода образуют ФМ сигналы.

Отсюда следует, что критерий Вудворда для оценки интервала разрешения по времени прихода ФМ сигналов при наличии МП в общем случае использовать нельзя. Результаты, получаемые на основе этого критерия, имеют смысл

лишь в предельном случае, когда $\xi \simeq N$ и влиянием «выброса» функции $\delta_1^2(\tau, 0)$ в точке $\tau = 0$ можно пренебречь.

Выводы. Рассмотрены и проанализированы алгоритмы моделирования влияния мультипликативных помех на интервалы разрешения по времени и частоте для конкретных сигналов, узкополосных и широкополосных. Проанализировано влияние мультипликативных помех на сигнал с постоянной частотой заполнения и колоколообразной огибающей, на сигнал с линейно частотной модуляцией, а также на фазоманипулированный сигнал с прямоугольной огибающей. При вычислении считалось, что спектр флуктуаций функции помеховой модуляции имеет колоколообразную форму. Было показано, что влияние мультипликативных помех на интервал разрешения по задержке при использовании линейно частотно-модулированных сигналов не зависит от формы огибающей сигнала и определяется только шириной спектра функции помеховой модуляции. Было показано, что для оценки интервала разрешения по времени прихода фазоманипулированных сигналов при наличии мультипликативных помех критерий Вудворда в общем случае использовать нельзя.

Литература

1. Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М. и др. Вопросы статистической теории радиолокации. Под ред. Г.П. Тартаковского. Т.1 и 2 // М.: Сов. Радио. 1963 и 1964.
2. Владимиров В.И., Карпухин В.И., Кремер И.Я. Оценка влияния модулирующих помех на условия разрешения сигналов // Радиотехника и электроника. 1966. т. 11. № 8.
3. Вудворд Ф.М. Теория вероятности и теория информации с применением в радиолокации // М.: Сов. Радио. 1955. 128 с.
4. Докторов А.Л. Спектры и совместная корреляционная функция модуляции сигналов с фазовой манипуляцией // Электросвязь. 1966. № 7.
5. Фалькович С.Е. Прием радиолокационных сигналов на фоне флуктуационных помех // М.: Сов. Радио. 1961. 311 с.
6. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов // Изд-во иностранной литературы. 1963. 432 с.

УДК 621.396.96:621.26

Системный анализ оценки влияния мультипликативных помех на условия разрешения сигналов на основе статистического критерия с помощью математического моделирования

В.И. Воловач, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования,
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

Проведен системный анализ влияния мультипликативных помех на условия разрешения сигналов на основе статистического критерия с помощью математического моделирования. Показано, что интервалы разрешения по времени запаздывания и частотному сдвигу при известных статистических характеристиках сигналов, аддитивных и мультипликативных помех однозначно определяются вероятностями правильного и ложного разрешения.

Системный анализ, математическое моделирование, быстрые и медленные мультипликативные помехи, разрешающая способность.

System analysis of the assessment of the influence of multiplicative interference on the Conditions signal resolutions based on statistical criteria using mathematical modeling

V.I. Volovach, doctor of technical Sciences, associate Professor,
head of the Department «Information and electronic service»,
State budgetary educational institution of higher education
Volga region state University of service, Tolyatti

A system analysis of the influence of multiplicative interference on the signal resolution conditions based on a statistical criterion using mathematical modeling is performed. It is shown that the resolution intervals for delay time and frequency shift with known statistical characteristics of signals, additive and multiplicative interference are uniquely determined by the probabilities of correct and false resolution.

System analysis, mathematical modeling, fast and slow multiplicative interference, resolution.

Введение. Произведем системный анализ оценки влияния мультипликативных (модулирующих) помех (МП) на характеристики разрешения сигналов при их обработке в приемном устройстве, оптимальном при разрешении двух сигналов, в смысле обнаружения, на фоне аддитивных помех (АП) в виде белого шума [4, 5].

Полагаем, что на вход приемного устройства могут поступать два сигнала со случайными начальными фазами и неизвестными амплитудами, отличающиеся

ся по времени запаздывания на τ и частотному сдвигу на Ω . При этом априори известно, что один из сигналов, который в дальнейшем будем называть первым, с комплексной огибающей $\dot{U}_1(t)$ присутствует, а параметры его τ и Ω равны соответственно τ_0 и Ω_0 . Не нарушая общности можно положить $\tau_0 = 0$, $\Omega_0 = 0$. Второй сигнал с комплексной огибающей $\dot{U}_2(t - \tau, -\Omega)$ отличается от первого амплитудой, сдвигом τ по времени и смещением Ω по частоте, которые считаются известными. Одновременно с сигналами на входе приемного устройства присутствует аддитивный белый шум с комплексной огибающей $\dot{N}(t)$.

Если вероятность обнаружения сигнала 2 практически не зависит от наличия сигнала 1, то считается, что он разрешается относительно первого сигнала в смысле обнаружения [4]. Вероятность обнаружения сигнала 2 в указанном случае может служить количественной мерой разрешения двух сигналов, зависящей от параметров τ и Ω , уровня сигналов и помех. Будем называть их вероятностью разрешения P_p .

Приемное устройство, оптимальное при разрешении, в смысле обнаружения, сигнала 2 на фоне сигнала 1 и АП в виде белого шума, образует выходной эффект в виде [4, 5]

$$Z = \frac{1}{2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}_{\text{вх}}(t) Q^*(t) dt \right|, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{вх}}(t) &= \dot{U}_1(t) + \dot{U}_2(t - \tau, -\Omega) + \dot{N}(t) = \\ &= \sqrt{E_1} \dot{U}_0(t) + \sqrt{E_2} \dot{U}_0(t - \tau) \exp\{-j\Omega(t - \tau)\} + \dot{N}(t) \end{aligned}$$

– комплексная огибающая входной смеси двух сигналов и нормального белого шума $\dot{N}(t)$; $\dot{Q}(t)$ – комплексная огибающая опорного сигнала корреляционного приемника; $\dot{U}_0(t)$ – комплексная огибающая сигнала, отличающегося от принимаемого тем, что его энергия равна единице; E – энергия сигнала.

Заметим, что здесь и далее знак звездочку будет означать комплексно сопряженную величину.

Как было указано выше, вероятность разрешения сигнала 2 относительно сигнала 1 в принятой модели определяется вероятностью его обнаружения на фоне сигнала 1 и АП, то есть вероятностью превышения выходного эффекта Z некоторого порогового уровня Z_p , который выбирается исходя из заданной вероятности ложного обнаружения сигнала \dot{U}_2 при его отсутствии. Эта вероятность формально определяется так же, как вероятность ложной тревоги в теории обнаружения. Обозначим ее как F_p и будем в дальнейшем условно называть вероятностью ложной тревоги.

Мультипликативные помехи искажают оба принимаемых сигнала. При этом в общем случае функции помеховой модуляции (ФПМ) первого и второго сигналов могут быть различными. Обозначим эти функции соответственно $\dot{M}_1(t)$, $\dot{M}_2(t)$ и будем полагать их стационарными и стационарно связанными случайными функциями.

Заметим, что $\dot{M}(t) = \eta(t) \exp\{i\varphi(t)\}$ – ФПМ, полностью характеризующая паразитную модуляцию сигнала; $\eta(t) = \eta_0 [1 + \xi(t)] \geq 0$ – безразмерный множитель, характеризующий изменения огибающей сигнала, вызванные МП (амплитудные искажения); η_0 – математическое ожидание $\eta(t)$; $\xi(t)$ – стацио-

нарный случайный процесс с нулевым средним, $[1 + \xi(t)] \geq 0$; $\varphi(t)$ – изменения фазы сигнала, вызванные МП (фазовые искажения).

С учетом сказанного при наличии МП комплексная огибающая сигнала на входе рассматриваемого приемного устройства запишется в виде

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{вх.м}}(t) &= \dot{M}_1(t)\sqrt{E_1}\dot{U}_0(t) + \dot{M}_2(t)\sqrt{E_2}\dot{U}_0(t - \tau) \times \\ &\times \exp\{-j\Omega(t - \tau)\} + \dot{N}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

В дальнейшем рассмотрим случай, когда МП оказывают заметное влияние на вероятность разрешения, а в отсутствии МП сигналы 1 и 2 уверенно разрешаются. Нетрудно видеть, что при этом автокорреляционная функция сигнала $\dot{\rho}(\tau, \Omega)$ будет много меньше единицы $|\dot{\rho}(\tau, \Omega)| \ll 1$.

Оценка влияния МП на условия разрешения сигналов на основе статистического критерия. С учетом сформулированных условий опорный сигнал $\dot{Q}(t)$ при оценке влияния МП может быть приближенно записан в виде

$$\dot{Q}(t) \simeq \dot{U}_0(t - \tau)\exp\{-j\Omega(t - \tau)\}. \quad (3)$$

Подставляя (2) в (1) и учитывая (3), получим выражение для комплексной огибающей выходного эффекта линейной части рассматриваемого приемного устройства при наличии аддитивных и мультипликативных помех:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_m &= \frac{1}{2}\sqrt{E_2} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{M}_2(t)|\dot{U}_0(t - \tau)|^2 dt + \exp\{-j\Omega\tau\}\frac{1}{2}\sqrt{E_1} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \dot{M}_1(t) U_0(t)U_0^*(t - \tau)\exp\{j\Omega t\}dt + \exp\{-j\Omega\tau\} \times \\ &\times \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \dot{N}(t) U_0^*(t - \tau)\exp\{j\Omega t\}dt. \end{aligned} \quad (4)$$

В соответствии с (1) выходной эффект рассматриваемого приемного устройства при наличии МП определяется соотношением

$$Z_m = |\dot{Z}_m| = \sqrt{[\text{Re}\{\dot{Z}_m\}]^2 + [\text{Im}\{\dot{Z}_m\}]^2} = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Для нахождения вероятности разрешения P_p прежде всего необходимо определить статистические характеристики квадратурных составляющих x и y комплексной огибающей сигнала на выходе линейной части приемного устройства.

Учитывая, что $\overline{\dot{M}_1(t)} = \alpha_{01}\exp\{j\beta_{01}\}$, $\overline{\dot{M}_2(t)} = \alpha_{02}\exp\{j\beta_{02}\}$, где α_0, β_0 – соответственно, относительный уровень неискаженной части сигнала и его начальная фаза, и полагая $\beta_{01} = \beta_{02} = 0$, получим для среднего значения \dot{Z}_m следующее выражение:

$$\overline{\dot{Z}_m} = \text{Re}\overline{\dot{Z}_m} + j\text{Im}\overline{\dot{Z}_m} = \alpha_{02}\sqrt{E_2} + \alpha_{01}\sqrt{E_1}\exp\{-j\Omega\tau\}\dot{\rho}(\tau, \Omega). \quad (5)$$

Заметим, что дисперсия квадратурных составляющих и их взаимная корреляционная функция могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{1}{2}\text{Re}\overline{\dot{Z}'_0 Z_0''} + \frac{1}{2}\text{Re}\overline{\dot{Z}'_0 \dot{Z}_0''}; \\ \sigma_y^2 &= \frac{1}{2}\text{Re}\overline{\dot{Z}'_0 Z_0''} - \frac{1}{2}\text{Re}\overline{\dot{Z}'_0 \dot{Z}_0''}, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\dot{Z}'_0 = \dot{Z}'_m - \overline{\dot{Z}'_m}, \dot{Z}''_0 = \dot{Z}''_m - \overline{\dot{Z}''_m}.$$

Верхние индексы (штрихи) при \dot{Z}_m и \dot{Z}_0 указывают на различие переменных интегрирования в (4). То есть Z'_m определяется выражением (4) при переменном интегрировании t' , а Z''_m – при переменной t'' .

Если обозначить $\dot{Z}'_0 = \dot{b}'_1 + \dot{b}'_2 + \dot{b}'_3$, где \dot{b}'_i – соответствующие центрированные слагаемые правой части (4), то

$$\begin{aligned} \dot{Z}'_0 Z_0^{*''} &= \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 \dot{b}'_i b_k^{*''}; \\ \dot{Z}'_0 \dot{Z}''_0 &= \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 \dot{b}'_i \dot{b}''_k. \end{aligned} \quad (7)$$

После вычислений по формуле (7) получим

$$\begin{aligned} \overline{\dot{Z}'_0 Z_0^{*''}} &= 2E_2 \delta_{12}^2(0,0) + 2E_1 \delta_{11}^2(\tau, \Omega) + \\ &+ \sqrt{E_1 E_2} \operatorname{Re}\{\exp\{j\Omega\tau\} B_{s,21}(0, \tau, 0, \Omega)\} + N_0; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \overline{\dot{Z}'_0 \dot{Z}''_0} &= 2E_2 \delta_{22}^2(0,0) + 2E_1 \delta_{21}^2(\tau, \Omega) + \\ &+ \sqrt{E_1 E_2} \operatorname{Re}\{\exp\{-j\Omega\tau\} D_{s,21}(0, \tau, 0, \Omega)\}, \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \delta_{1i}^2(\tau, \Omega) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{Vi}(\omega) |\dot{\rho}(\tau, \Omega + \omega)|^2 d\omega; \\ \delta_{2i}^2(\tau, \Omega) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{G}_{Di}(\omega) \dot{\rho}(\tau, \Omega + \omega) \dot{\rho}(\tau, \Omega - \omega) d\omega; \\ B_{s,21}(0, \tau, 0, \Omega) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{V21}(\omega) \dot{\rho}(0, \omega) \rho^*(\tau, \Omega + \omega) d\omega; \\ D_{s,21}(0, \tau, 0, \Omega) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{G}_{D21}(\omega) \dot{\rho}(0, \omega) \dot{\rho}(\tau, \Omega - \omega) d\omega, \end{aligned} \quad (10)$$

где $G_{V1}(\omega)$ – энергетический спектр флуктуаций $\dot{M}_1(t)$; $G_{V21}(\omega)$ – взаимный энергетический спектр разностей $\dot{M}_1(t) - \alpha_{01} \exp\{j\beta_{01}\}$ и $\dot{M}_2(t) - \alpha_{02} \exp\{j\beta_{02}\}$; \dot{G}_{D21} – преобразование Фурье от функции

$$\dot{G}_{V21}(t_1 - t_2) = [\dot{M}_2(t_1) - \alpha_{02} \exp\{j\beta_{02}\}] [\dot{M}_1(t_2) - \alpha_{01} \exp\{j\beta_{01}\}].$$

Выражения для $\delta_{12}^2(\tau, \Omega)$, $\delta_{22}^2(\tau, \Omega)$, характеризующие сигнал 2, имеют вид, аналогичный $\delta_{11}^2(\tau, \Omega)$, $\delta_{21}^2(\tau, \Omega)$.

Анализируя выражения (6)-(10) видим, что комплексная огибающая сигнала на выходе анализируемого приемного устройства может рассматриваться как плоский вектор с коррелированными компонентами, имеющими разные дисперсии. Однако в тех случаях, когда МП приводят к значительному ухудшению условий разрешения, то есть при сравнительно быстрых и сильных МП, квадратурные составляющие x и y становятся некоррелированными случайными процессами, близкими к нормальным, с равными дисперсиями.

Аналогичные результаты получаются также в случаях, когда сами ФПМ $\dot{M}_1(t)$, $\dot{M}_2(t)$ являются стационарными нормальными случайными процессами. В обоих указанных случаях плотность вероятности выходного эффекта рассматриваемого приемного устройства Z_M можно считать обобщенной релеевской:

$$\begin{aligned} W(Z_M) &= \frac{Z_M}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{Z_M^2 + m^2}{2\sigma^2}\right\} I_0\left(\frac{mZ_M}{\sigma^2}\right) \\ &\text{с параметрами: } m = \operatorname{Re}\{\overline{\dot{Z}_M}\}, \text{ где } \overline{\dot{Z}_M} \text{ определяется из выражения (5), и} \\ \sigma^2 &= \sigma_x^2 = \sigma_y^2 = E_2 \delta_{12}^2(0,0) + E_1 \delta_{11}^2(\tau, \Omega) + \\ &+ \frac{1}{2} \sqrt{E_1 E_2} \operatorname{Re}\{\exp\{j\Omega\tau\} B_{s,21}(0, \tau, 0, \Omega)\} + N_0/2. \end{aligned} \quad (11)$$

Следует отметить, что при сравнительно быстрых МП, когда квадратурные компоненты x и y могут быть приняты нормальными, коэффициент взаимной корреляции сигналов $B_{s,21}(0, \tau, 0, \Omega)$ при тех значениях τ, Ω , при которых в отсутствие МП вероятность разрешения будет достаточно высокой, оказывается малым и третьим слагаемым в (11) по сравнению с двумя первыми слагаемыми

можно пренебречь. Тогда окончательно имеем

$$\sigma^2 = E_2 \delta_{12}^2(0,0) + E_1 \delta_{11}^2(\tau, \Omega) + N_0/2. \quad (12)$$

Вероятность разрешения второго сигнала относительно первого при наличии аддитивных и мультипликативных помех с учетом (3.11) будет

$$P_p = \int_{Z_{\text{п}}}^{\infty} \frac{Z_{\text{м}}}{\sigma^2} \exp \left\{ -\frac{Z_{\text{м}}^2 + m^2}{2\sigma^2} \right\} I_0 \left(\frac{mZ_{\text{м}}}{\sigma^2} \right) dZ_{\text{м}} = Q \left(\frac{m}{\sigma}, \frac{Z_{\text{п}}}{\sigma} \right), \quad (13)$$

где $Q \left(\frac{m}{\sigma}, \frac{Z_{\text{п}}}{\sigma} \right)$ – Q -функция; $Z_{\text{п}}$ – пороговое значение Z , которое определяется исходя из заданного уровня F_p вероятности ложной тревоги (ложного обнаружения) сигнала 2 на фоне сигнала 1 и помех.

При определении вероятности ложной тревоги можно принять распределение выходного эффекта Z простым релеевским ($m = 0$), тогда порог

$$Z_{\text{п}} = \sigma_1 \sqrt{2 \ln F_p^{-1}}, \quad (14)$$

$$\text{где } \sigma_1^2 = E_1 \delta_{11}^2(\tau, \Omega) + N_0/2.$$

Соотношения (13), (14) непосредственно можно использовать для оценки влияния МП на разрешение двух сигналов. Они показывают, что вероятность разрешения сигнала 2 определяется как вероятность обнаружения суммы неискаженной части и помеховой составляющей второго сигнала на фоне АП и помеховой составляющей первого сигнала в точке, где находится неискаженная часть второго сигнала.

В тех случаях, когда отношение мощности неискаженной части сигнала на выходе линейной части приемного устройства m^2 к мощности флуктуаций, обусловленных АП и МП, σ^2 (12) в точке нахождения сигнала 2 больше единицы, вероятность разрешения может быть выражена через широко известную и подробно табулированную функцию Лапласа (интеграл вероятности).

В [1] было показано, что справедлива асимптотическая формула

$$\int_y^{\infty} x \exp \left\{ -\frac{x^2 + s^2}{2} \right\} I_0(sx) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{u-k}^{\infty} \exp \left\{ -\frac{x^2}{2} \right\} dx, \quad (15)$$

$$\text{где } u = y - s; k = \frac{1}{2s} - \frac{u}{(2s)^2} + \frac{u^2 + 0,5}{6s^2} + O\left(\frac{1}{s^4}\right).$$

С учетом (15) выражение (13) приводится к виду

$$P_p = 1 - F(\gamma), \quad (16)$$

где

$$\gamma = u - \frac{1}{\frac{2m}{\sigma}} + \frac{u}{4\left(\frac{m}{\sigma}\right)^2} - \frac{u^2 + 0,5}{6\left(\frac{m}{\sigma}\right)^3};$$

$$u = \frac{Z_{\text{п}}}{\sigma} - \frac{m}{\sigma} = \frac{\sigma_1}{\sigma} \sqrt{2 \ln F_p^{-1}} - \frac{m}{\sigma}, \quad (17)$$

$$F(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\gamma} \exp \left\{ -\frac{x^2}{2} \right\} dx. \quad (18)$$

Из (15) и последующих выражений следует, что приближенная формула (16), как асимптотическое представление (15), справедлива лишь при $m/\sigma > 1$, то есть в тех случаях, когда пиковая мощность неискаженной части сигнала превышает мощность флуктуаций, обусловленных МП и АП, в точке нахождения сигнала 2.

Если заданы вероятности правильного разрешения и ложной тревоги P_p ,

F_p , то на основе соотношений (16)-(18) может быть определен интеграл разрешения по задержке τ_p или частоте Ω_p , соответствующий заданным вероятностям P_p , F_p .

Действительно, мощности флуктуаций σ^2 , σ_1^2 ((12), (14)) зависят от сдвига между сигналами по времени и частоте, причем

$$\sigma^2(\tau, \Omega) = \sigma_1^2(\tau, \Omega) + E_2 \delta_{12}^2(0, 0).$$

Таким образом, для нахождения интервалов разрешения по заданным значениям P_p , F_p необходимо из (16)-(18) с учетом (14) найти функцию $\sigma_1^2(\tau, \Omega) = E_1 \delta_{11}^2(\tau, \Omega) + N_0/2$, а затем, вычислив $\delta_{11}^2(\tau, \Omega)$, определить интервалы разрешения.

Обозначим через $\gamma_0(P_p)$ значение аргумента γ , удовлетворяющее уравнению (16) при заданном значении P_p . Уравнение для нахождения σ_1^2 , получающееся при подстановке в левую часть (17) вместо γ величины $\gamma_0(P_p)$, оказывается весьма сложным и его решение может быть найдено лишь численными методами. Ограничимся вычислением первого приближения для $\sigma_1^2(\tau, \Omega)$, справедливого лишь при больших отношениях m/σ . Сохраняя два первых члена функции $\gamma(u)$ в правой части (17), имеем

$$\gamma_0 = \frac{Z_n}{\sigma} - \frac{m}{\sigma} \left(1 + \frac{1}{2m^2/\sigma^2} \right). \quad (19)$$

Если положить $2m^2/\sigma^2 \gg 1$ и ввести обозначения: $\sigma^2 = \sigma_1^2 + a^2$; $Z_n = \sigma_1 b$, то вместо (3.21) получим следующее квадратное уравнение относительно σ_1 :

$$\sigma_1^2(\gamma_0^2 - b^2) + 2\sigma_1 b m + \gamma_0^2 a^2 - m^2 = 0, \quad (20)$$

где $a^2 = E_2 \delta_{12}^2(0, 0)$; $b^2 = 2 \ln(1/F_p)$.

Отметим, что параметры a^2 и b определяются статистическими характеристиками МП, заданным уровнем ложной тревоги и не зависят от интервалов τ, Ω между сигналами.

Решение уравнения (20) дает

$$\sigma_1^2 = \left[\frac{bm - \sqrt{b^2 m^2 + (\gamma_0^2 a^2 - m^2)(b^2 - \gamma_0^2)}}{b^2 - \gamma_0^2} \right]^2. \quad (21)$$

Подставляя вычисленное значение σ_1^2 в (14), по известной функции $\delta_{11}^2(\tau, \Omega)$ можно определить интервалы разрешения τ_p, Ω_p . Во многих случаях существуют простые функции, обратные $\delta_{11}^2(\tau, \Omega)$. Обозначая функцию, обратную $\delta_{11}^2(\tau, \Omega)$, как $\text{arcs} \delta_{11}^2(\tau, \Omega)$, получим

$$\tau_p, \Omega_p = \text{arcs} \delta_{11}^2 \left(\frac{\sigma_1^2}{E_1} - \frac{N_0}{2E_1} \right). \quad (22)$$

Например, если $\delta_{11}^2(\tau, 0) = \exp\{-\alpha^2 \tau^2\}$, то $\text{arcs} \delta_{11}^2 = \frac{1}{\alpha} \sqrt{-\ln \delta_{11}^2}$ и интервалы разрешения записываются в виде

$$\tau_p, \Omega_p = \frac{1}{\alpha} \sqrt{-\ln \left(\frac{\sigma_1^2}{E_1} - \frac{N_0}{2E_1} \right)}.$$

Рассмотрим другой способ вычисления интервалов разрешения, базирующийся на простейшей, линейной, аппроксимации связи между квадратами аргументов неполной функции Торонто [3, 6], частным случаем которой является

Q-функция

$$Q(x\sqrt{2}, y\sqrt{2}) = 1 - T_y(1,0, x),$$

где $T_y(1,0, x)$ – неполная функция Торонто. Отметим, что в нашей задаче $x^2 = m^2/2\sigma^2, y^2 = Z_{\Pi}^2/2\sigma^2$.

На рисунке 1 приведены результаты математического моделирования зависимости $y^2 = f(x^2)$ при нескольких фиксированных значениях P_p (сплошная линия) и линейная аппроксимация (пунктирная линия) этих зависимостей функциями вида

$$y^2 = \mu x^2 - \nu. \tag{23}$$

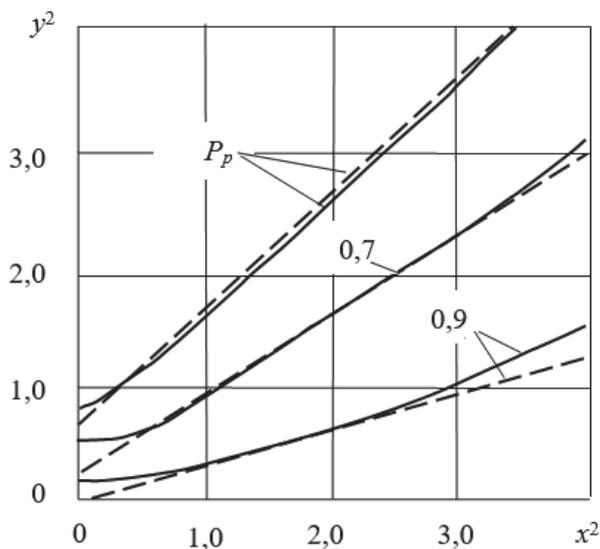


Рисунок 1 – Зависимость $y^2 = f(x^2)$

Как видно из рисунка 1, функции типа (23) хорошо аппроксимируют реальные зависимости на значительных интервалах изменения величин x^2 и y^2 .

В таблице 1 приведены значения коэффициентов μ и ν для нескольких вероятностей правильного разрешения P_p и граничные значения величин x и y , при которых справедлива введенная аппроксимация.

Таблица 1 – Значения коэффициентов

P_p	μ	ν	x_{\min}	x_{\max}	y_{\min}	y_{\max}
0,5	1,25	0	1,41	3,74	1,58	3,74
	1	-0,7	0	2,45	0,89	2,55
0,7	0,925	0,6	1,58	3,6	1,41	3,4
	0,69	-0,2	0,7	2	0,7	1,7
0,9	0,75	1,5	2	4,5	1,2	3,6
	0,33	0	0,7	1,73	0,39	1,0
0,99	0,55	5	3,6	5	1,41	3

Для каждого значения P_p дано по два значения коэффициентов μ и ν и соответственно по два значения границ интервалов применимости аппроксимации (23).

Зависимости, приведенные на рисунке 1, соответствуют значениям μ и ν , указанным для каждого P_p в верхней строке. При изменении x и y внутри указанных в таблице 1 интервалов относительные ошибки выполнения условий $P_p = \text{const}$, исходя из которого и построены зависимости $y^2 = f(x^2)$, составляют несколько процентов.

С учетом (23) можно записать следующее соотношение для нахождения интервалов разрешения:

$$\frac{\sigma_1^2 b^2}{\sigma_1^2 + a^2} = \mu \frac{m^2}{\sigma_1^2 + a^2} - 2\nu, \quad (24)$$

откуда, используя (14), (22), а также выражения для параметров a^2 и b из (20), получим

$$\tau_p, \Omega_p \approx \text{arcs} \delta_{11}^2 \left[\frac{\mu \frac{m^2}{E_1} - 2\nu \frac{E_2}{E_1} \delta_{12}^2(0,0)}{2 \ln \left(\frac{1}{F_p} \right) + 2\nu} - \frac{1}{q_1^2} \right], \quad (25)$$

где $q_1^2 = 2E_1/N_0$.

Выражение (24) значительно проще (19), однако его можно использовать лишь при ограничениях относительно диапазона изменения параметров x , y указанных выше, а также в таблице 1. Поскольку параметры x и y определяются через характеристики АП и МП и характеристики сигналов, ниже приводятся соотношения, устанавливающие в неявном виде ограничения на характеристики сигналов и помех, при которых справедливо выражение (25):

$$x_{\min}^2 \leq \frac{m^2}{2\sigma^2} = \frac{m^2/N_0}{q_2^2 \delta_{12}^2(0,0) + q_1^2 \delta_{11}^2(\tau_p, \Omega_p)} \leq x_{\max}^2, \quad (26)$$

$$y_{\min}^2 \leq \frac{Z_{\Pi}^2}{2\sigma^2} = 2 \ln \left(\frac{1}{F_p} \right) \frac{q_1^2 \delta_{11}^2(\tau_p, \Omega_p) + 1}{q_2^2 \delta_{12}^2(0,0) + q_1^2 \delta_{11}^2(\tau_p, \Omega_p) + 1} \leq x_{\max}^2, \quad (27)$$

где $q_2^2 = 2E_2/N_0$.

Из (21), (25) следует, что интервалы разрешения τ_p, Ω_p при известных статистических характеристик сигналов, аддитивных и МП однозначно определяются вероятностями правильного и ложного разрешения. Эти вероятности учитываются в указанных формулах параметрами γ_0 , b в (21) и параметрами μ и ν в (25).

Приближенные соотношения (21), (25) позволяют определять количественные значения интервалов разрешения в достаточно широком диапазоне изменения параметров аддитивных и МП. В то же время, простейший критерий количественной оценки интервалов разрешения двух сигналов одинаковой интенсивности при наличии МП основанный на релейской концепции разрешения (критерий Вудворда [2]), может быть использован лишь при достаточно жестких ограничениях, накладываемых на помехи. В частности, он не позволяет учитывать влияние АП на условия разрешения, а при МП дает качественно верные результаты лишь в тех случаях, когда мощность неискаженной части сигнала мала по сравнению с мощностью его помеховой составляющей на выходе линейной части приемного устройства.

Количественные ограничения на уровень аддитивных помех и ха-

характеристики мультипликативных помех. Представляет интерес определить количественно ограничения на уровень АП и характеристики МП, при которых интервалы разрешения, вычисленные на основе критерия Вудворда и на основе рассмотренного выше простейшего статистического критерия, оказываются достаточно близкими. Поскольку при указанных рассмотрениях нас будет интересовать случай малого уровня неискаженной части сигнала, в расчетах для определения интервалов разрешения можно использовать лишь соотношение (25).

Дальнейший анализ будем проводить при следующих упрощающих предположениях:

1) энергии разрешаемых сигналов равны $E_1 = E_2 = E$, что необходимо для сопоставления статистического критерия с критерием Вудворда;

2) оба сигнала искажены одной и той же МП или разными МП с одинаковыми статистическими характеристиками, так что $\alpha_{01}^2 = \alpha_{02}^2$, $\delta_{11}^2(\tau, \Omega) = \delta_{12}^2(\tau, \Omega) = \delta_1^2(\tau, \Omega)$.

При введенных предположениях для случая, когда в отсутствии МП сигналы уверенно разрешаются, входящий в (25) параметр m определяется соотношением $m = \alpha_0^2 \sqrt{E}$, а сама формула (25) приводит к виду

$$\tau_p, \Omega_p \approx \text{arcs} \delta_1^2 \left[\frac{\mu \alpha_0^2 - 2\nu \delta_1^2(0,0)}{2 \ln\left(\frac{1}{F_p}\right) + 2\nu} - \frac{1}{q^2} \right], \quad (28)$$

Определим влияние параметров α_0^2 , q^2 на интервалы разрешения при фиксированных значениях P_p , F_p . Будем полагать, что интервалы разрешения, определенные на основе критерия Вудворда и статистического критерия, совпадают при $\alpha_0^2 = 0$, $q^2 = \infty$ и равны τ_p, Ω_p . При $\alpha_0^2 = 0$, $q^2 = \infty$ вероятность разрешения по статистическому критерию вместо (13) определяется соотношением

$$P_p = \exp \left\{ -\frac{z_p^2}{2\sigma^2} \right\} \exp \left\{ -\frac{\ln\left(\frac{1}{F_p}\right)}{1 + \frac{\delta_1^2(0,0)}{\delta_1^2(\tau,\Omega)}} \right\}. \quad (29)$$

Если выбран способ отсчета τ_p, Ω_p на основе критерия Вудворда, например, по ширине прямоугольника эквивалентной площади, то при сопоставлении результатов, получаемых с использованием сравниваемых критериев, необходимо учитывать, что в соответствии с (29) каждому значению вероятности P_p соответствует вполне определенное и единственное значение F_p :

$$F_p = \exp \left\{ -\left[1 + \frac{\delta_1^2(0,0)}{\delta_1^2(\tau,\Omega)} \right] \ln\left(\frac{1}{F_p}\right) \right\}. \quad (30)$$

Если же заданы значения P_p , F_p , то для определения области применения критерия Вудворда при наличии МП необходимо выбрать такой способ определения величин τ_p, Ω_p на основе этого критерия, то есть такой уровень отсчета ширины интервала, занимаемого помеховой составляющей на выходе приемного устройства, при котором интервалы разрешения, вычисленные с помощью критерия Вудворда, совпадали бы с интервалами разрешения, определяемыми следующей формулой, вытекающей из (29):

$$\tau_p, \Omega_p = \text{arcs} \delta_1^2 \left[\delta_1^2(0,0) \frac{\ln P_p}{\ln\left(\frac{F_p}{P_p}\right)} \right].$$

В дальнейшем будем считать, что заданы вероятности правильного разрешения P_p и уровень отсчета, определяющий вудвордовские интервалы разрешения $\tau_{p.в.}, \Omega_{p.в.}$.

При сформулированных условиях сопоставим рассматриваемые критерии на двух примерах для случая, когда спектр ФПМ имеет колоколообразную форму, а МП достаточно быстрые $\xi = \Delta\Omega_M T / 2\pi \geq 3$.

1. если приводится разрешение двух сигналов, отличающихся сдвигом частоты, то при сформированных условиях с учетом (3) и выражения

$$\sigma_s^2(0, \Omega) \approx \frac{c^2 E^2}{2T} G_V(-\Omega)$$

имеем

$$\delta_1^2(0, \Omega) = \frac{\bar{\eta}^2 - \alpha_0^2}{2\xi} \exp\left\{-\frac{\pi\Omega^2}{\Delta\Omega_M^2}\right\} = \frac{\bar{\eta}^2 - \alpha_0^2}{2\xi} \exp\left\{-\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi\xi^2}\right\}. \quad (31)$$

2. при разрешении двух ЛЧМ сигналов, отличающихся временем прихода, если выполняется условие $3 \leq \xi \ll Q_y^2$, где $Q_y = \Delta\omega_c T / 2\pi$, $\Delta\omega_c$ – ширина спектра сигнала, то с учетом выражений

$$\sigma_s^2(\tau, \Omega) \approx \begin{cases} \frac{c^2 E^2}{2T} G_V\left(\frac{\Delta\omega_d}{T}\tau - \Omega\right) \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right), & |\tau| \leq T; \\ 0, & |\tau| > T; \end{cases}$$

$$\sigma_s^2(\tau, \Omega) \approx \frac{c^2 E^2}{2T} G_V\left(\frac{\Delta\omega_d}{T}\tau - \Omega\right) \exp\left\{-\frac{\pi\tau^2}{T^2}\right\},$$

определяющих, соответственно, прямоугольную и колоколообразную огибающую импульса, имеем

$$\delta_1^2(\tau, 0) = \frac{\bar{\eta}^2 - \alpha_0^2}{2\xi} \exp\left\{-\frac{\pi\tau^2}{T^2} \frac{Q_y^2}{\xi^2}\right\}. \quad (32)$$

Оба соотношения, (31) и (32), в целях упрощения анализа можно заметить одним:

$$\delta_1^2(l) = \frac{1 - \alpha_0^2}{2\xi} \exp\left\{-\frac{\pi l^2}{\xi^2} \lambda^2\right\}, \quad (33)$$

где $\lambda = T / 2\pi$, $l = \Omega$ – для первого примера; $\lambda = Q_y / T$, $l = \tau$ – для второго примера

В (33) принято $\bar{\eta}^2(t) = 1$, то есть предполагается, что МП не влияют на мощность сигнала. В качестве меры, определяющей область применимости критерия Вудворда, выберем относительную разность интервалов разрешения, вычисленных на основе этого критерия ($l_{p.в.}$) и на основе формулы (28), которая учитывает влияние неискаженной части сигнала и аддитивных шумов (l_p):

$$\Delta = 1 - l_p / l_{p.в.} \quad (34)$$

Подставляя (33) в (25) и учитывая, что $b^2 = 2\ln(1/F_p)$, где F_p определяется выражением (30), получим

$$l_p = \frac{\xi}{\lambda\sqrt{\pi}} \sqrt{-\ln\left\{\frac{\frac{\mu\alpha_0^2\xi}{1-\alpha_0^2} - \nu}{\left[1 + \exp\left\{\frac{\pi l_{p.в.}\lambda^2}{\xi^2}\right\}\right] \ln(1/P_p) + \nu} - \frac{2\xi}{q^2(1-\alpha_0^2)}\right\}}.$$

Как будет видно из дальнейшего,

$$\exp\left\{\frac{\pi l_{p.в.}\lambda^2}{\xi^2}\right\} \gg 1 \text{ и } \ln(1/P_p) \exp\left\{\frac{\pi l_{p.в.}\lambda^2}{\xi^2}\right\} \gg \nu.$$

Тогда

$$l_p = \frac{\xi}{\lambda\sqrt{\pi}} \sqrt{-\ln \left\{ \frac{\mu_{1-\alpha_0^2}^{\alpha_0^2 \xi} - \nu}{\ln(1/P_p) \exp\left\{\frac{\pi l_{p.в} \lambda^2}{\xi^2}\right\}} - \frac{2\xi}{q^2(1-\alpha_0^2)} \right\}}. \quad (35)$$

Оценим влияние на интервалы разрешения уровня неискаженной части сигнала α_0^2 при низком уровне АП, когда $2\xi/q^2(1-\alpha_0^2) \rightarrow 0$. Подставляя (35) в (34), для малых значений величины Δ получим

$$\Delta \approx \frac{\xi^2}{2\pi\lambda^2 l_{p.в}^2} \ln \left(\frac{\mu_{1-\alpha_0^2}^{\alpha_0^2 \xi} - \nu}{\ln(1/P_p)} \right). \quad (36)$$

В выражение (36) не входит непосредственно уровень отсчета, на котором необходимо измерять интервал разрешения при использовании критерия Вудворда. Для рассматриваемого примера из (33) вытекает следующее выражение, связывающее интервал разрешения $l_{p.в}$ с уровнем отсчета $\zeta = \delta_1^2(l_{p.в})/\delta_1^2(0)$:

$$\frac{2\pi\lambda^2 l_{p.в}^2}{\xi^2} = \ln \frac{\delta_1^2(0)}{\delta_1^2(l_{p.в})} = \ln \frac{1}{\zeta}. \quad (37)$$

С учетом (37) вместо (36) имеем

$$\Delta \approx \frac{1}{\ln(1/\xi^2)} \ln \left(\frac{\mu_{1-\alpha_0^2}^{\alpha_0^2 \xi} - \nu}{\ln(1/P_p)} \right).$$

Когда интервал разрешения определяется как ширина прямоугольника, равного по площади функции $\delta_1^2(l)$, для рассматриваемого примера имеем

$$\ln \frac{\delta_1^2(0)}{\delta_1^2(l_{p.в})} = \ln \frac{1}{\zeta} = \pi.$$

Из (36) видно, что относительная ошибка Δ в определении интервала разрешения по критерию Вудворда, возникающая за счет наличия неискаженной части сигнала, зависит от параметра $\alpha_0^2 \xi / (1 - \alpha_0^2)$, который определяет отношение мощности неискаженной части сигнала к мощности флуктуаций, обусловленных наличием МП в точке, где неискаженная часть сигнала достигает максимума.

Выражение (36) также показывает, что указанное соотношение при прочих равных условиях может быть тем больше, чем ниже уровень отсчета ζ , по которому определяется интервал разрешения $l_{p.в}$. Это обстоятельство понятно и из физических соображений. Действительно, понижению уровня отсчета интервала разрешения $l_{p.в}$, как видно из (30), соответствует уменьшение вероятности ложной тревоги F_p , то есть разрешение, обнаружение, сигнала 2 производится при этом более надежно, при меньшей вероятности ложного обнаружения. В этом случае для осуществления уверенного разрешения сигналов при наличии МП за счет разрешения их неискаженных частей требуется больший уровень последних, чем при высоких вероятностях ложного разрешения, при более высоком уровне отсчета $l_{p.в}$.

На рисунке 2 приведены результаты математического моделирования за-

висимости относительной ошибки Δ от параметра $\alpha_0^2 \xi / (1 - \alpha_0^2)$ при следующих значениях величин, входящих в (36): $P_p = 0,9$; $\mu = 0,33$; $\nu = 0$, (см. таблицу 1), уровень отсчета ζ принят за параметр.

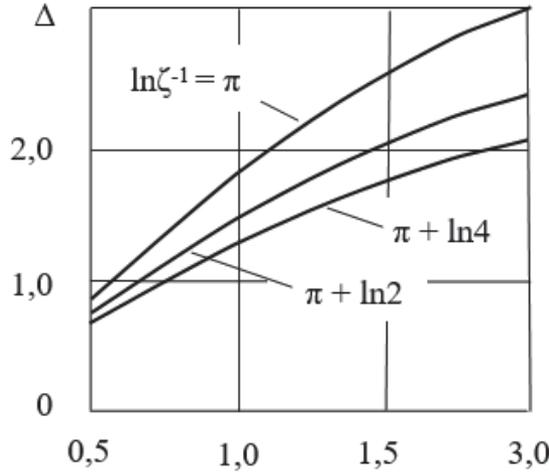


Рисунок 2 – Зависимость $\Delta = f \alpha_0^2 \xi / (1 - \alpha_0^2)$

Кривые на рисунке 2 построены с учетом ограничений, вытекающих из (26), (27). как видно из рисунка 2, критерий Вудворда, дает удовлетворительные результаты, если мощность неискаженной части сигнала меньше или незначительно превышает мощность помеховой составляющей в той точке, где неискаженная часть сигнала достигает максимума.

Отметим, что при использованных для расчета значениях уровня отсчета $\ln \zeta = -\pi$; $-\pi - \ln 2$; $-\pi - \ln 4$ и вероятности правильного разрешения $P_p = 0,9$ вероятность ложной тревоги в соответствии с (30) равны 10^{-1} ; 10^{-2} ; 7×10^{-5} .

Теперь оценим влияние АП на интервалы разрешения, полагая $\alpha_0^2 = 0$. Для этого необходимо в качестве исходного использовать соотношение вида (29), поскольку выражение (35) при $\alpha_0^2 = 0$ не применима, так как не выполняется условие (26).

Из (29) с учетом (11), (14) имеем

$$l_p = \frac{\xi}{\lambda \sqrt{\pi}} \sqrt{-\ln \left(\exp \left\{ \frac{\pi l_{p,в} \lambda^2}{\xi^2} - \frac{2\xi}{q^2} \right\} \right)}.$$

Выражая величину $l_{p,в}$ через уровень отсчета ζ , окончательно получим

$$l_p = \frac{\xi}{\lambda \sqrt{\pi}} \sqrt{-\ln \left(\exp \left\{ \zeta - \frac{2\xi}{q^2} \right\} \right)}. \quad (38)$$

В (38) отсутствует явная зависимость интервала разрешения от вероятности правильного разрешения и вероятности ложной тревоги. Очевидно это связано с тем, что при заданном на основе критерия Вудворда, интервале разрешения $l_{p,в}$ АП одинаково влияют на интервал разрешения l_p при любых значениях P_p , F_p , удовлетворяющих соотношению (29).

Относительная разность интервалов разрешения, определяемых на основе

критерия Вудворда и статистического критерия (34) с учетом (38), будет

$$\Delta = 1 - \sqrt{1 + \frac{1}{\ln \zeta} \ln \left(1 - \frac{2\xi}{q^2 \zeta}\right)}. \quad (39)$$

При малых относительных ошибках Δ , которые нас интересуют, можно разложить второе слагаемое в (39) в степенной ряд и ограничиться двумя членами разложения. Представляя далее натуральный логарифм двумя членами его разложения в ряд Тейлора в окрестностях точки $2\xi/q^2\zeta = 1$, окончательно получим

$$\Delta \approx \frac{\xi}{q^2 \zeta \ln \zeta}. \quad (40)$$

Формула (40) позволяет определить по заданной величине ошибки Δ допустимый уровень АП, при котором еще возможно использование критерия Вудворда.

Из полученной формулы следует, что допустимое отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности аддитивного шума q^2 тем меньше, чем уже спектр функции помеховой модуляции, чем меньше параметр ξ .

Если интервал разрешения $l_{p.в}$ определяется как эквивалентная ширина функции, описывающей распределение мощности флуктуаций сигнала на выходе линейной части приемного устройства, то $\zeta = \exp\{-\pi\}$ и величина $q^2\zeta/\xi$ должна быть не меньше чем $(\pi|\Delta|)^{-1}$.

Поскольку параметр q^2 равен отношению пиковой мощности неискаженного сигнала к мощности АП на выходе согласованного приемника, величину $q^2\zeta/\xi$ можно трактовать как отношение мощности флуктуации сигнала, искаженного МП, в точке $l = l_{p.в}$ к мощности АП на выходе того же приемника. С учетом сказанного использование критерия Вудворда для определения интервалов различия при наличии АП не приводит к большим ошибкам лишь в тех случаях, когда мощность помеховой составляющей сигнала в точке $l = l_{p.в}$ превышает мощность АП.

Выводы. Таким образом, проведен системный анализ оценки влияния мультипликативных помех на характеристики разрешения сигналов при их обработке в приемном устройстве, оптимальном при разрешении двух сигналов, обнаружения, на фоне аддитивных помех в виде белого шума. Получены соотношения, позволяющие определять количественные значения интервалов разрешения в достаточно широком диапазоне изменения параметров аддитивных и мультипликативных помех. В то же время, простейший критерий количественной оценки интервалов разрешения двух сигналов одинаковой интенсивности при наличии мультипликативных помех основанный на релейевской концепции разрешения (критерий Вудворда), может быть использован лишь при достаточно жестких ограничениях, накладываемых на помехи. В частности, он не позволяет учитывать влияние аддитивных помех на условия разрешения, а при мультипликативных помехах дает качественно верные результаты лишь в тех случаях, когда мощность неискаженной части сигнала мала по сравнению с мощностью его помеховой составляющей на выходе линейной части приемного устройства. Показано, что относительная ошибка в определении интервала разрешения по критерию Вудворда, возникающая за счет наличия неискаженной части сигнала, зависит от параметра, который определяет отношение мощности неискаженной

части сигнала к мощности флуктуаций, обусловленных наличием мультипликативных помех в точке, где неискаженная часть сигнала достигает максимума.

Литература

1. Бунимович В.И. Приближенное вычисление вероятности правильного обнаружения при оптимальном приеме сигнала с неизвестной фазой // Радиотехника и электроника. 1968. Т. 3. № 4.
2. Вудворд Ф.М. Теория вероятности и теория информации с применением в радиолокации // М.: Сов. Радио. 1955. 128 с.
3. Современная радиолокация. Пер. с англ. под ред. Ю.Б. Кобзарева // М.: Сов. Радио. 1969. 699 с.
4. Ширман Я.Д., Голиков В.Н. Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров // М.: Сов. Радио. 1974. 360 с.
5. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов // Изд-во иностранной литературы. 1963. 432 с.
6. Mareum J.I. AStatistical theory of target detection by pulsed radar // Trans. IRE. 1960. v. IT-6. № 2.

УДК 621.372.632:681.586

Компьютерное моделирование параметрических преобразователей с частотным и фазовым управлением

В.В. Иванов, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Информационный и электронный сервис»,
Я.В. Еремина, аспирант кафедры «Информационный и электронный сервис»,
С.В. Ермолова, аспирант кафедры «Информационный и электронный сервис»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования,
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

Осуществлено математическое моделирование параметрических преобразователей, использующих режим повышенной чувствительности. Названный режим преобразователей позволяет повысить эксплуатационные показатели аппаратуры авиационно-космических систем. Показано, что преобразователи с фазовым управлением обладают линейными характеристиками и являются более перспективными. Применение в них цифровых фильтров ведет к повышению стабильности частоты и точности настройки, а также минимизируется погрешность характеристики преобразования.

Математическое моделирование, параметрический преобразователь, угловая модуляция, фазовая модуляция, автоколебательная система, частота сигнала, чувствительность, характеристика преобразования.

Computer modeling of parametric converters with frequency and phase control

V.V. Ivanov, doctor of technical sciences, professor,
professor of the department «Information and electronic service»,
Ya.V. Eremina, postgraduate student of the department
«Information and electronic service»,
S.V. Ermolova, postgraduate student of the department
«Information and electronic service»,
Federal state budgetary educational institution higher education
Volga State University of Service, Togliatty

Mathematical modeling of parametric converters using high-sensitivity mode is carried out. The named mode of converters allows to increase operational parameters of the equipment of aerospace systems. It is shown that phase-controlled converters are more promising because they have linear characteristics and allow the use of digital filters, which leads to an increase in frequency stability and accuracy of adjustment, and also minimizes the error of the conversion characteristic.

Mathematical modeling, parametric Converter, angular modulation, phase modulation, self-oscillating system, signals frequency, sensitivity, conversion characteristic.

Введение. В информационно-измерительных комплексах и системах различного назначения большое применение нашли всевозможные модуляторы (преобразователи) несущего колебания [2, 11, 13 и др.]. Схемные решения таких модуляторов, как правило, хорошо известны и изучены [1, 4, 9, 10 и др.]. Отметим, что при передаче непрерывной информации предпочтение отдается угловой (фазовой и частотной) модуляции; при передаче цифровой информации часто используются частотная и фазовая манипуляция.

Известны [4, 14] две ключевых проблемы угловой модуляции: получение больших индексов модуляции простыми средствами и отсутствие преобразователей (усилителей) девиации частоты и фазы. Как правило, эти проблемы зависят от параметров модуляторов, в частности от их чувствительности [3, 5, 6, 12].

В статье осуществлено компьютерное моделирование параметрических преобразователей с частотным и фазовым управлением, использующих режим повышенной чувствительности при использовании прямых методов угловой модуляции.

Аналитические характеристики модуляторов (преобразователей). Найдем в условиях повышенной чувствительности потенциальные возможности параметрического преобразователя или углового модулятора воспользовавшись одноконтурной автоколебательной системой [7, 8]. На рисунке 1 приведена блок-схема автоколебательной системы.

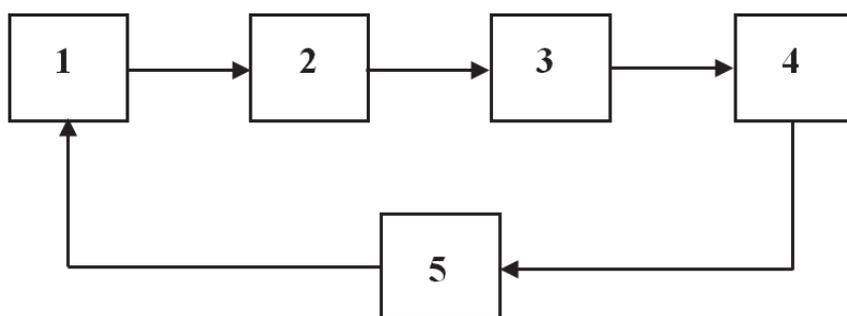


Рисунок 1 – Блок-схема - система автоколебательная

Здесь, 1, 2 – полосовые фильтры (ПФ) с характерной ФЧХ; 3 – ПФ с нетипичной ФЧХ; 4 – широкополосный фазовращатель; 5 – нелинейный усилитель обеспечивающий баланс амплитуд.

Представим баланс фаз генерируемого сигнала в следующем виде

$$\varphi_1(f) + \varphi_2(f) + \varphi_3(f) + \psi = 0, \quad (1)$$

где f – частота генерируемого сигнала; φ_k – в фильтрах фазовые сдвиги

сигнала; ψ – сдвиг фазы обеспечивающий фазовращателем.

Произведем линеаризацию ФЧХ фильтров в области средних частот, преобразовав (1) к виду

$$S_1 \frac{f_{01} - f}{f_{01}} + S_2 \frac{f_{02} - f}{f_{02}} - S_3 \frac{f_{03} - f}{f_{03}} + \psi = 0, \quad (2)$$

где S – коэффициенты размерные, характеризующие крутизну ФЧХ; f_0 – частоты резонансные (средние).

Исходя из [12], можем записать, что генерируемая частота сигнала будет определяться выражением

$$f = \frac{f_{01}f_{02}f_{03}(S_1 + S_2 - S_3 + \psi)}{S_1f_{02}f_{03} + S_2f_{01}f_{03} - S_3f_{01}f_{02}}. \quad (3)$$

Заметим, что максимальное значение чувствительности будет достигаться при выполнении предельного условия [6]:

$$S_1 + S_2 = S_3.$$

Однако необходимо отметить, что при этом автоколебательная система теряет устойчивость [5].

Для разомкнутой системы необходимо, чтобы

$$S_1 + S_2 > S_3. \quad (4)$$

Отметим, что если средние частоты фильтров одинаковы, то (3) примет вид

$$f(\psi) = \frac{f_0(S_1 + S_2 - S_3 + \psi)}{S_1 + S_2 - S_3}. \quad (5)$$

На рисунке 2 представлены результаты численного моделирования.

Выполненные исследования известных способов управления одноконтурным генератором и характеристик преобразования управляющего воздействия в частоту генерируемых колебаний или фазовый сдвиг между ними показывают, что они могут быть использованы в режиме повышенной чувствительности [5, 6]. Это позволяет синтезировать параметрические преобразователи и модуляторы с частотным и фазовым управлением. Выполним компьютерное моделирование данных преобразователей и убедимся в справедливости сделанных выводов.

$$\psi := -1, -0.99 \dots 1.0 \quad S1 := 10 \quad f0 := 150 \quad S2 := 10$$

$$S31 := 19 \quad S32 := 18 \quad S33 := 17$$

$$f1(\psi) := f0 \cdot \frac{(S1 + S2 - S31 + \psi)}{(S1 + S2 - S31)}$$

$$f2(\psi) := f0 \cdot \frac{(S1 + S2 - S32 + \psi)}{(S1 + S2 - S32)}$$

$$f3(\psi) := f0 \cdot \frac{(S1 + S2 - S33 + \psi)}{(S1 + S2 - S33)}$$

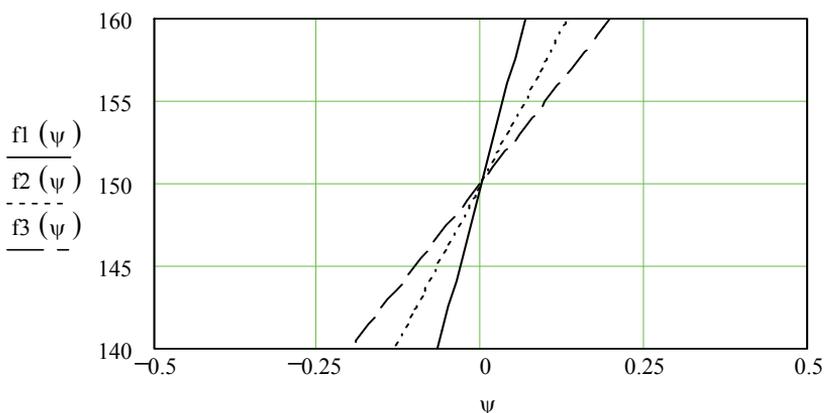


Рисунок 2 – Результаты численного моделирования согласно (5)

Преобразователи с частотным управлением. Получим для сравнения характеристики преобразования с помощью компьютерной модели параметрического преобразователя (рисунок 3).

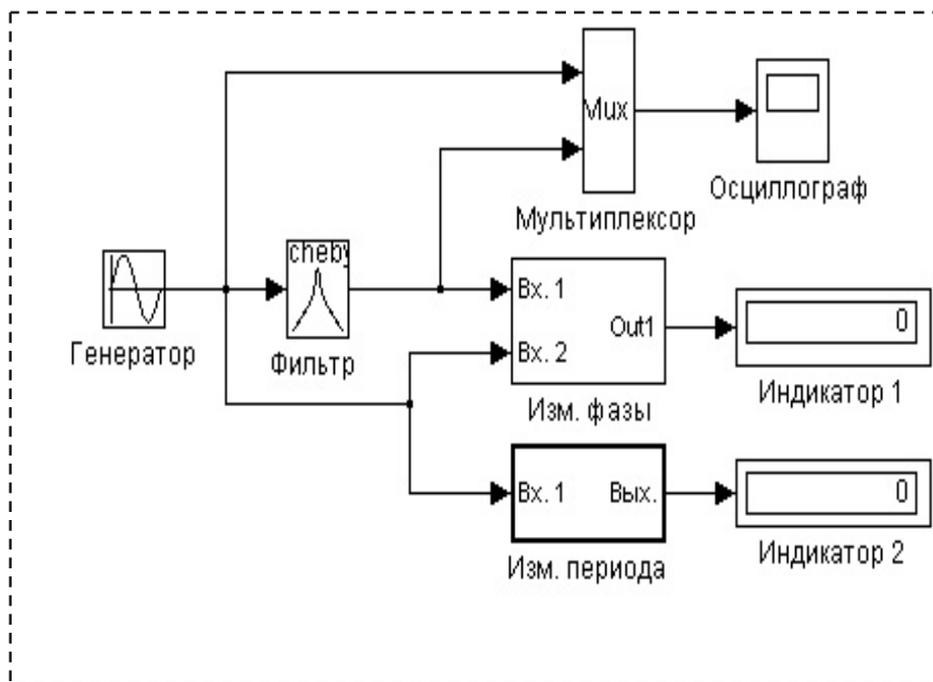


Рисунок 3 – Исследование ФЧХ полосного фильтра Чебышева

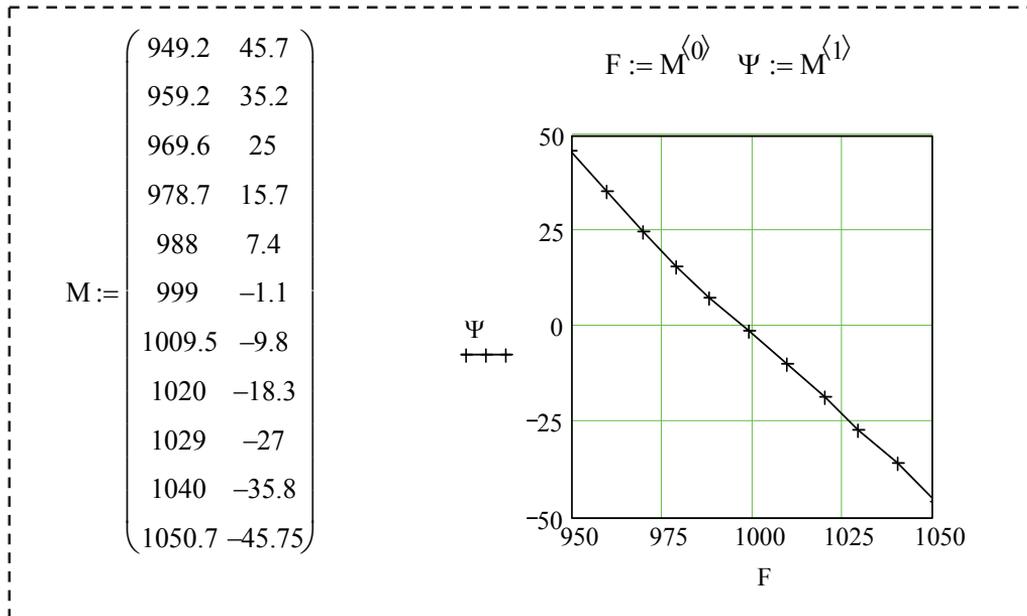


Рисунок 4 – ФЧХ цифрового фильтра полосного фильтра Чебышева

Используем управление средними частотами фильтров. Вначале снимем ФЧХ полосного фильтра Чебышева, который используется в модели автоколебательной системы. Модель содержит генератор, исследуемый фильтр, измерители

фазового сдвига и периода колебаний, осциллограф для контроля знака фазового сдвига. Полоса пропускания исследуемого фильтра Чебышева 950-1050 Гц. После обработки результатов получена ФЧХ, приведённая на рисунке 4.

Видно, что характер ФЧХ фильтра близок к линейному характеру. Поэтому использование полосных фильтров Чебышева в модели автоколебательной системы должно дать результаты, близкие к полученным выше теоретическим результатам. Однако ФЧХ пересекает ось частот не в точке, соответствующей средней частоте фильтра. Очевидно, что это приведёт к смещению характеристик преобразования.

Модель преобразователя приведена на рисунке 5.

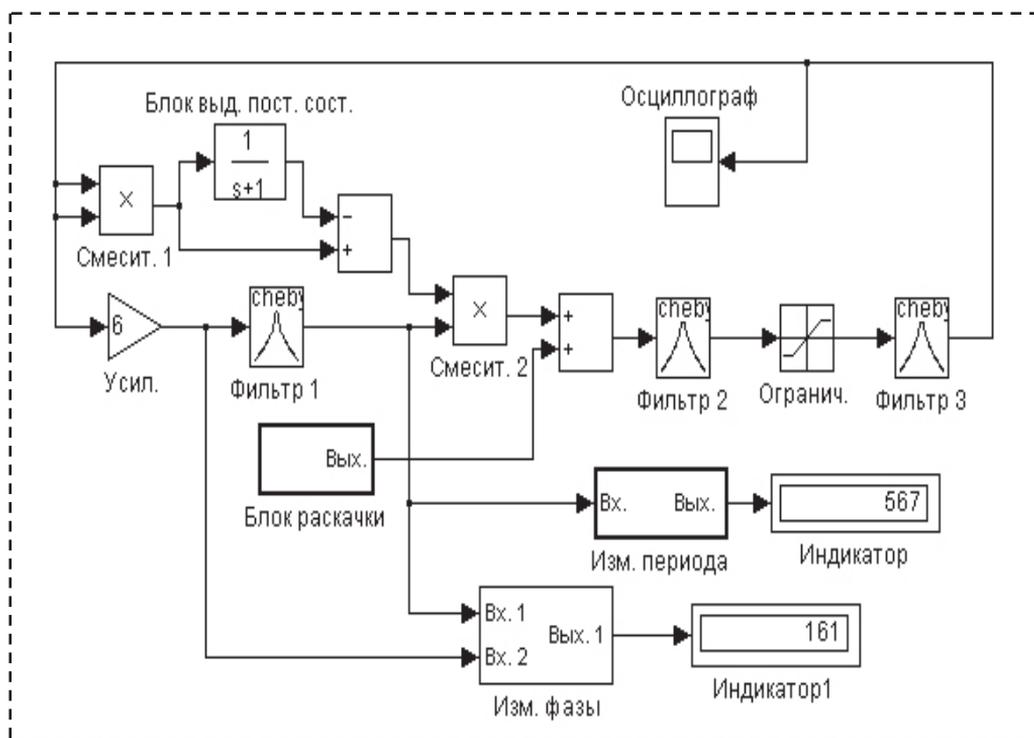


Рисунок 5 – Модель преобразователя с частотным управлением

При выбранном способе управления варьировалась средняя частота фильтра 1 компьютерной модели. Полученные характеристики преобразования в частоту генерируемого сигнала приведены на рисунке 6.

На рисунке 7 приведены соответствующие характеристики преобразования в фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами фильтра 1 компьютерной модели. Характеристики получены с помощью измерителя фазы.

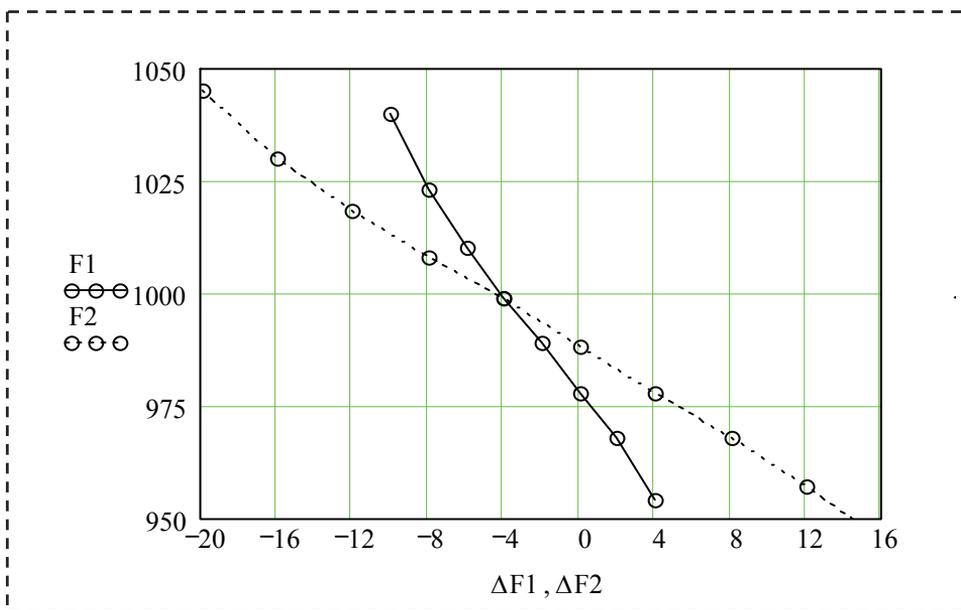


Рисунок 6 – Характеристики преобразования в частоту генерируемого сигнала

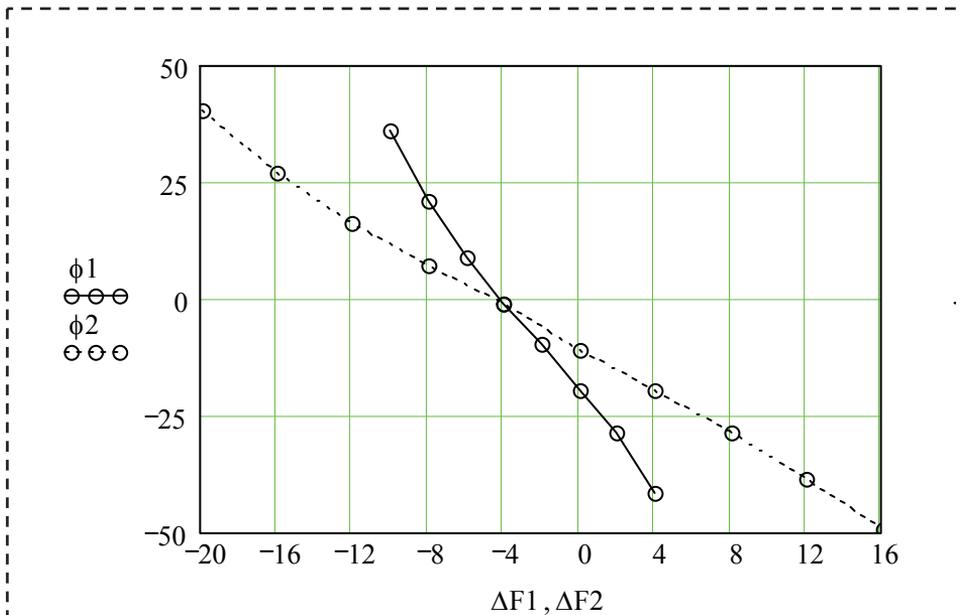


Рисунок 7 – Характеристики преобразования в фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами фильтра

Видно, что ближе к границе полосы пропускания разомкнутой цепи нелинейность характеристики увеличивается.

Заметим, что смещение в точку с $\Delta F = -4$ можно реализовать в аналитической модели введением элемента задержки. Фильтры являются инерционными элементами и создают некоторую задержку прохождения генерируемого сигнала

по замкнутому контуру.

Характеристики (рисунок 8) аналогичны характеристикам, приведённым на рисунке 6. Они получены с помощью выражения (2) баланса фаз, в котором фазовый сдвиг имитирует элемент задержки.

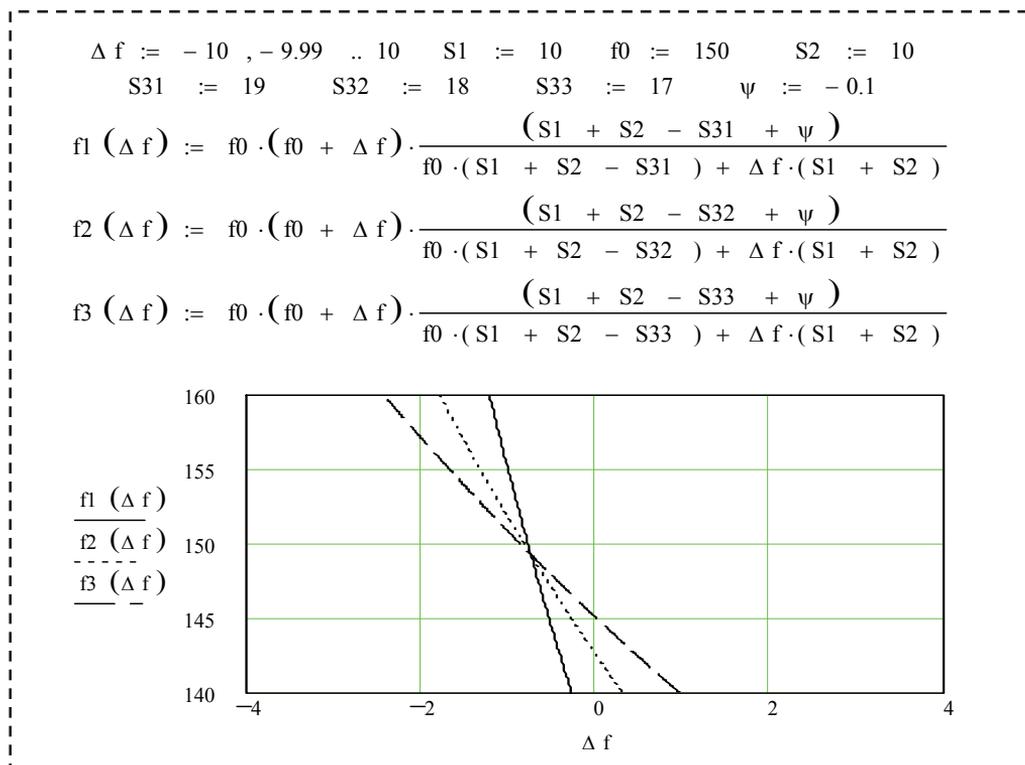


Рисунок 8 – Характеристики преобразования в частоту генерируемого сигнала, полученные с помощью выражения баланса фаз

С другой стороны, при моделировании смещение характеристик можно вызвать путем смещения ФЧХ фильтров Чебышева (рисунок 4).

Рассматриваемые преобразователи, структуры которых соответствуют компьютерной модели, могут быть реализованы только при использовании аналоговых фильтров, в которые можно вводить реактивный параметр элемента управления, например датчик.

Преобразователи с фазовым управлением. Смоделируем управление вариацией дополнительного фазового сдвига в преобразователе. Для этого в компьютерную модель введём элемент задержки, который будет находиться между фильтром 2 и ограничителем (рисунок 9). Он позволит нам имитировать управляемый вносимый фазовый сдвиг.

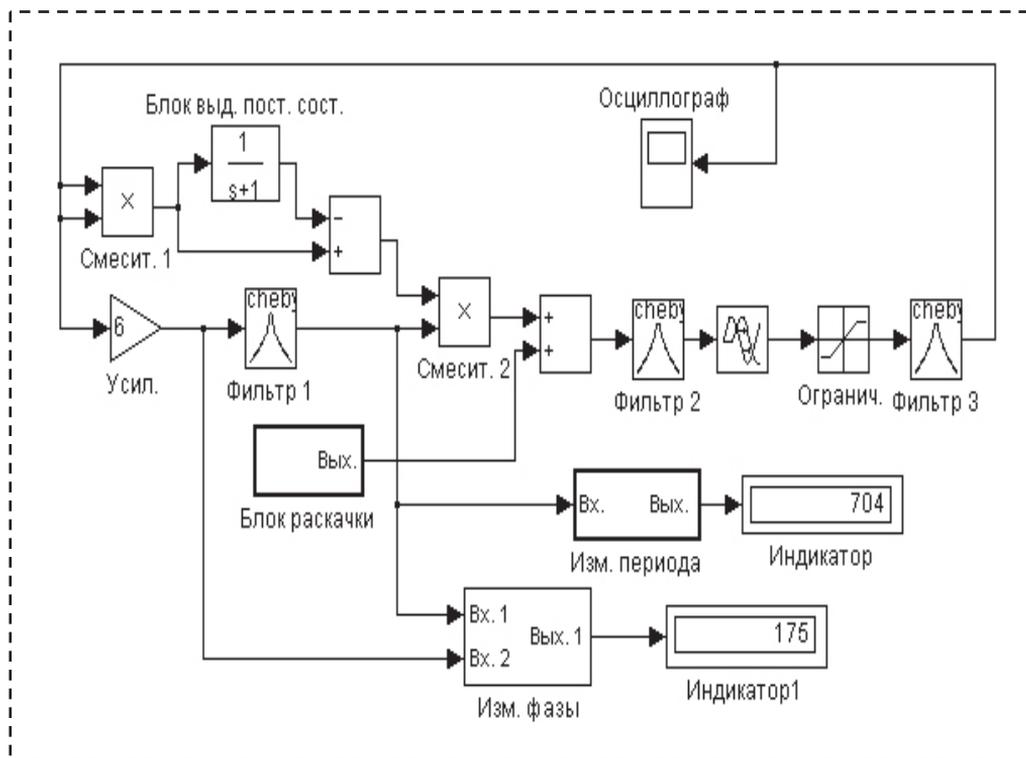


Рисунок 9 – Модель преобразователя с частотным управлением

Полученные характеристики в преобразователе с частотным выходом приведены на рисунке 10, а в преобразователе с фазовым выходом – на рисунке 11.

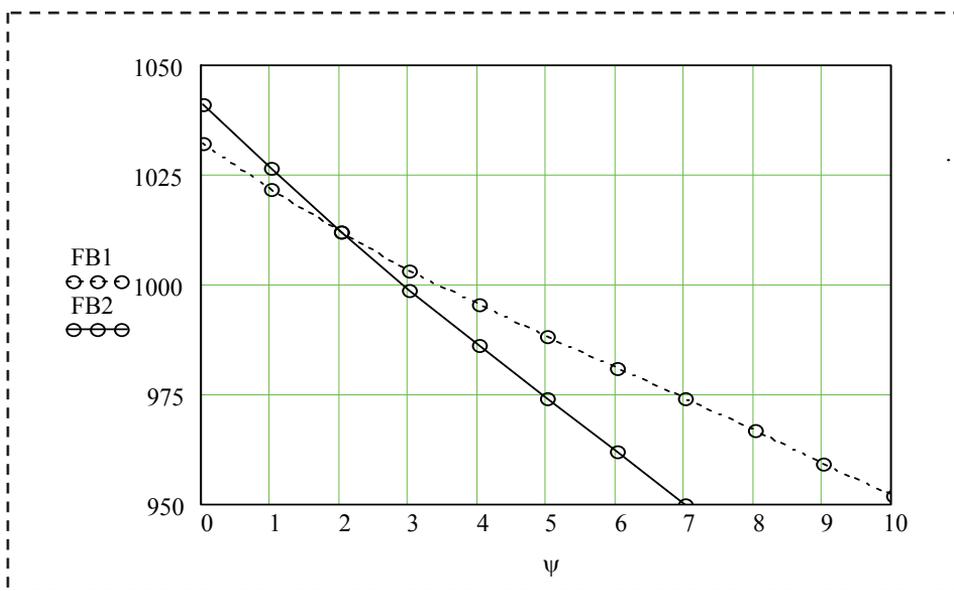


Рисунок 10 – Характеристики в преобразователе с частотным выходом

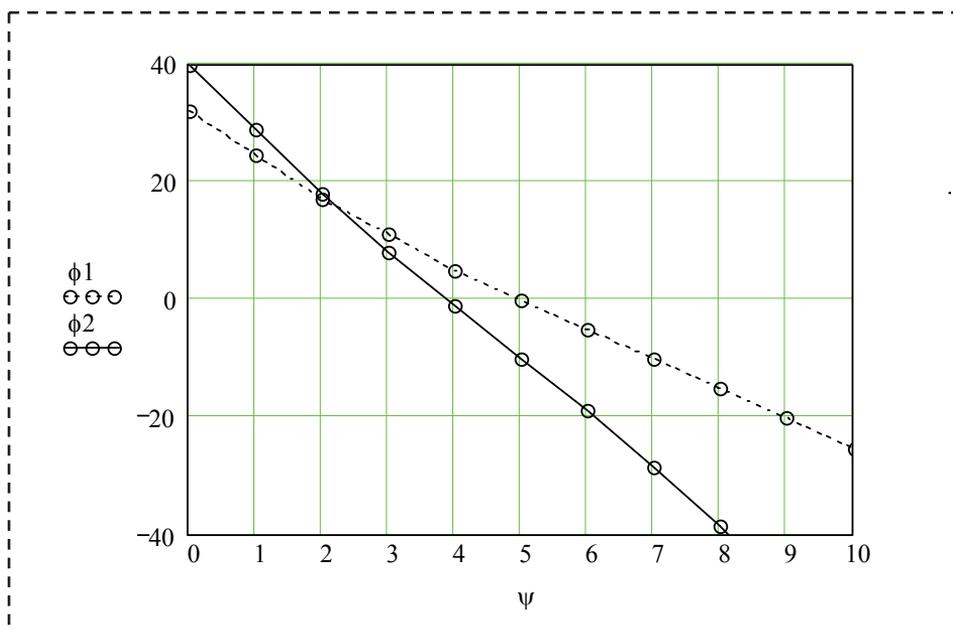


Рисунок 11 – Характеристики в преобразователе с фазовым выходом

Выводы. Таким образом, был произведено компьютерное моделирование параметрических преобразователей с частотным и фазовым управлением, которые могут найти применение при создании перспективной аппаратуры информационно-измерительных и радиотехнических систем. Показано, что как преобразователи, так и модуляторы могут быть эффективно синтезированы на базе одноконтурных генераторов, работающих в режиме повышенной чувствительности. При этом основными способами, позволяющими эффективно управлять автоколебательной системой, могут быть как частотный, так и фазовый.

Показано, что более эффективным является фазовое управление.

Литература

1. Айзинов М.М. Избранные вопросы теории сигналов и теории цепей // М.: Связь. 1971. 349 с.
2. Альтшуллер Г.Б. Управление частотой кварцевых генераторов // М.: Связь. 1975. 272 с.
3. Арш Э.И. Автогенераторные методы и средства измерений // М.: Машиностроение. 1979. 256 с.
4. Гоноровский И.П., Дёмин М.П. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. пособие для вузов. 5-е изд. // М.: Радио и связь. 1994. 480 с.
5. Иванов В.В. Эффект сверхчувствительности автоколебательных систем и его использование // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права: Труды V Межд. НПК; В кн. Приборостроение // М.: МГАПИ. 2002. С. 89-91.

6. Иванов В.В. Генераторные преобразователи повышенной чувствительности для систем управления и контроля // Диссертация на соискание уч. ст. д. техн. н. (на правах рукописи) // Тольятти: ТГУС. 2006. 335 с.
7. Иванов В.В. Синтез преобразователей индекса угловой модуляции // Волновые процессы и радиотехнические системы: Межвуз. сб. науч. трудов: № 3. Т. 4 // Самара: ПГАТИ. 2001. С. 46-48.
8. Иванов В.В. Частотный модулятор повышенной чувствительности // Электромагнитная совместимость и имитационное моделирование инфокоммуникационных систем: Сб. трудов ПГАТИ // М.: Радио и связь. 2002. С. 197-202.
9. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений: Учеб. пособие для вузов // М.: Энергоатомиздат. 1986. 448 с.
10. Мирский Г.Я. Радиоэлектронные измерения // М.: Энергия. 1975. 600 с.
11. Новицкий П.В., Кнорринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками // Л.: Энергия. 1970. 424 с.
12. Полулях К.С. Резонансные методы измерений // М.: Энергия. 1980. 120 с.
13. Прокунцев А.Ф., Юмаев Р.М. Преобразование и обработка информации с датчиков физических величин // М.: Машиностроение. 1992. 288 с.
14. Яковлев В.Н. Генераторы с многопетлевой обратной связью // М.: Связь. 1973. 189 с.

УДК 004.75, 004.89

Проблемы и технологии обеспечения интероперабельности информационных систем региональных ситуационных центров

А.В. Маслобоев, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического моделирования
Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»
(ИИММ КНЦ РАН), г. Апатиты

В работе рассматриваются цели и проблематика обеспечения интероперабельности информационно-управляющих систем региональных ситуационных центров. Выделены три типа проблем поддержки интероперабельности на технологическом, семантическом и организационном уровнях взаимодействия компонентов этих систем. Предлагаются пути решения задач обеспечения интероперабельности информационных систем ситуационных центров региона, основанные на применении агентных технологий и онтологий и обеспечивающие интеграцию распределенных компонентов в единую сетевую среду и совместное использование информационных ресурсов.

Информационная система, интероперабельность, ситуационный центр, сетевое управление, региональная безопасность.

Information system interoperability support of regional situational centers: problems and technologies

A.V. Masloboev, Dr. Sci. Tech., Leading research fellow,
Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal
Research Center «Kola Science Center of Russian Academy of Sciences»
(IIMM KSC RAS), Apatity

The paper considers goals and problems of information-management system interoperability support of the regional situational centers. Three types of the information system components interoperability support problem at technological, semantic and organizational interaction level are assigned. Problem-solving directions of information system interoperability support of regional situational centers based on application of multi-agent technologies and ontologies are proposed. That provides system component integration in the unified network-centric environment and information resources sharing.

Information system, interoperability, situational center, network-centric control, regional security.

Введение

В настоящее время важная роль в реализации государственных программ перехода к цифровой экономике и в решении проблем обеспечения националь-

ной безопасности страны отводится системе распределенных ситуационных центров, функционирующих в режиме повседневной деятельности по единому регламенту взаимодействия. Эта система строится по сетевому принципу из разнотипных по своей структуре и ведомственной принадлежности ситуационных центров (СЦ) различного уровня – федерального, регионального, муниципального, отраслевого и корпоративного. Интеграция распределенных СЦ в единую систему и организация согласованного взаимодействия между ними на основе общих организационных и технических регламентов нацелены на совершенствование системы государственного управления и структуры обеспечения комплексной безопасности за счет целенаправленной информационно-аналитической поддержки принятия управленческих решений в условиях кризисных ситуаций в социально-экономической и военно-политической сферах.

Большинство СЦ, созданных в регионах страны, являются уникальными, как с точки зрения информационно-технологической архитектуры, так и программно-аппаратной реализации аналитического обеспечения ситуационного управления критически важными объектами региональной экономики. Вместе с тем, сегодня наблюдаются потребности в проектировании новых и модернизации существующих СЦ, а также в их последующей интеграции и адаптации в рамках уже созданной сети СЦ. Это является серьезной проблемой, которая до сих пор остается недостаточно проработанной с научно-методической точки зрения, что на практике приводит к снижению эффективности управления социально-экономическими системами с использованием существующих и вновь создаваемых СЦ.

На этапе интеграции информационных и функциональных компонентов различных СЦ в рамках распределенной информационной среды возникает множество проблем, связанных с обеспечением их интероперабельности (совместимости) на концептуальном, модельном, программно-техническом и организационном уровнях детализации. Это увеличивает временные и ресурсные затраты на «стыковку» СЦ и адаптацию их инструментария к динамически меняющейся внешней среде, а также на корректировку системотехнических и методических ошибок, выявленных в процессе эксплуатации компонентов СЦ, и на согласование форматов информационного взаимодействия.

Работа посвящена вопросам обеспечения интероперабельности и интеграции информационных систем ситуационных центров региона.

Понятийный аппарат. Специфика объекта исследования

Под интероперабельностью в общепринятом смысле понимается способность к интеграции двух или более информационных систем или их компонентов в единую информационную среду (систему). Согласно утвержденному стандарту [1] при этом должны обеспечиваться обмен информацией между всеми элементами интегрированной среды и возможность использования информации, полученной в результате интеграции и обмена. Для обеспечения свойства интероперабельности гетерогенных систем на практике применяются современные стандарты информационно-коммуникационных технологий.

Анализ отечественных и зарубежных исследований проблем интеграции распределенных информационно-управляющих систем для решения задач в разных областях как в гражданской, так и в военной сферах показывает, что интеро-

перабельность является ключевым системообразующим принципом построения сетецентрических систем управления сложными объектами различной природы и масштаба – от технических до социально-экономических. Этот принцип служит основой современной концепции горизонтального и вертикального информационно-технологического сопряжения существующих и вновь создаваемых систем сетецентрического управления, предназначенных для реализации перспективных государственных проектов и программ в области цифровой экономики, промышленности, здравоохранении, энергетике, космосе, транспорте, национальной безопасности и в других стратегических сферах.

Сетецентрическая система представляет собой объединение всех субъектов, объектов и средств управления в единое информационное пространство (виртуальную сетецентрическую среду управления), в рамках которой обеспечивается полная функциональная совместимость всех элементов, координация децентрализованного принятия решений и свободный обмен информацией на всех уровнях иерархии управления независимо от выполняемых элементами функций. Виртуальная среда ориентирована не только на интеграцию человеческих и технических ресурсов для задач управления, но и средств автоматизации получения, обработки и анализа информации для принятия решений в процессе управления, что обеспечивает повышение эффективности совместной деятельности субъектов управления и согласованное информационное взаимодействие между ними. Под взаимодействием понимается не только обмен информацией в системе для поддержания ситуационной осведомленности, но и выработка общей стратегии и координации совместных действий в интересах решения некоторой целевой задачи.

Сетецентрические системы управления характеризуются слабой иерархией в контуре принятия решений, способностью порождать цели внутри себя, а также открытостью и самоорганизацией [2]. При этом достоинством сетецентрического способа управления по сравнению с иерархическим является то, что при таком подходе к управлению уменьшается совокупная ошибка принятия неверного решения в условиях неопределенности, что приводит к стабильности и способности системы адаптироваться к динамически изменяющейся внешней среде, а также обеспечивает рациональное распределение ресурсов в процессе децентрализованного управления системой.

В настоящей работе рассматривается система сетецентрического управления региональной безопасностью, построенная на базе сети СЦ региона. Региональные СЦ представляют собой комплексный инструмент ситуационного управления, обеспечивающий проблемный мониторинг, прогнозирование рисков и стратегическое планирование устойчивого социально-экономического развития региона для поддержки принятия эффективных управленческих решений, как в стабильных условиях, так и в критических ситуациях.

Сетецентрическое управление региональной безопасностью заключается в реализации сетевой структуры организационного управления с выделенными управляющими СЦ, взаимодействие между которыми осуществляется на базе интеграции их компонентов (средств мониторинга, субъектов управления, исполнительных ресурсов и т.д.) в единое региональное информационное пространство [2]. СЦ региона как центры группового принятия решений (пункты

ситуационного управления), являясь узлами сетецентрической системы управления региональной безопасностью, реализуются физически в определенной точке пространства, а также виртуально, когда отдельные компоненты СЦ локализованы на других узлах сети. При этом в процессе решения конкретной задачи управления центры принятия решений способны перемещаться между узлами виртуальной среды. Решение о миграции центра принимается на основе координирующих сигналов и оценки степени ситуационной осведомленности [3] всех участников процесса управления безопасностью.

Под ситуационной осведомленностью субъекта управления в СЦ понимается информация о проблемной ситуации, ориентируясь на которую при наличии необходимых у него ресурсов субъект получает возможность корректировать свое поведение и стратегию деятельности, координировать действия других участников процесса управления и, тем самым, влиять на функционирование объекта управления. Сеть большая, много решающих центров и всем требуется предоставить информацию, точно соответствующую ситуации. В связи с этим, интероперабельность средств информационной поддержки СЦ во много определяет уровень ситуационной осведомленности на этапах выработки, реализации и контроля исполнения управленческих решений в условиях критических ситуаций.

Системный анализ проблем интероперабельности

Для региональных СЦ характерны следующие проблемы: ограниченная функциональность и изолированность используемых средств контроля и аналитической обработки возрастающего объема разноплановой информации о влиянии различных факторов на состояние региональных систем для управления рисками критических инфраструктур, а также необходимость координации взаимодействия пространственно-распределенных СЦ и обеспечения свойств гибкой масштабируемости и интероперабельности информационных систем СЦ. Решению этих проблем во многом препятствует смешение сфер интересов различных ведомств и организаций, участвующих в процессах управления региональным развитием через систему СЦ. Как правило, формат представления данных и регламент информационного обмена определяются локальными целями и функциональностью отдельных субъектов управления, а объем информации, необходимой для принятия решений, определяется исходя из требований к полноте знаний о критической ситуации, о состоянии функционирования объекта управления и о параметрах внешней среды. Перечисленные аспекты затрудняют совместное использование ресурсов для оценки ситуации и увеличивают время на коллективную выработку и согласование управленческих решений в критической обстановке.

Проблемы обеспечения интероперабельности информационных систем СЦ согласно эталонной модели интероперабельности [1] следует рассматривать на трех уровнях взаимодействия элементов этих систем – технологическом, семантическом и организационном (рис. 1), а также учитывать структуру взаимосвязей между ними.

Обозначения на рисунке 1: ИАС – информационно-аналитическая система; ОГВ – органы государственной власти.

Разнородность и территориальная распределенность субъектов управления безопасностью региона обуславливает технологическую и семантическую

неоднородность сетевидной среды региональной безопасности. Для информационной поддержки ЦУ управления региональной безопасностью характерна высокая степень не только технологической (использование различных форматов хранения, представления и обмена данными, разных СУБД и структур баз данных и т.д.), но и семантической разнородности информационных ресурсов (использование профильными ведомствами собственных тезаурусов и регламентов, синонимия в именовании информационных объектов, использование различных оценочных шкал, и т.п.). Вместе с тем, к работе в ЦУ управления региональной безопасностью привлекаются специалисты/эксперты из разных предметных областей, использующие различную терминологическую базу и отличные ментальные модели одних и тех же понятий и процессов. Источником технологической неоднородности информационных ресурсов является организационная разнородность субъектов управления безопасностью, которые, как правило, к моменту начала совместной деятельности уже имеют и используют собственные, отличные по архитектуре и технологиям, информационные инфраструктуры. Эти особенности препятствуют развитию современной системы ЦУ и созданию единой виртуальной среды для сетевидного управления региональной безопасностью.

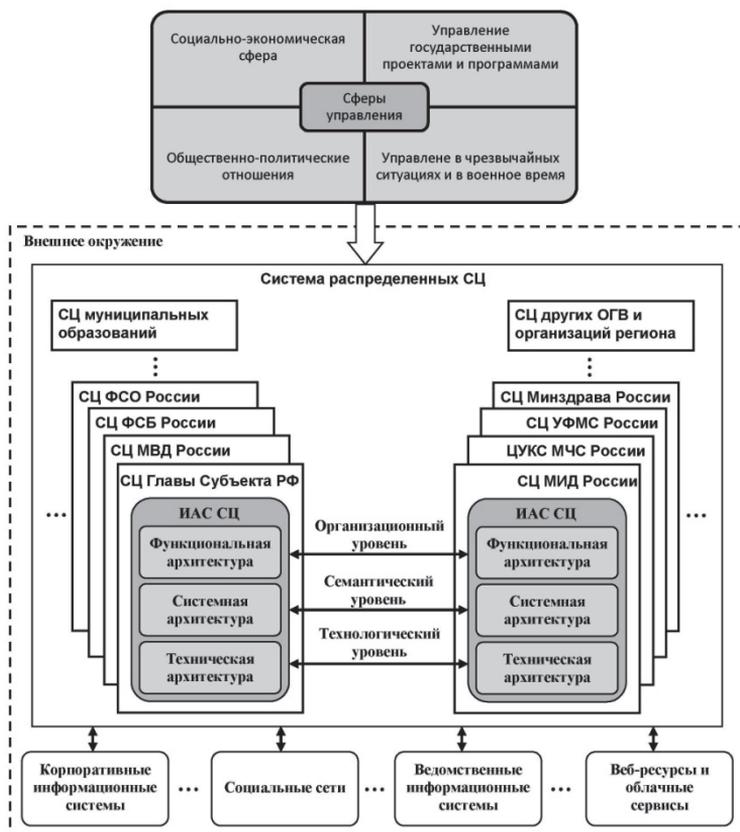


Рисунок 1 – Модель интероперабельности информационных систем СИ

Еще одним обстоятельством, затрудняющим интеграционные процессы при построении виртуальной сетевидческой среды СЦ управления региональной безопасностью, является существование класса так называемых «унаследованных систем» – невзаимосвязанных гетерогенных информационных систем управления безопасностью. К ним относятся различного рода ведомственные и корпоративные информационные системы, информационно-аналитические системы СЦ, отдельные веб-сервисы и Интернет-ресурсы и т.д. Эти системы оперируют большим объемом разноплановой информации о различных аспектах региональной безопасности, объектах, процессах и событиях безопасности, инцидентах. При интеграции «унаследованных систем» в сетевидческую среду технологическая разнородность ресурсов выражается в различных форматах хранения данных, различных технологиях создания ресурсов и, как следствие, различных способах организации пользовательской работы с ними. Семантическая разнородность заключается в использовании в рамках ресурсов различных семантических моделей, определяющих смысл содержащегося в них контента. В результате, внешне (синтаксически) одни и те же понятия могут иметь различную смысловую нагрузку и наоборот – одно понятие может обозначаться формально различными синтаксическими конструкциями, что затрудняет возможность унификации приемов оперирования информацией, содержащихся в данных ресурсах. Организационная разнородность подразумевает различную принадлежность и целеполагание при использовании информационных ресурсов, что порождает специфические проблемы регулирования доступа к информации. Все это требует обеспечения интероперабельности интегрируемых в рамках сетевидческой виртуальной среды региональной безопасности компонентов СЦ, ресурсов и сервисов для повышения эффективности систем поддержки принятия решений в этой сфере.

С учетом того, что ситуационная осведомленность лиц, принимающих решения, в сетевидческой системе управления [3] формируется на основе восприятия элементов в окружающей среде, понимания ситуации и прогноза будущего состояния объекта управления, а также взаимного информационного обмена, на каждом уровне модели интероперабельности необходимо обеспечить:

1) использование общих протоколов, интерфейсов и форматов хранения, представления и обмена данными, единых технических регламентов совместного применения программно-аппаратных средств получения, обработки и анализа информации в рамках взаимодействия, стандартов обеспечения информационной безопасности – на уровне технологической интероперабельности;

2) способность взаимодействующих информационных систем СЦ однозначно понимать и корректно интерпретировать смысловые и содержательные аспекты полученной в процессе сбора и коммуникации информации о ситуации, проводить ее верификацию и комбинирование с другой уже имеющейся информацией в ходе совместной обработки, учет влияния человеческого фактора (психологических и культурных особенностей пользователей при работе с разными типами человеко-машинных интерфейсов) в рамках информационного обмена – на уровне семантической интероперабельности;

3) согласование параметров локальных целевых функций всех участников информационного обмена (субъектов управления) с общей глобальной целью

взаимодействия региональных СЦ в зависимости от режима функционирования СЦ и ситуации в регионе, использование единых административных регламентов (договоров, соглашений и других нормативно-правовых документов), определяющих правила и обязанности субъектов и объектов информационного взаимодействия – на уровне организационной интероперабельности.

Таким образом, на основании выше сказанного, можно заключить, что для достижения интероперабельности информационных систем СЦ на всех уровнях сетецентрического управления региональной безопасностью применение только согласованных наборов стандартов информационно-коммуникационных технологий представляется необходимым, но недостаточным условием. Для получения ощутимого комплексного эффекта интероперабельность должна обеспечиваться на более высоких уровнях – семантическом и административном, связанных с восприятием, осмыслением и использованием информации в организационных контурах принятия решений. Разработка формальных процедур и средств обеспечения семантической и организационной интероперабельности в процессе координации информационного взаимодействия в сетецентрических системах управления является сложной задачей. Эта проблема еще до конца не решена, несмотря на ее острую актуальность для различных приложений.

При разработке средств обеспечения интероперабельности компонентов информационных систем СЦ в сетецентрической среде управления региональной безопасностью важную роль играет анализ архитектурных особенностей построения этих систем. Проектирование архитектуры осуществляется в трех взаимосвязанных измерениях – функциональном, системном и техническом, отражающих различные аспекты функционирования и взаимодействия информационных систем СЦ. Этим обеспечивается целостность и единообразие в формализации представления всех элементов, процессов и системы в целом.

Функциональная архитектура определяет объекты системы, их роль и функции в системе, задачи и порядок их информационного взаимодействия, эффект от коммуникации на разных уровнях системы.

Системная архитектура определяет средства информационной поддержки, необходимые для достижения цели функционирования, форматы представления данных, информационные модели и процессы обработки информации, связи между ресурсами системы.

Техническая архитектура определяет состав коммуникационной инфраструктуры системы – каналы связи, спецификации используемых технических средств обеспечения внутриуровневого и межуровневого взаимодействия между элементами системы, совокупность стандартов, протоколов и интерфейсов информационного взаимодействия систем, технические регламенты и рекомендации по эксплуатации отдельных элементов и подсистем внутри единой системы и при взаимодействии с другими системами внешнего окружения.

При решении комплекса проблем интеграции «унаследованных систем» в единую виртуальную сетецентрическую среду необходимо сопоставлять основные параметры интероперабельности, заложенные в перечисленные типы архитектур, на начальной стадии проектирования информационных систем СЦ. К этим параметрам относятся: технико-экономические параметры, определяющие

общие требования к информационно-технологической архитектуре системы и позволяющие оценить степень соответствия ее эксплуатационных возможностей и целей функционирования; внутренние и внешние параметры системы, определяющие релевантность передаваемых и обрабатываемых данных используемым программно-аппаратным средствам обработки и анализа информации и позволяющие установить зависимость эффективности информационного взаимодействия между компонентами системы от конкретных технологий их реализации, используемых протоколов или других технических решений; параметры сетевого взаимодействия, определяющие способ реализации информационного взаимодействия и степень соответствия системной архитектуры принятым стандартам и уровню развития технической архитектуры.

Технологии и средства обеспечения интероперабельности

На сегодняшний день известно множество методов и технологий обеспечения различных аспектов интероперабельности распределенных систем. Однако эти средства применяются изолированно друг от друга и не увязаны в целостную методологическую систему. Все множество известных подходов к решению проблем интероперабельности на технологическом, концептуальном и организационном уровнях можно условно разделить на следующие категории [4]:

1) восходящий подход (подход «снизу – вверх»), который ориентирован, в первую очередь, на решение проблем технологической интероперабельности информационных систем путем использования общих стандартов и технологий передачи, хранения, представления и обработки информации на всех уровнях интеграции этих систем;

2) нисходящий подход (подход «сверху – вниз»), который сосредоточен на декомпозиции решения проблем интероперабельности с точки зрения архитектуры системы в целом, а затем с точки зрения отдельных подсистем и процессов вплоть до атомарных элементов;

3) общесистемный подход, основанный на анализе внутренних коммуникаций между компонентами внутри интегрированной системы и ориентированный на решение проблем интероперабельности путем формирования единой среды информационного взаимодействия между ними;

4) интерактивный подход, учитывающий характер сопряжения и взаимодействия различных систем между собой и внешней средой и ориентированный на достижение интероперабельности тех систем и их компонентов, уже имеющих различную технологическую реализацию и использующих отличные стандарты передачи, хранения, представления и обработки информации.

5) процессный подход, сосредоточенный на решении проблем интероперабельности с учетом идентификации, анализа и оптимизации полной группы технологических, организационных и организационно-технических факторов, запускающих на протяжении жизненного цикла систем различные процессы, влияющие на функционирование систем в целом и на изменение свойства их интероперабельности.

Выбор того или другого подхода зависит от функциональной разрозненности информационных систем, принципов их построения и технической реализации отдельных компонентов и других факторов.

Опираясь на идеологию перечисленных подходов и тот факт, что они за-

частую применяются в комбинации для преодоления проблем интероперабельности, по мнению автора, эффективное решение задач интеграции технологически и семантически неоднородных совместно используемых информационно-вычислительных ресурсов СЦ в задачах информационной поддержки управления региональной безопасностью достигается на основе применения агентных технологий, программного обеспечения промежуточного слоя и онтологий. В исследовании [2] показано, что мультиагентные технологии [5] являются эффективным средством реализации сетевидной системы СЦ управления региональной безопасностью. Это обусловливается тремя ключевыми факторами: высокой динамичностью структуры виртуальной среды взаимодействия субъектов управления, необходимостью координации децентрализованного принятия решений, а также учета человеческого фактора и организационных особенностей в процессе управления. Сетевые семантические модели представления знаний, в частности, онтологии [6] и концептуальное моделирование предметной области [7] являются эффективным средством описания и анализа семантики разнородных информационных ресурсов и сервисов. Решение проблемы семантической интероперабельности ресурсов СЦ основано на согласовании семантики через интеграцию онтологий ресурсов. Для интеграции онтологий используется дескриптивный подход [6], то есть связывание онтологий посредством общего тезауруса, который является расширяемым. Этим обеспечивается возможность интеграции в виртуальную сетевидную среду новых ресурсов и компонентов без существенной перенастройки всей системы.

Для решения проблем технологической интероперабельности неоднородных ресурсов на стороне информационных серверов СЦ используются программные адаптеры ресурсов (рис. 2), так называемые коннекторы. Они связывают интерфейсы прикладного программирования компонентов разнородных систем и обеспечивают согласование разных технологий хранения и представления данных на этапе их взаимодействия за счет реализации специфических для каждого конкретного ресурса механизмов доступа и извлечения данных.

Такие адаптеры и их функции определяются стандартом архитектуры для соединения серверов приложений JCA (Java EE Connector Architecture). Адаптеры ресурсов реализуют, в том числе, и алгоритм взаимодействия одноранговых узлов, основанный на спецификации JXTA (Juxtapose), имеющей статус стандарта де-факто. Применение REST-интерфейсов и стандартных протоколов обеспечивает возможность для привлечения к созданию программных адаптеров сторонних разработчиков.

Обозначения на рисунке 2: ЛПР – лицо, принимающее решение; (1) – запросы и результаты в локальных терминах; (2) – согласование семантики локального и общесистемного представления; (3) – запросы и результаты в общесистемных терминах.

Для комплексного решения задач обеспечения семантической интероперабельности информационных систем СЦ региона разработана интегрированная онтологическая модель жизненного цикла угроз региональной безопасности [2] (позиционирована на рисунке 2). Модель представляет собой разновидность неоднородной семантической сети. Особенностью данной модели является то, что в ней совмещаются формализованные модели предметной области «региональ-

ная безопасность» и исполнительной среды информационно-аналитической поддержки решения задач в этой предметной области. Модель обеспечивает как формальную основу для имитационного моделирования и автоматизации процессов управления региональной безопасностью, так и согласованное информационное взаимодействие ситуационных центров региона за счет автоматизированной обработки, унификации и интеграции семантически разнородных данных на стратегическом, тактическом и оперативном уровнях управления безопасностью. Это позволяет сформировать единое информационное поле ситуационной осведомленности для лиц, принимающих решения, в сетевидной системе управления региональной безопасностью.

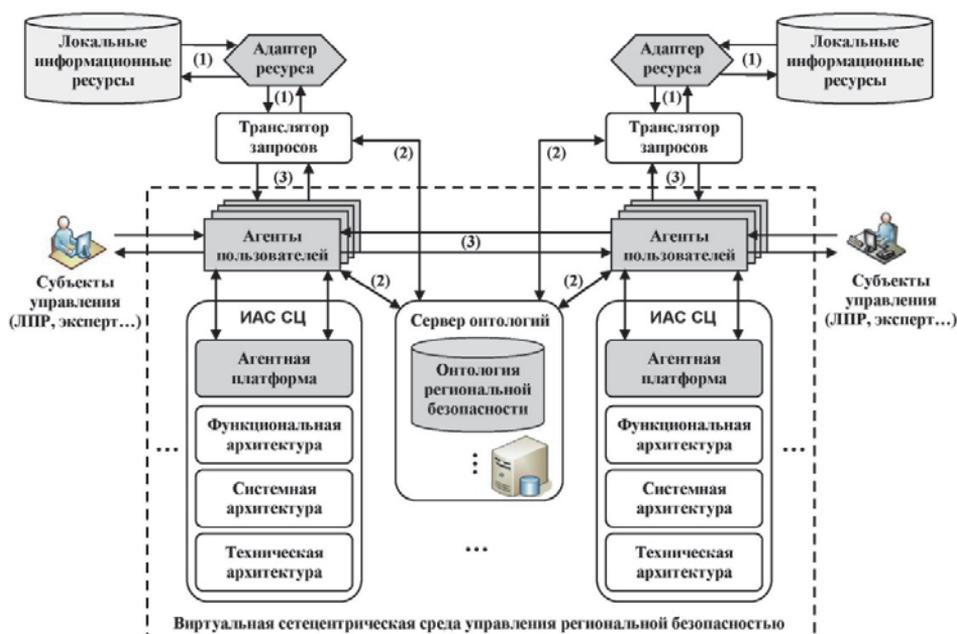


Рисунок 2 – Общая схема решения проблем интероперабельности ИАС СЦ региона на базе мультиагентного подхода и онтологий

Программная реализация модели выполнена в виде прикладной онтологии региональной безопасности. Онтология создана средствами языка онтологического моделирования OWL (Web Ontology Language) в инструментальной среде разработки онтологий Protégé. Созданная онтология содержит 7 уровней таксономии и включает в себя более 500 классов, более 150 атрибутов, более 100 иерархических, ассоциативных и функциональных ограничений. Онтология имеет высокую степень детализации, что обеспечивает достаточную полноту концептуального описания объектов и задач обеспечения безопасности и связанных с ними информационных процессов. Так как агенты реализованы на платформе JADE, то для формирования моделей знаний агентов и обеспечения возможности агентов работы с разработанной онтологией использована специальная библиотека AgentOWL.

Для формирования интероперабельной сетевидной среды ситуаци-

онного управления региональной безопасностью предлагается использовать средства мультиагентной виртуализации в составе систем поддержки принятия решений СЦ региона. К этим средствам относятся мультиагентная исполнительная среда (система агентов и веб-сервисов) и семантическое пространство знаний (комплекс онтологических моделей предметных областей, для которых предназначены агенты, и сеть информационных ресурсов). Эти средства позволяют решать проблемы технологической и семантической интероперабельности на базе использования единых стандартов разработки мультиагентных систем и технологий Семантического Веба. Средства виртуализации, используемые для построения интероперабельной информационной среды взаимодействия СЦ региона, представлены на рисунке 3. При таком подходе сетевая среда формируется в виде сети виртуальных центров ситуационного управления для каждой области региональной безопасности [2, 3].

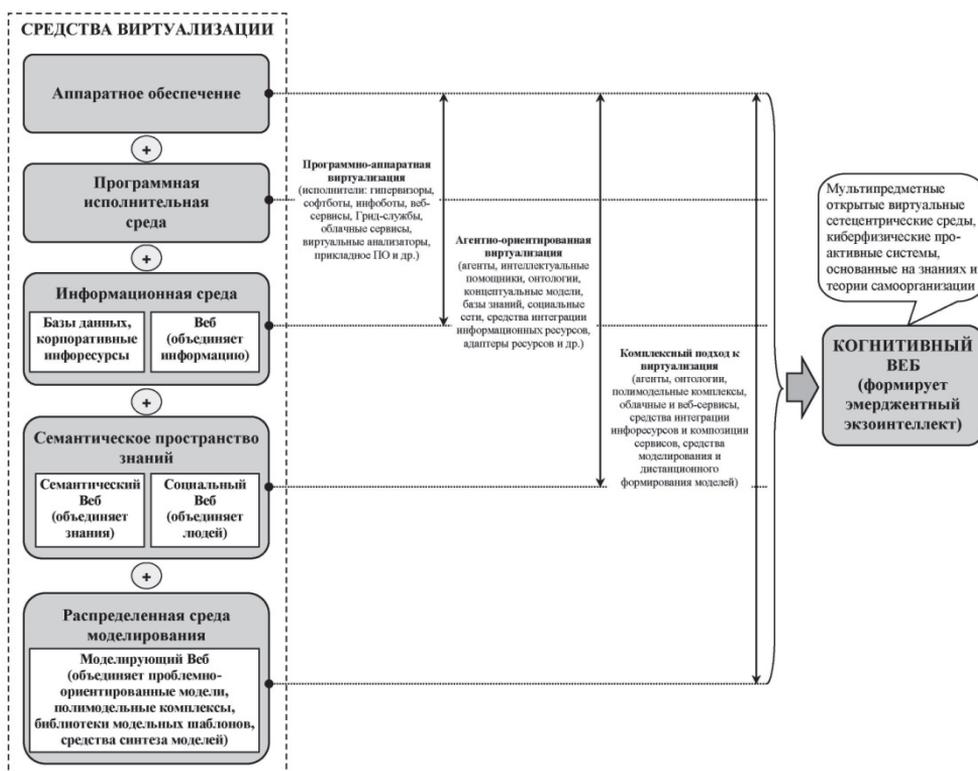


Рисунок 3 – Средства построения сетевых сред управления безопасностью региона на базе подхода мультиагентной виртуализации

Интеграция предлагаемых решений с известными разработками в области обеспечения интероперабельности информационных систем позволит усилить эффект от совместного использования инструментов СЦ для различных задач ситуационного управления безопасностью, а также разрешить ряд противоречий, возникающих на практике при взаимодействии СЦ в условиях региональных кризисных ситуаций. Так особое внимание заслуживает исследование [4], в ко-

тором подробно рассматривается российский и зарубежный опыт решения проблем интероперабельности разнородных сетевых информационных управляющих систем на основе совместного использования созданной в Институте радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН модели интероперабельности в соответствии с ГОСТ Р 55062-2012 и американских моделей LISI (Levels of Information Systems Interoperability), SCOPE (Systems, Capabilities, Operations, Programs, and Enterprises model for interoperability assessment) и концепции DODAF (Department of Defense Architecture Framework), а также предлагаются варианты сопряжения и адаптации этих моделей для отечественных сетевых систем управления с учетом специфики их приложений. Представленные в настоящей работе результаты и критический анализ моделей интероперабельности сетевых систем [8-10] позволяют говорить о возможности комплексного решения проблем обеспечения интероперабельности информационных систем ЦС, решающих как общие задачи, так и задачи, обусловленные оперативной обстановкой в регионе, в самой ближайшей перспективе.

Заключение

Цифровизация государственного и регионального управления является общемировой тенденцией. При этом потенциал цифровых технологий в сфере управления социально-экономическими системами значительно шире и охватывает все этапы управления – от сбора данных и мониторинга до обработки и анализа больших потоков информации и прогнозирования различных вариантов развития критических ситуаций для поддержки принятия оперативных и стратегических решений. В этом контексте эффективным инструментом ситуационного управления региональной безопасностью становятся ЦС и их виртуальные аналоги, интегрируемые в единую сетевую систему. Однако проблемы обеспечения интероперабельности затрудняют интеграцию различных средств информационно-аналитической поддержки и препятствуют их совместному использованию в рамках существующей системы ЦС. На данный момент окончательного решения этой задачи пока не получено. Несмотря на то, что интеграция информационных систем ЦС в единую виртуальную сетевую среду сопряжена с определенными трудностями, в работе предложены возможные пути решения проблемы обеспечения технологической, семантической и организационной интероперабельности компонентов этих систем. Улучшение же этих решений является предметом дальнейших исследований и разработок.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (тема НИР № 0226-2019-0035) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-03022-мк).

Литература

1. ГОСТ Р 55062-2012. Информационные технологии. Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения // М.: Стандартинформ. 2014. 12 с.
2. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике // Апатиты: КНЦ РАН. 2016. 222 с.

3. Oleynik A., Fridman A., Masloboev A. Informational and analytical support of the network of intelligent situational centers in Russian Arctic // CEUR Workshop Proceedings. 2018. vol. 2109. pp. 57-64.
4. Макаренко С.И., Олейников А.Я., Черницкая Т.Е. Модели интероперабельности информационных систем // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 215-245.
5. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. Second Edition // John Wiley & Sons. 2009. 484 p.
6. Ломов П.А., Шишаев М.Г. Интеграция онтологий с использованием тезауруса для осуществления семантического поиска // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 3. С. 49-59.
7. Кузьмин И.А., Путилов В.А., Фильчаков В.В. Распределенная обработка информации в научных исследованиях // Л.: Наука. 1991. 304 с.
8. Зацаринный А.А., Козлов С.В., Шабанов А.П. Интероперабельность консолидируемых организационных систем // Проблемы управления. 2017. № 6. С. 43-49.
9. Франгулова Е.В. Классификация подходов к интеграции и интероперабельности информационных систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2010. № 2. С. 176-180.
10. Акаткин Ю.М., Ясиновская Е.Д. Цифровая трансформация государственного управления: датацентричность и семантическая интероперабельность // М.: ЛЕНАНД. 2019. 724 с.

УДК 681.3

Особенности создания и модернизации структурированной кабельной системы для предприятия ракетно-космической отрасли

А.П. Мороз, доктор технических наук, профессор,

Академик Российской академии космонавтики,

А.Д. Емельянов, студент,

Государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Рассматриваются особенности создания и модернизации структурированной кабельной системы на примере предприятия ракетно-космической отрасли. Проанализирована специфика предприятия. Показана целесообразность создания комбинированной системы на основе проводной техники и радиолинии.

Структурированная кабельная система, информация, сигнал, ошибка передачи сигнала, кабель, помеха, протокол передачи.

Features of creating and modernizing a structured cable system for a rocket and space industry enterprise

Al.P. Moroz, doctor of science, Professor,

Academician of the Russian Academy of Sciences,

A.D. Emelyanov, student,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article considers the features of creating and modernizing a structured cable system based on the example of a rocket and space industry enterprise. The specifics of the enterprise are analyzed. The expediency of creating a combined system based on wire technology and radio lines is shown.

Structured cabling system, information, signal, signal transmission error, cable, interference, transmission Protocol.

В настоящее время трудно представить работу современного предприятия без локальной или корпоративной сети [6, 8 9]. Объединение рабочих станций с помощью структурированной кабельной системы (СКС) в единую сеть позволяет достичь четких и слаженных действий сотрудников, обеспечить своевременный обмен информацией, стратегическое планирование и оперативное управление предприятием и технологическими процессами создания и испытания изделий, контроль безопасности предприятия и др.

Быстрое развитие информационных технологий порождает не только новые задачи, но и повышение сложности их выполнения. В связи с этим возникает необходимость расширения штата сотрудников организации, занимающимся

эксплуатацией информационных систем, что увеличивает нагрузку на существующую СКС. Подобная ситуация наблюдается в настоящее время и на предприятии ФКП «НИЦ РКП».

В связи с постоянным повышением количества передаваемых данных, особенно во время проведения испытаний, в существующей сети могут появиться осложнения с обеспечением необходимой скорости передачи информации, организацией дополнительных рабочих мест, внедрением новых высокоскоростных протоколов. Поэтому актуальной является задача модернизации имеющейся СКС.

Особенностью создаваемой СКС рассматриваемого предприятия является то, что испытательные станции удалены от здания отдела измерений на значительное расстояние. Вместе с тем между ними необходимо обеспечить надежный обмен данными с высокой скоростью. В связи с этим в первую очередь требуется модернизация сети для отдела измерений рассматриваемого предприятия.

Современное оборудование для создания СКС должно соответствовать ряду требований [1-5, 7]. Обычно они являются противоречивыми. Например, противоречивы требования к функциональным возможностям, надежности и стоимости. Поэтому выбор необходимого оборудования представляет собой непростую, весьма ответственную и, в известном смысле, оптимизационную задачу, так как требуется обеспечить компромисс между возможностями создаваемой системы с учетом пожеланий заказчика и ее стоимостью.

Проведенный анализ показывает, что для обеспечения связи между локальными и глобальными сетями целесообразно выбрать маршрутизатор-коммутатор MikroTik CRS326-24S+2Q+RM. Он оснащен 24 портами SPF+ и 2 портами QSPF+. В перспективе это позволит увеличить количество сотрудников отдела измерений благодаря повышению пропускной способности сети до 10...40 Гбит/с, выполнить установку оптических трансиверов для перехода на волоконно-оптический кабель, обеспечить высокоскоростную передачу огромного объема данных и, следовательно, повысить общую производительность СКС. Устройство обладает двумя операционными системами: SwitchOS и RouterOS. При загрузке SwitchOS мы получаем управляемый коммутатор третьего уровня, а при RouterOS можно задействовать функции обработки трафика, превратив устройство в гибридный маршрутизатор и коммутатор. Благодаря этому отпадает необходимость в отдельном дополнительном маршрутизаторе. Управление маршрутизатором-коммутатором может осуществляться официальной программой компании MikroTik, веб-утилитой WebFlig или консольным портом. Технические характеристики маршрутизатора-коммутатора Thecus NAS N7710-G можно найти на сайте поставщика, а его внешний вид показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – Маршрутизатор-коммутатор MikroTik CRS326-24S+2Q+RM

Выбор сервера для отдела измерений осуществлялся по следующим критериям: увеличенный объем хранимых данных, поддержка новых стандартов передачи данных, увеличенный функционал по сравнению с текущей моделью. Проанализировав современный рынок, был выбран настольный сервер Thecus NAS N7710-G.

Сервер оснащен семью отсеками SATA для установки жестких дисков общим объемом до 56 ТБ, а также имеет важную особенность – встроенный 10-гигабитный сетевой адаптер для высокоскоростной передачи данных. В материнскую плату установлен процессор Intel Pentium G850 с частотой процессора 2,9 ГГц и поддержкой команд x64. Имеется 4 DIMM – слота для установки оперативной памяти DDR3 объемом до 32 ГБ, по умолчанию установлен модуль на 4 ГБ. Имеется широкий набор режимов RAID: JBOD, 0, 1, 5, 6, 10, 50. Это позволяет пользователю проводить настройку с соблюдением оптимального баланса между производительностью и избыточностью. Для обеспечения безопасности хранения томов RAID используется алгоритм AES с 256-разрядным ключом.

Управление сетевым хранилищем осуществляется при помощи веб-интерфейса ThecusOS. Наличие сертификации VMware V5.5 делает устройство совместимым с большинством технологий виртуализации. К программному обеспечению относится: Acronis True Image которая в автоматическом режиме создает резервные копии данных на локальных или удаленных носителях, Data Burn позволяет создавать резервные копии на оптических дисках CD, DVD или Blu-Ray, iSCSI Thin Provisioning для максимально эффективного распределения пространства между пользователями. Имеется возможность дистанционной настройки, проверки состояния, управления пользователями системы при помощи мобильного приложения. Технические характеристики сервера Thecus NAS N7710-G приведены на сайте поставщика, а его внешний вид показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – Сервер Thecus NAS N7710-G

Для защиты рабочих станций от скачков напряжения в сети и парирования несанкционированных отключений подачи электроэнергии необходимо применить источник бесперебойного питания (ИБП) CyberPower UNC850E. Он обладает выходной мощностью 850 ВА, двумя резервными розетками и относится к типу линейно-интерактивных устройств. Предусматривается регулирование напряжения для стабилизации сигнала неустойчивой электросети и обеспечения безопасного питания для всего подключенного оборудования в автоматическом режиме. ИБП переходит на питание от батареи за 4 мкс. Он обеспечивает пользователю продолжение работы в течение двух минут при нагрузке с мощностью в 310 Вт, что вполне достаточно для сохранения данных и завершения работы компьютера. Звуковые сигналы ИБП при переходе в режим работы от батареи или при низком уровне её заряда помогут пользователю лучше скоординировать свои действия. Имеется защита от всплесков напряжения, высоковольтных импульсов, перегрузки сети и фильтрация электромагнитных помех. ИБП имеет огнестойкий и компактный корпус. Технические характеристики ИБП CyberPower UNC850E приведены на сайте поставщика, а его внешний вид показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – ИБП CyberPower UNC850E

Причинами выбора другого ИБП APC Back-UPS Pro RS 900 для аппаратной являются улучшенные технические характеристики, расширенный функционал и возможность установки дополнительного серверного оборудования. ИБП APC Back-UPS Pro RS 900 имеет пять евророзеток: три для аварийного питания и две для защиты оборудования от импульсов, замыканий и перегрузки сети. Немаловажно, что в ИБП установлены две батареи емкостью по 7 Ач. Время работы при максимальной выходной мощности в 540 Вт составляет 5 минут. ИБП обладает встроенным процессором, способным на основе состояния батареи включать зарядку только в определенных условиях, что существенно увеличивает срок службы аккумуляторов. Также имеется ЖК-экран для отображения инфор-

мации о состоянии и работе устройства, а управление осуществляется при помощи официального программного обеспечения от производителя через USB или RS-232 разъемы. Имеется возможность задать верхний и нижний порог напряжений, при которых происходит переход на питание от батареи, настроить режим работы на энергосберегающий или максимальное время работы ПК при отключении электричества. В качестве достоинства следует также отметить возможность «холодного старта»: при отсутствии внешнего питания подключенные устройства сразу запитываются от батареи ИБП, и возможность «горячей» замены батареи. Технические характеристики ИБП APC Back-UPS Pro RS 900 приведены на сайте поставщика, а его вид показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – ИБП APC Back-UPS Pro RS 900

Рассмотрим вопросы выбора пассивного оборудования [2, 7].

Кабель горизонтальной подсистемы. Горизонтальный кабель является частью СКС и соединяет информационную розетку на рабочем месте с горизонтальным кроссом. Основываясь на определенных требованиях к кабелю, были выделены две категории витой пары: 5е и 6. Для выбора кабеля горизонтальной подсистемы следует провести сравнительный анализ обеих категорий.

Вначале рассмотрим ширину полосы пропускания: если у категории 5е это 100 МГц, то у категории 6 этот параметр доходит до 250 МГц. За счет улучшений в конструкции кабеля категории 6 увеличена не только ширина полосы пропускания сигнала, но и улучшена целостность сигнала. Это особенно важно при постоянно растущем количестве и размере передаваемых в сети данных, что приводит к необходимости повышения скорости передачи информации и выбора лучшей категории витой пары.

По сравнению с категорией 5е, где диаметр сечения кабеля равен 24AWG, то есть 0,51 мм, число витков не менее 2 на сантиметр длины, в катего-

рии 6 диаметр сечения кабеля был увеличен до 27AWG или 0,57 мм, как и количество витков – более 2 на сантиметр длины. Еще одним важным отличием является установка сепаратора для разделения витых пар, эти отличия показаны на рисунке 5.

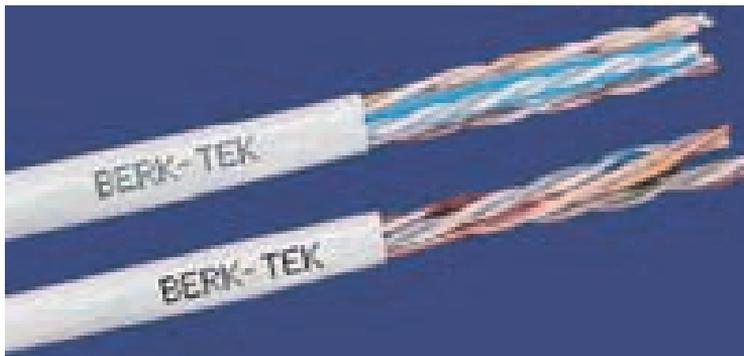


Рисунок 5 – Кабели категорий 5е и 6

Подобное усовершенствование делает кабель категории 6 значительно надежнее в эксплуатационном плане, обеспечивает стабильную работу сети при резких изменениях температуры, позволяет добиться снижения погонного и внутрикабельного переходного затухания, повышает устойчивость к воздействию внешних источников шумов, таких как силовые линии, электрическое оборудование, а также помехи, излучаемые соседними кабелями [3].

Как правило, при проектировании СКС монтаж кабельного оборудования осуществляется в область с повышенной температурой, как например натяжной потолок, где из-за скопления теплого воздуха разница температур достигает 25 градусов. Это негативно сказывается на сроке службе и скоростных характеристиках кабеля.

Анализ показывает, что исследованием влияния температуры на передачу данных занимались во многих организациях. Например, такие исследования выполнялись французской компанией Nexans, которая является одним из известных производителей кабельно-проводниковой продукции. Анализ результатов этих экспериментов показывает, что при повышении температуры в экспериментальной зоне с 20 до 70°C существенно возрастает частота ошибок передаваемых данных. Это относится к кабельным системам всех рассматриваемых категорий: 5е, 6 и 6а. Однако степень влияния на них изменений температуры отличается весьма существенно (в разы). Эти отличия показаны на рисунке 6. По вертикальной оси отложена условная частота ошибок при передаче данных по кабельным системам разных категорий в зависимости от температуры.

Анализ рисунка 6 показывает, что при высокой температуре (70°C) у кабелей категории 5е частота ошибок самая высокая – 30, в то время как у кабелей категории 6 это значение равно 15, а у кабелей категории 6а – приблизительно 7,5. То есть при переходе от кабелей категории 5е к категориям 6 и 6е достоверность передачи данных при высокой температуре отличается в два раза соответственно.

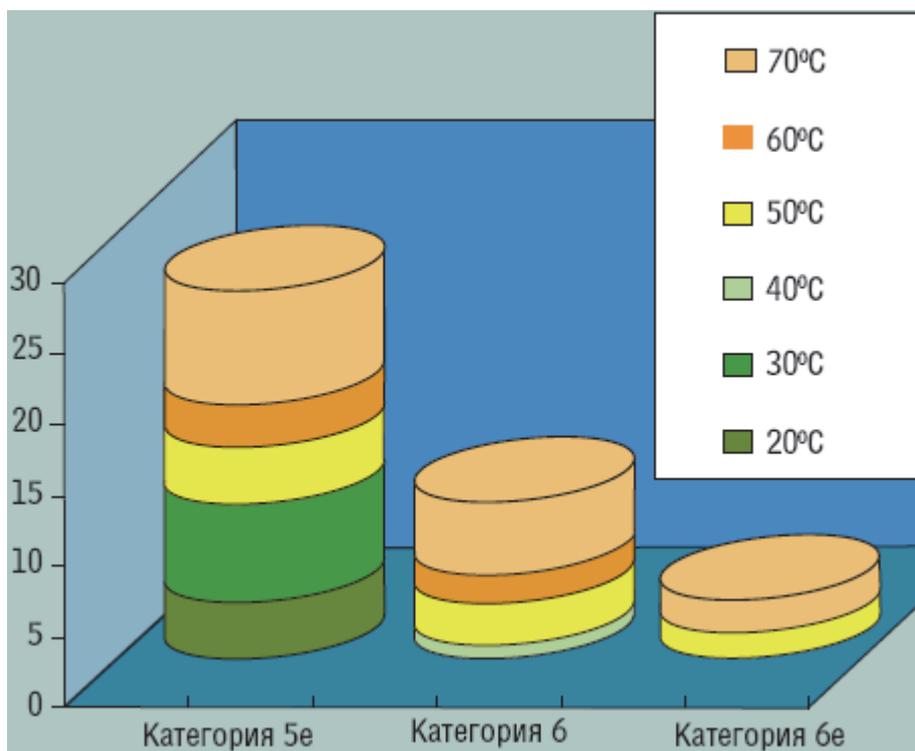


Рисунок 6 – Зависимость частоты ошибок от температуры

Принимая во внимания все вышеперечисленные факты, а также значения фактических рабочих температур и их перепад в помещениях рассматриваемого предприятия и учитывая критерий цена-качество, принимается решение использовать витую пару категории 6. Такое решение было принято и с учётом перспективы увеличения количества сотрудников на предприятии в будущем, что приведет к возрастанию объема передаваемых по сети данных, нагрузки на сеть и потребности в повышении скорости передачи и устойчивости к помехам и температурам.

Рассчитаем количество кабеля, требующегося для данной СКС. Расчет содержит пять простых процедур.

1. Вначале определяем среднее значение длины L_{cp} кабеля, необходимое для создания одного тракта по формуле:

$$L_{cp} = \frac{L_{max} + L_{min}}{2} K_T + L_{зап}, \quad (1)$$

где L_{max} и L_{min} – протяженность кабельной трассы от монтажного конструктива до розеточного модуля информационной розетки у самого далекого и самого близкого рабочего места, соответственно, рассчитанная с учетом всех спусков, подъемов, межэтажных проемов и т.д.;

K_T – коэффициент технологического запаса, обычно принимаемый равным 1,1 (10% от фактической средней протяженности кабельной трассы);

$L_{зап}$ – запас для выполнения разделки кабеля в розетках и на кроссовых панелях (обычно принимается равным 0,6...1 м).

Подставляя фактические численные значения в формулу (1), получим:

$$L_{cp} = \frac{L_{max} + L_{min}}{2} K_T + L_{зап} = \frac{53 + 12,5}{2} \times 1,1 + 0,6 = 36,6 \text{ (м)}.$$

2. Определяем суммарное количество $N_{КТИ}$ кабельных трактов, на которые хватит одной заводской бухты кабеля, имеющей длину L_B . Учтем, что обычно длина кабеля в бухте равна $L_B = 305$ м. Подставляя значения, получаем

$$N_{КТИ} = \frac{L_B}{L_{cp}} = \frac{305}{36,6} = 8. \quad (2)$$

3. С привлечением данных по количеству информационных розеток и количеству розеточных модулей в каждой розетке рассчитываем общее количество $N_{КТ}$ трактов. Обычно $N_{КТ} = 2N_P$, где N_P – количество информационных розеток.

В нашем случае количество информационных розеток N_P на первом этаже здания отдела измерений равно 11, поэтому $N_{КТ} = 2 \times 11 = 22$.

4. Рассчитываем общее количество требующихся упаковок кабеля с учетом того, что полученный результат необходимо округлить до ближайшего меньшего целого числа:

$$N_B = \frac{N_{КТ}}{N_{КТИ}} = \frac{22}{8} \approx 3. \quad (3)$$

5. Таким образом, для прокладки кабельных горизонтальных трактов на первом этаже отдела измерений потребуется приобрести следующее количество кабеля:

$$L_{\Sigma 1эт} = L_B N_B = 3 \times 305 = 915 \text{ (м)}. \quad (4)$$

Здание отдела измерений является двухэтажным. Поэтому повторяя подобную процедуру для второго этажа, получаем $L_{\Sigma 2эт} = 1220$ м горизонтального кабеля. Следовательно, для горизонтальной части СКС здания требуется $L_{\Sigma} = L_{\Sigma 1эт} + L_{\Sigma 2эт} = 915 + 1220 = 2135$ метров кабеля.

Рассмотрим теперь вертикальную подсистему СКС. Она предназначена для соединения между собой распределительных шкафов этажей. Для соединения оборудования разных этажей будем использовать MikroTik S+31DLC10D - оптический модуль 10G SFP+ с разъемом Dual LC для подключения одномодового (Single Mode) оптоволоконного кабеля на расстояние до 10 км. Передача/прием данных происходит по двум оптическим волокнам на длине волны 1310 нм. Этот модуль поддерживает функцию контроля состояния через DDM. Поскольку в нашем случае здание содержит всего два этажа, то целесообразно передачу и прием данных осуществлять по разным волокнам оптического кабеля.

Для обеспечения связи между активным оптическим оборудованием, оптическими кроссами и создания внутрикроссовых соединений применим оптические шнуры. Для этого используем соединительный патчкорд LC-LC simplex SM 3м, представляющий собой отрезок одномодового кабеля SM 9/125 G.652, оконцованный с двух сторон оптическими разъемами LC.

Далее требуется выполнить проектирование радиомоста. Технология создания радиомоста заключается в использовании точек доступа с необходимой мощностью. Для обеспечения требуемой дальности обмена данными между испытательными станциями и зданием отдела измерений, а также для затруднения несанкционированного доступа к передаваемой информации, в создаваемом радиомосте применим параболическую антенну. К числу ее достоинств относится узкая ширина диаграммы направленности, определяемая апертурой антенны и

рабочим диапазоном частот радиолинии.

Для обеспечения высокой пропускной способности целесообразно использовать нераспространенный радиочастотный диапазон - 3, 5 или 10 ГГц. Использование нестандартного частотного диапазона позволяет также повысить достоверность передачи информации за счет уменьшения уровня помех от сторонних радиолиний.

Проанализировав современный рынок, было принято решение остановиться на оборудовании компании Ubiquiti. Компания работает с 2005 г. и зарекомендовала себя качественным производителем беспроводного оборудования для предприятий.

В качестве точек доступа будут использоваться Ubiquiti PowerBeam 5AC Gen2 с грозозащитой PG 4 и кабелем ToughCable Pro, являющимся экранированным кабелем категории 5e, предназначенным для работы в неблагоприятных условиях. Одним из отличий линейки PowerBeam является поддержка протокола AirMax. AirMax - это протокол передачи информации в беспроводных сетях, разработанный компанией Ubiquiti. Основное отличие AirMax от IEEE 802.11 состоит в принципе работы, который заключается том, что базовая станция сама определяет очередность работы подключенных устройств и выделяет им определенное количество времени для передачи данных. Главным преимуществом подобного способа работы является решение проблемы коллизий при подключении большого количества испытательных станций в случае расширения предприятия, а, следовательно, влечет за собой улучшение качества связи на радиолинии. А для достижения высокой скорости и помехозащищенности радиомоста в AirMax применяется метод пространственного кодирования сигнала MIMO. Кроме того, для обеспечения дополнительной защиты передаваемой информации от несанкционированного доступа можно применить дополнительное преобразование передаваемых данных с целью представления их остатками от деления на модули сравнения [4, 5].

Определим высоты установки антенн точек доступа радиомоста. Для этого необходимо учесть профиль рельефа местности между точками доступа и рассчитать размеры первой зоны Френеля (рисунок 7).

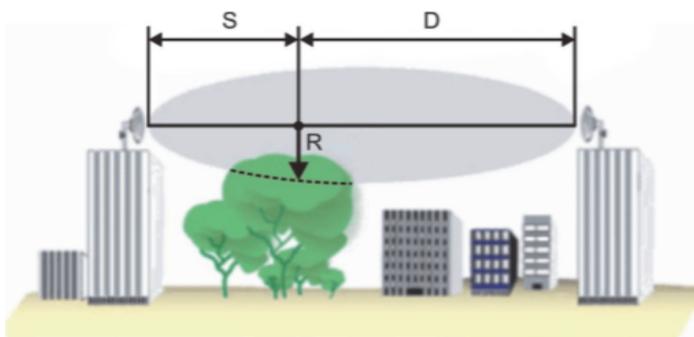


Рисунок 7 – Зона Френеля

Радиоволны при их направленном излучении, распространяясь в пространстве, занимают определенный объем. Он представляет собой тело вращения

в виде эллипсоида (рисунок 7). Максимальный радиус такого эллипсоида находится в середине пролета радиотракта.

Радиус первой зоны Френеля над находящейся между антеннами радиомоста преградой определим по формуле:

$$R = 17,3 \sqrt{\frac{1}{f} \frac{SD}{S+D}}, \quad (5)$$

где R – радиус первой зоны Френеля (м);

D – расстояние от первой антенны до высшей точки препятствия (км);

S – расстояние от второй антенны до высшей точки препятствия (км);

f – рабочая частота радиолинии (ГГц).

Подставляя в формулу (5) значения конкретных исходных данных, получаем следующее значение радиуса R первой зоны Френеля:

$$R = 17,3 \sqrt{\frac{1}{f} \times \frac{SD}{S+D}} = 17,3 \sqrt{\frac{1}{5,8} \times \frac{1,5 \times 2}{1,5 + 2}} \approx 6,6 \text{ (м)}.$$

Для обеспечения минимального затухания сигнала необходимо, чтобы препятствие не находилось в зоне Френеля, радиус которой равен 6,6 м. Поэтому антенны проектируемого радиомоста будем размещать на высоте порядка 8 метров над поверхностью Земли на крыше зданий.

Литература

1. Артющенко В.М. Проектирование сетей подвижной связи с кодовым разделением каналов: монография – ФГБОУ ВПО ФТА // М. 2012. 204 с.
2. Артющенко В.М., Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Построение и функционирование структурированных кабельных систем [Текст] / В. М. Артющенко, А. Б. Семенов, Т. С. Аббасова: учебное пособие / под ред. д.т.н., профессора Семенова А.Б. // Королев МО: МГОТУ. Ярославль: Канцлер. 2017. 184 с.
3. Брэгг Р., Родс-Оусли М., Страссберг К. Безопасность сетей: полное руководство / М.: Эком. 2016. 912 с.
4. Мороз А.П. Повышение эффективности телеметрирования быстроменяющихся параметров при натурных испытаниях летательных аппаратов: монография // Королев МО. ФТА. 2012. 224 с.
5. Мороз А.П., Прасолов Д.Н. Способы представления данных полусловами-остатками для повышения достоверности передачи информации // Информационно-технологический вестник. 2019. Т. 19. № 1. С. 37-47.
6. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. Стандарт третьего поколения / СПб.: Питер. 2016. 944 с.
7. Семенов А.Б., Проектирование и расчет структурированных кабельных систем и их компонентов // М.: ДМК Пресс; М.: Компания АйТи. 2010. 416+16 с.: ил.
8. Смелянский Р.Л. Компьютерные сети. В 2 т. Т. 2. Сети ЭВМ / М.: Academia. 2016. 448 с.
9. Таненбаум Э. Компьютерные сети // СПб.: Питер. 2019. 960 с.

УДК 004.85

Основы оценки интегральной эффективности ведения информационной безопасности и радиоэлектронной борьбы

В.Н. Соляной, кандидат военных наук, доцент, старший научный сотрудник,
заведующий кафедрой «Информационной безопасности»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Бурный рост «цифровой» экономики в современном мире обуславливает необходимость постоянного совершенствования перспективных технологий в области обеспечения информационной безопасности. Развитие мобильных информационных технологий, которые базируются на широком использовании подвижных радиоэлектронных компонентах, приводит к целесообразности создания интегральных (единых) комплексных систем информационной безопасности и радиоэлектронной борьбы. В этих условиях проблематичным является осуществление как общей, так и частных оценок эффективности их использования. В настоящее время процесс развития и постоянной модернизации этого нового направления по совместному обеспечению безопасности критической информационной инфраструктуры представляет научный и практический интерес.

«Цифровая» экономика, информационная безопасность, радиоэлектронная борьба (защита), интегральная эффективность.

The basics of assessing the integral effectiveness of information security and electronic warfare

V.N. Solyanoy, Associate Professor, S.N.S., Head of the Department
of Information Security,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The rapid growth of the digital economy in today's world necessitates the continuous improvement of advanced technologies in the field of information security. The development of mobile information technologies, which are based on the widespread use of mobile electronic components, leads to the feasibility of creating integrated (single) integrated systems of information security and electronic warfare. In these circumstances, both general and private assessments of their effectiveness are problematic. At present, the process of developing and constantly modernizing this new area of critical information infrastructure security together is of scientific and practical interest.

«Digital» economy, information security, electronic warfare (protection), integral efficiency.

Постоянно возникающие информационные конфликты в условиях цифровизации современной экономики обостряют и усложняют процессы, связанные с разрешением появляющихся проблем по обеспечению информационной безопасности (ИБ) критической информационной инфраструктуры (КИИ) важнейших объектов промышленности и обороны страны. Быстро меняющаяся информационная обстановка в таких конфликтах разного масштаба обуславливает необходимость использования высокоомобильных сил по обеспечению ИБ в различных удаленных районах и регионах страны с широким применением наземных, морских, воздушных и космических радиоэлектронных средств (связи и управления, разведки, навигации, радиолокации и т.п.) [4, с.14].

Данная постановка задачи предопределяет изыскание новых практических взглядов и научных подходов по осуществлению интегральной оценки эффективности совместных действий привлекаемых сил и средств как ИБ, так и РЭБ и, в частности, мер по радиоэлектронной защите (РЭЗ) используемых радиоэлектронных систем и комплексов (РЭС и К).

В рамках самостоятельных областей по ИБ [8, с.56] и по РЭБ [9, с.284] вопросы, связанные с оценкой эффективности нашли достаточно широкий обзор в указанной выше научно-практической литературе. В то же время слияние отдельных задач по оценке эффективности ИБ и РЭБ в единые целевые установки и реализуемые, как техническими, так и технологическими процессами, не нашли своего должного отражения в существующей литературе.

В этих условиях возникает проблема необходимости осуществлении оценки комплексного обеспечения безопасности функционирования КИИ силами и средствами интегральной системы (ИБ и РЭБ) в условиях протекания радиоэлектронно-информационных конфликтах. Данная проблема особенно ярко проявляется применительно к космической сфере существования конфликтных ситуаций различного масштаба [7, с.168]. Следовательно, целью исследования, представленных в данной статье является разработка общих основ по оценке эффективности интегрального введения ИБ и РЭБ, прежде всего, в интересах безопасности функционирования критической информационной инфраструктуры (КИИ) важнейших объектов промышленности и обороны страны.

В основе разрешения рассмотренной проблемы лежат рекомендуемые базовые положения по моделированию разрозненных отдельных подсистем ИБ и РЭБ в интегральной системе ведения информационного противоборства [1, с.53]. Такую предлагаемую интегральную систему, в общем виде, можно представить как некое K -мерное пространство. В такой системе определяется результат совместной деятельности по безопасности функционирования КИИ. Данный суммарный показатель (F_{Σ}) является суммой частных показателей (F_i), которые характеризуют отдельные составляющие общего показателя (1)

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k F_i \quad (1)$$

Данные показатели искомой оценки эффективности отражают вероятностные события и имеют следующие ограничения:

$$F_i = |F_i| \leq 1;$$

$$F_{\Sigma} = |F_{\Sigma}| \leq 1.$$

Применительно к выше изложенным подсистемам ИБ и РЭБ, которые являются определяющими [5, с.87 и с.133] в системе информационного противоборства (ИПБ), их общая эффективность можно оценивать по формуле (2).

$$F_{ИПБ} = F_{ИБ} + F_{РЭБ}, \quad (2)$$

где $F_{ИБ}$ – оценка функциональной эффективности подсистемы ИБ и которая определяется по формуле (3).

$$F_{ИБ} = F_{ФЗ} + F_{ТЗ} + F_{ПАЗИ} + F_{УПР.ИБ} \quad (3)$$

где $F_{ФЗ}$; $F_{ТЗ}$; $F_{ПАЗИ}$; $F_{УПР.ИБ}$ – соответственно, эффективности подсистем: физической защиты; технической защиты; программно-аппаратной защиты информации; управление ИБ.

$F_{РЭБ}$ – оценка функциональной эффективности подсистемы РЭБ, которая определяется по формуле (4).

$$F_{РЭБ} = F_{РЭР} + F_{РЭП} + F_{РЭЗ} + F_{УПР.РЭБ}, \quad (4)$$

где $F_{РЭР}$; $F_{РЭП}$; $F_{РЭЗ}$; $F_{УПР.РЭБ}$ – соответственно, эффективности подсистем: радиоэлектронной разведки; радиоэлектронного подавления; радиоэлектронной защиты; управления РЭБ.

В зависимости от условий (внутренних и внешних факторов – μ_j) протекания информационно-радиоэлектронного конфликта соответствующий частный показатель эффективности (F_i) можно вычислить по формуле (5).

$$F_i^j = \mu_j * F_i, \quad (5)$$

где μ_j – вероятностный показатель, учитывающий внутренние и внешние условия функционирования оцениваемых систем.

При этом показатель (μ_j) зависит как от обеспеченности исследуемого процесса (подсистемы) – вероятностью функционирования (P), так и от времени (T) его протекания или реализации (6).

$$\mu_j = f(P, T) \quad (6)$$

$$(0 \leq \mu_j \leq 1)$$

В целом, разрешение изложенной проблемы по определению методологических аспектов моделирования оценок интегральной эффективности ИБ КИИ во взаимодействии с системой РЭБ в современных информационно-радиоэлектронных конфликтах непростое, так как зависит от большого числа факторов и условий. В таких случаях целесообразно рассматриваемый подход

реализовывать на основе компьютерного моделирования [6, с.4] с использованием методов математической статистики при анализе опасностей [10, с.283].

В основе компьютерного моделирования для решения поставленной задачи предлагается использовать методологический подход изложенной в литературе [3, с.189]. Данная модель позволяет оценивать как отдельные процессы, объекты и подсистемы ИБ, так и в комплексе в виде комплексной системы ИБ (как совокупность различных подсистем ИБ). Вопросы, связанные с оценкой эффективности применения мер по РЭБ, в явном виде, в данном источнике не рассматривались.

Структура упругой предложенной комплексной модели представлена на рисунке в виде таблицы 1 и состоит из совокупности анализируемых систем ИБ и взаимодействующей подсистемы РЭБ.

В каждые свободные ячейки для каждой подсистемы вносятся исходные вероятностные экспертные данные, которые характеризуют эффективность отдельных оцениваемых процессов, реализуемых по исследуемым этапам.

Частные оценки проставляются в итоговых ячейках соответствующих строк и столбцов таблицы рассчитываются как среднеарифметические значения оценок эффективности каждого этапа (по строкам) и каждого процесса всех отдельных подсистем, в целом, за все этапы.

Применительно к излагаемой проблеме и вышеизложенной идеи ее решения была разработана компьютерная технология (модель) оценки эффективности интегральной системы ИБ КИИ во взаимодействии с мерами по радиоэлектронной защите (РЭБ). Данная модель ориентирована, прежде всего, для телекоммуникационных сетей, имеющие в своей структуре радиоканалы [2, с.51].

В предложенном подходе целевая функция моделирования исследуемой защиты КИИ представляет собой эффективность проводимых мер по ИБ и РЭБ информационно-радиоэлектронных объектов как по частным показателям (применительно к отдельным подсистемам, процессам, этапам ИБ и РЭБ), а также по обобщенному показателю эффективности в целом.

Общий вид целевой функции представляет собой среднеарифметическое значение входных экспертных оценок (7).

$$\bar{W}_{\Sigma} = \frac{\sum_{j=1}^m a_j \cdot b_j}{m} \quad (7)$$

$$0 \leq \bar{W}_{\Sigma} \leq 1$$

где a_j – коэффициенты важности (значимости) оцениваемых параметров ($0 \leq a_j \leq 1$);

b_j – количественные (вероятностные) значения оцениваемых параметров ($0 \leq b_j \leq 1$);

m – количество оцениваемых параметров.

Таблица 1 – Структура и исходные данные компьютерной модели интегрального обеспечения ИБ и РЭБ КИИ

Подсистемы ИБ и РЭБ		ФЗ ИО			ТЗИ			ПАЗИ			РЭБ (РЭЗ)			Управл. ИБ +РЭБ			Частные оценки	
Процессы		Локум.	Орган. стр.	Качес. мер.	Прив. спел.	Докум.	Орган. стр.	Качес. мер.	Прив. спел.	Локум.	Орган. стр.	Качес. мер.	Прив. спел.	Локум.	Орган. стр.	Качес. мер.		Прив. спел.
Этапы	Объекты защиты	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 20px; width: fit-content; margin: auto;"> Проставляются экспертные оценки от 0 до 1 </div>																
	Источники угроз																	
	Оценка угроз																	
	Определ. требований																	
	Целесооб. меры																	
	Организа-ция защиты																	
	Контроль (управлен.) защиты																	
Частные оценки																		

С учетом выше изложенного обобщенная комплексная оценка эффективности проводимых мер по ИБ и РЭБ исследуемых КИИ в предлагаемой модели представляется в табличной форме. Пример представления итоговых результатов моделирования анализируемой эффективности для каждой подсистемы и в целом для всей системы показан в таблице 2.

Таблица 2 – Интегральные общее и частные оценки эффективности исследуемых подсистем ИБ и РЭБ (пример)

Наименование обобщенного количествен. показателя	Оцениваемые подсистемы ИБ и РЭБ					Количеств. значения обобщен. показателя
	ФЗ	ТЗИ	ПАЗИ	РЭБ (РЭЗ)	Интегр. СУ	
Вероятность защиты КИИ	0,71	0,79	0,72	0,67	0,72	0,71

Анализируя приведенный пример интегральной оценки эффективности ИБ и РЭБ КИИ можно утверждать, что наиболее слабой (уязвимой) подсистемой следует рассматривать подсистему радиоэлектронной защиты, так как ее значение оценки показателя эффективности наименьшее.

В рассмотренной модели оценки эффективности ИБ и РЭБ имеется воз-

возможность представления результатов расчетов также и в графическом виде.

Таким образом, рассмотренный методологический подход оценки эффективности обеспечения ИБ КИИ во взаимодействии с мероприятиями по РЭБ (РЭЗ) в информационно-радиоэлектронном конфликте можно рассматривать как приемлемым для его дальнейшего практического использования.

Данный изложенный подход, в настоящее время, используется в учебном процессе и в научных исследованиях Технологического университета (г. Королев) на кафедре информационной безопасности.

В заключении можно утверждать, что изложенные результаты приведенных исследований заслуживают особого внимания, так как обладает рядом положительных сторон. К таким чертам предложенного подхода можно отнести: универсальность, наглядность, простота представления результатов исследования, возможность маневра располагаемыми силами и средствами ИБ и РЭБ, и, в целом позволяет анализировать эффективность исследуемой комплексной (интегральной) системы ИБ и РЭБ для разных ситуаций реальной и прогнозируемой информационно-радиоэлектронной обстановки.

В качестве предложений по направлению дальнейших исследований по данной тематике следует отметить целесообразность их проведения в более широкой сфере деятельности, т.е. в области ведения информационного противоборства различного масштаба. В данной перспективной и значимой сфере, изложенные в данной статье подходы по интегральной оценке эффективности ИБ и РЭБ должны занять достаточно важное место.

Авторы выражают признательность коллегам кафедры информационной безопасности Технологического университета за помощь в разработке и апробации данного подхода в учебной и научно-исследовательской работе.

Литература

1. Ворона В.А. и др. Концептуальные основы создания и применения системы защиты объектов // М.: Горячая линия-Телеком. 2012. 196 с.
2. Гольдштейн Б.С. Инфокоммуникационные сети и системы // СПб.: БХВ-Петербург. 2019. 208 с.
3. Домарев В.В. Безопасность информационных технологий. Методология создания систем защиты // К.: ТИД ДИА Софт. 2002. 490 с.
4. Конфликтно-устойчивые радиоэлектронные системы. Методы анализа и синтеза / Под ред. С.В. Ягольникова // М.: Радиотехника. 2015 г. 312 с.
5. Козьминых С.И. Обеспечение комплексной защиты объектов информатизации // М.: ЮНИТИ-ДАНА. 2020. 543 с.
6. Кузьмин В.А. Общая характеристика и методы анализа экспериментальных исследований радиоэлектронных систем // М.: ИНФРА-М. 2019. 80 с.
7. Куприянов А.И. и др. Радиоэлектронные системы космических комплексов // М.: Вузовская книга. 2017. 268 с.
8. Курилов А.П. и др. Обеспечение информационной безопасности и бизнеса // М.: БДЦ-пресс. 2005. 512 с.
9. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба // М.: Вузовская книга. 2016. 260 с.
10. Переездчиков И.В. Анализ опасностей промышленных систем человек-машина-среда и основы защиты // М.: КНОРУС. 2011. 784 с.

УДК 69.002.5

Особенности строительных 3D принтеров и пути их совершенствования

Л.Е. Суркова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве»,
Д.В. Давыдов, студент магистратуры кафедры «Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве»,
Национальный Исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва

В работе рассмотрены возможности использования 3D принтеров в строительной отрасли, выделены преимущества и недостатки используемых технологий. Предметом исследования выступают конструкционные особенности 3D принтеров и возможности их усовершенствования. Для этого использованы методы системного анализа и декомпозиции. В результате работы рассмотрены 3D принтеры, выбрана технология печати как основа для совершенствования. Проведена декомпозиция технических характеристик 3D принтера, оказывающих непосредственное влияние на результат его работы – скорость печати. Определены управляющие воздействия. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях для получения количественных зависимостей.

3D принтер, печать зданий, строительство.

Features of building 3D printers and ways to improve them

L.E. Surkova, Candidate of Technical Sciences, associate Professor, associate Professor of Information systems, technologies and automation in construction Chair,
D.V. Davydov, master's student of Information systems, technologies and automation in construction Chair,
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

The article discusses the possibilities of using 3D printers in the construction industry, highlights the advantages and disadvantages of the technologies used. The subject of research is the design features of 3D printers and the possibilities for their improvement. To do this, we used the methods of system analysis and decomposition. As a result, 3D printers are considered, and printing technology is chosen as the basis for improvement. The decomposition of technical characteristics of a 3D printer that directly affect the result of its operation – the speed of printing. Control actions are defined. The results obtained can be used in further research to obtain quantitative dependencies.

3D printer, building printing, construction.

Введение

Возможность автоматизации и роботизации строительства с развитием технологий приобретает особую актуальность. Стремление строительных организаций увеличить свою производительность при этом уменьшив затраты производства толкает инженеров и проектировщиков строительного оборудования на создание новейших технологий, ранее никогда не использованных в строительстве.

Одной из таких технологий до недавнего времени была аддитивная трехмерная печать зданий. Основываясь на уже существующих «настольных» 3D принтерах, первые строительные принтеры имели схожую конструкцию и принцип работы, но при этом в десятки раз превышали их в масштабе. Строительным материалом, вместо пластиков и разных полимерных смол, выступили бетонные смеси, а также смеси из строительных отходов [1].

Технология 3D печати зданий имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционным строительством [2]:

1. Возможность возводить здания практически любых форм, что важно, в первую очередь, для архитекторов и дизайнеров, создающих концептуальные и футуристичные здания;
2. Возрастает скорость строительства. В 2014 году в Шанхае было напечатано 10 домов суммарной площадью 2000 м² за 1 сутки [3];
3. Безопасность человеческого труда. Строительная площадка в классическом понимании представляет собой зону повышенной опасности. Нередки случаи получения травм и гибели рабочих на стройплощадках. Использование 3D принтера сводит участие человека в процессе возведения здания к минимуму;
4. Экологичность. Использование строительного принтера – это безотходное производство. В некоторых случаях, для печати используется смесь из переработанных отходов классического строительства, что переносит технологию 3D печати зданий из экологически-нейтральной в экологически-полезную категорию;
5. Экономичность. Себестоимость напечатанных зданий ниже, чем у аналогичных зданий, построенных человеком.

При всех своих плюсах, данная технология имеет, однако, и ряд недостатков:

1. Ограничение размера возводимого здания. Максимальные габариты сооружения, которое способен напечатать принтер, ограничиваются его рабочей областью.
2. Напечатанное здание не является законченным изделием, оно нуждается в последующей доработке: внутренней и внешней отделке, прокладки сантехники, монтаже окон и т.п.
3. Бетонная смесь, применяемая для печати, является плохим изоляционным материалом, поэтому пропускает холод в здание.

Несмотря на новизну изобретения, строительные принтеры сразу заинтересовали заказчиков строительной техники и продемонстрировали возможный потенциал их использования в будущем.

Все 3D принтеры, применяемые в строительной отрасли, имеют свои

конструкционные особенности, технические характеристики и используемые материалы.

Объектом исследования данной работы являются строительные 3D принтеры. Предметом исследования выступают конструкционные особенности 3D принтера и возможности их усовершенствования, что является актуальным для строительной отрасли.

Методы и материалы

В работе использованы методы системного анализа основного объекта исследования на основе научных публикаций и декомпозиции исследуемой системы с целью определения управляющих воздействий, определения качественных критериев и основных конструкционных характеристик.

Результаты исследования

В результате работы рассмотрен ряд 3D принтеров, разработанных в разных странах, выбрана технология печати как основа для совершенствования.

Одним из первых 3D принтеров на рынок представила компания Shanghai WinSun Decoration Design Engineering Co (Китай) [4]. Строительный 3D принтер WinSun представляет собой объект 150 метров длиной, 10 метров шириной и более 6 метров высотой, способный напечатать здание высотой до 6 метров. Основным строительным материалом для него выступает смесь из строительных отходов, включающих стекло, сталь и цемент. Первые десять домов компания напечатала в 2014 году. Постепенно технология была усовершенствована и востребована. Компания получила несколько сотен заказов, в том числе от правительства Египта [5] и ОАЭ. Примером строительства с использованием этого устройства является построенное в 2016 году офисное здание в Дубае [6].

Нидерланды представляют принтеры ProTo R 3Dp и RC 3Dp, CyBe Additive Industries. По мнению разработчиков, объединение проектирования, разработки и производства в единую систему позволит снизить время строительства до 80%.

Франция, США, Словения также имеют разработки в области 3D строительных принтеров.

В декабре 2016 года в Ступино Московской области был осуществлен совместный проект американского стартапа Apis Cor и шести российских компаний. С помощью разработанного компанией Apis Cor 3D принтера был напечатан жилой дом [6].

Данный 3D принтер обладает рядом преимуществ [6], такими, как:

- автоматическая система смешивания и подачи смеси;
- быстрая настройка принтера перед работой;
- безотходное производство;
- различный выбор толщины стен и их конфигурации;
- более высокие теплоизолирующие свойства возводимых стен;
- малое влияние погодных условий на процесс строительства;
- меньшая стоимость возводимой конструкции по сравнению с традиционными технологиями;
- возможность использования дополнительных утеплителей для стен.

Технические характеристики принтера Apis Cor взяты за основу для дальнейшего усовершенствования устройства. В качестве материала для печати в

этом принтере выступает фибробетон, или геополимер. Производительность такого принтера составляет 100 кв. м полезной площади в сутки при рабочей скорости 1-10 м/мин, точность позиционирования $\pm 0,5$ мм. Зона печати 132 м².

В роли одного из критериев качества работы 3D принтера для возведения строительных объектов выступает скорость печати. Декомпозиция качественных критериев, влияющих на скорость печати, представлена на рисунке 1.

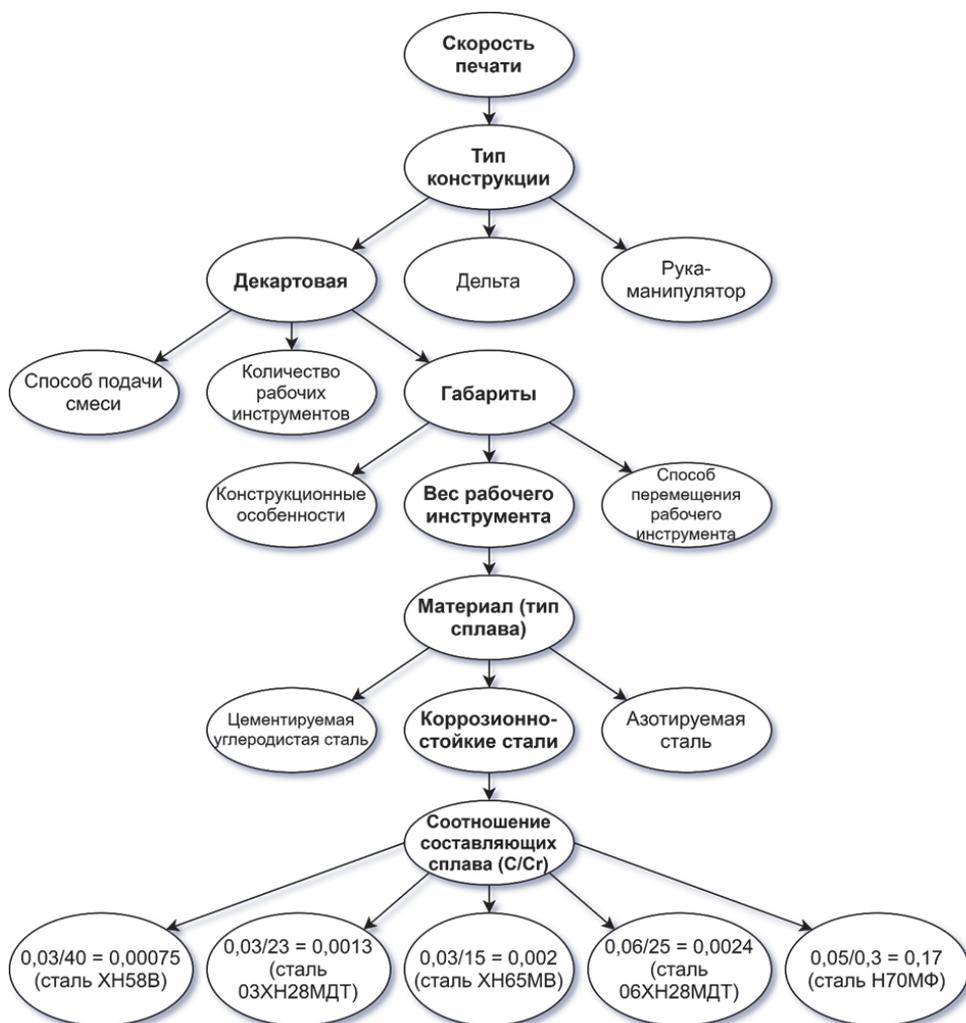


Рисунок 1 – Дерево декомпозиции конструкционных особенностей, влияющих на скорость печати принтера

Множество технических характеристик (рис. 1), описывающих конструкцию 3D принтера, оказывают непосредственное влияние на результат его работы – скорость печати.

Для реализации предмета работы был определен критерий оценки влияния усовершенствования характеристик принтера – скорость его печати. Конструкция принтера непосредственно влияет на скорость его работы. Так, например,

дельта-конструкция обеспечивает высочайшую скорость перемещения инструмента по рабочей области, однако в ущерб точности его позиционирования. Конструкция руки-манипулятора популярна в сфере строительных принтеров и, в сравнении с дельта-конструкцией, точна в наведении и позиционировании, однако, сильно проигрывает в скорости. Поэтому, для дальнейшей проработки был выбран вариант декартовой конструкции строительного робота, как золотой середины между описанными выше двумя часто используемыми конструкциями.

На следующем этапе сформулированы параметры, характерные декартовым конструкциям. В первую очередь это способ подачи строительной смеси рабочему инструменту. Несмотря на влияние на скорость печати, эта характеристика не была взята в расчет, так как не было найдено целесообразных путей ее совершенствования. Также на скорость влияет количество самих рабочих инструментов. Эту характеристику нельзя рассматривать, как способную улучшить любой существующий принтер с декартовой конструкцией. Очевидно, что больше инструментов – выше скорость. Но для расширения количества инструментов придется полностью пересчитывать и менять конструкции уже созданных принтеров, что также не является целесообразным. Тогда доступным вариантом остается внести изменения в сам рабочий инструмент принтера.

Далее была определена ключевая конструкционная особенность рабочего инструмента принтера, а точнее – экструзионной головки. Чтобы решение было актуальным для большей части произведенных в мире принтеров с прямоугольной декартовой конструкцией необходимо установить универсальный параметр, соответствующий им всем. В силу разнообразия имеющихся решений и отличности их строения, типов используемых передач, способов перемещения головки по рабочей области, подходящей характеристикой определена масса рабочего инструмента. Зачастую производитель выбирает наиболее доступный материал для производства экструзионных головок, легковесность которых можно улучшить путем выбора нового материала для перепроизводства отдельных частей головок либо их замены полностью.

Экструзионные головки строительных 3D принтеров, за редкими исключениями, выполняют их сплавов стали. Так как головка должна быть в постоянном контакте со строительной смесью, это должны быть сплавы, устойчивые к распаду от внешнего воздействия влаги и других частиц, содержащихся в смеси.

Цементируемая углеродистая сталь, была рассмотрена в первую очередь как одна из самых распространенных конструкционных сталей. Эти сплавы обладают высокой устойчивостью против механического изнашивания и истирания, но даже самая легированная хромом цементируемая сталь не подойдет для непрерывного контакта с бетонной смесью на весь эксплуатационный срок печатающего устройства. Азотируемые стали более устойчивы к коррозионным процессам в силу 2-10% содержания хрома, но этого также недостаточно для достижения желаемого уровня.

Выбор пал на ряд легковесных коррозионно-устойчивых сплавов стали. Они достаточно легки, чтобы ускорить перемещение рабочего инструмента принтера, но также максимально устойчивы к разрушению от контакта с материалами экструзии. [7]. Они легированы 10-50% хромом, что обеспечивает высокое сопротивление ржавчине и распаду под действием бетонных смесей. Стали,

наиболее подходящие для изготовления легковесных головок, и значимые характеристики приведены в таблице 1. Сталь Н70МФ не имеет высокого содержания хрома, достижение высокой устойчивости коррозии происходит за счет высокого содержания никеля и молибдена (64.21 – 73.6 Ni, 25 – 29 Mo).

Таблица 1 – Марки стали и их характеристики

Марка стали	Содержание углерода, С, %	Содержание хрома, Cr, %	Плотность, $\cdot 10^3$ кг/м ³
ХН58В	до 0.03	39-41	8,1
03ХН28МДТ	до 0.03	22-25	7,96
ХН65МВ	до 0.03	14,5-16,5	8,9
06ХН28МДТ	до 0.06	22-25	7,96
Н70МФ	до 0.05	До 0.3	6,3

Выбранный набор сплавов легок, подвергается свариванию, способен работать при высоких и низких температурах и в довольно агрессивных средах. Эти качества сделали их приоритетными в выборе конечного материала для производства собственных экструзионных головок и обеспечения повышенной скорости печати.

Управляющим фактором при изменении скорости печати определено соотношение основных составляющих выбранного ряда сплавов стали: углерода к хрому.

Декомпозиция проведена до элементарных свойств. Так изменяя материал направляющих осей и передач, можно напрямую влиять на скорость и качество работы строительного 3D принтера. В качестве управляющего фактора предлагаем выбрать соотношение основных составляющих сплава коррозионно-стойких сталей (C/Cr) [8] экструзионной головки принтера, что будет оказывать влияние на такой количественный критерий качества как скорость печати принтера.

Несмотря на то, что были рассмотрены особенности декартовой конструкции строительных принтеров, выбор данного материала также применим для других типов строения принтеров, например, для сферических, цилиндрических, шарнирных, а также дельта и роботов манипуляторов, так как все перечисленные конструкции имеют рабочий инструмент, закрепленный на конечном выходном звене. От конструкции к конструкции вид и способ закрепления головки может варьироваться, но сама технология экструзии бетонных смесей остается неизменной, именно поэтому выбор нового улучшенного материала для рабочего инструмента актуален для всех конструкций.

Выводы

Таким образом, в работе представлен краткий обзор имеющихся на рынке 3D принтеров, в том числе совместная российская разработка. Перспективным направлением в строительной отрасли отмечено совершенствование конструкции строительного 3D принтера на основе уже имеющегося. Проведена декомпозиция конструктивных особенностей принтера, что позволило установить элементарный управляющий фактор (соотношение основных составляющих сплава коррозионно-стойких сталей экструзионной головки (C/Cr)), влияющий на кон-

тролируемый критерий качества – скорость печати (V_p). Получение точных количественных характеристик зависимости скорости печати от составляющих сплава является дальнейшим направлением исследования.

Литература

1. Материалы для строительных 3D-принтеров и варианты конструктивного решения зданий. Крушельницкая Е.А., Огнев Н.В., Чжан Ц., Ди Се, Сулейманова Л.А. В сборнике: Международный студенческий строительный форум – 2018 (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова) Сборник докладов. В 2-х томах. 2018. С. 255-259.
2. Использование 3D-принтера в строительной отрасли. Панеш З.А., Руденко О.Н. В сборнике: Экономика и управление: современные тенденции Сборник статей // Чебоксары. 2019. С. 195-198.
3. Buchanan C. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges / L. Gardner // Engineering Structures. 2019. № 180. P. 332-348.
4. Грахов В.П., Мохначев С.А., Бороздов О.В. Влияние развития 3D-технологий на экономику строительства // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-12. С. 2673-2676.
5. Gosselin C. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders / R. Duballet, Ph. Rouxab, N. Gaudillière, J. Dirrenberger // Materials & Design. 2016. № 100. P. 102-109.
6. RoboTrends [Электронный ресурс]. URL: <http://robotrends.ru/pub/1718/top-6-stroitelnyh-printerov-dlya-3d-pechati-domov> (дата обращения 12.04.2020).
7. Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С. и др. Марочник сталей и сплавов // М.: 2014. С. 831-919.
8. Wang R., Hashimoto K., Fujishima A. et al. Light-induced metal surfaces // Nature. 1997. Vol. 388. P. 431.

УДК 621.31

Совершенствование управления территориально-распределенной системой ИБ с использованием технологии промышленного интернета-вещей

А.И. Сухотерин, кандидат военных наук, доцент, доцент кафедры «Информационной безопасности»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

В статье рассматриваются проблемы управления ИБ на территориально-распределённых объектах защиты. Во избежание простоев и для сохранения безопасности на предприятии необходимо внедрение технологий, позволяющих обнаруживать и прогнозировать риски. Предлагается с помощью промышленного интернета-вещей обеспечить непрерывный интеллектуальный мониторинг ключевых показателей, что дает возможность определить проблему и принять необходимые меры для ее решения. Оперативный в режиме реального времени анализ поможет специалисту ИБ быстрее находить уязвимые места и предотвратить несанкционированные действия на предприятии.

Информационная безопасность, промышленный интернет-вещей, территориально-распределенная система.

Improving the management of geographically distributed IB system using industrial technology Internet of things

A.I. Sukhoterin, Candidate of Military Sciences, associate professor of Information security Department,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

This article discusses the problems of its management on geographically distributed security objects. In order to avoid downtime and to maintain security at the enterprise, it is necessary to introduce technologies that allow detecting and predicting risks. It is proposed to use the industrial Internet of things to provide continuous intellectual monitoring of key indicators, which makes it possible to identify the problem and take the necessary measures to solve it. Real-time real-time analysis will help the IB specialist find vulnerabilities faster and prevent unauthorized actions in the enterprise.

Information security, industrial Internet of things, geographically distributed system.

Традиционное управление большим предприятием, как правило, крайне пассивно. Тем не менее, цифровая эпоха сделала более гибкими даже самые консервативные рынки – теперь операционные менеджеры получают данные прак-

тически в реальном времени.

Постоянная отчётность и помощь в принятии решений становятся особенно важными в чрезвычайных ситуациях, когда каждая секунда на счету, а системе требуется выполнить множество корректирующих действий.

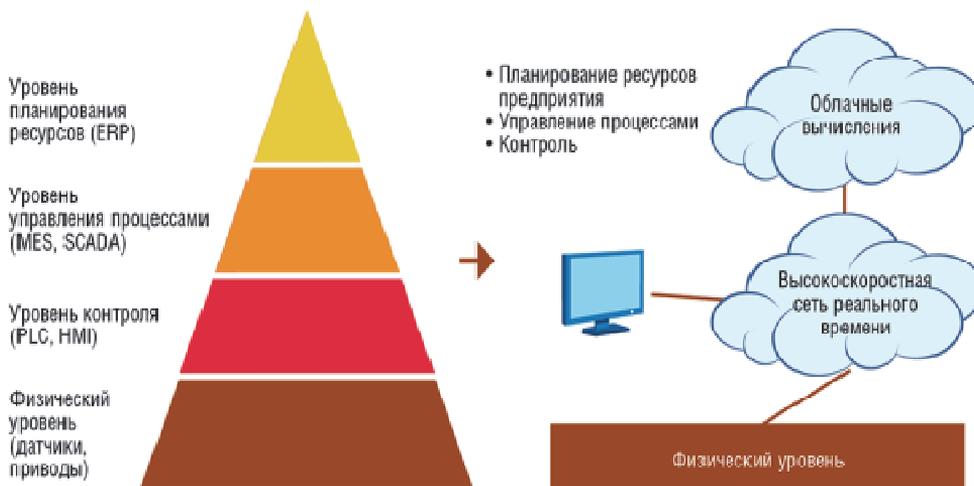


Рисунок 1 – Переход от обычных АСУ ТП к промышленному интернет-вещей

Как правило, аудит носит рекомендации проводить не реже чем раз в полгода. В результате мы получаем перечень инцидентов информационной безопасности и шаблон действий сотрудников, направленных на защиту обрабатываемого информационного ресурса в заданных параметрах.

Применение процессного подхода позволит контролировать качество и результат выполняемых видов работ в режиме реального времени, выявляя при этом недостатки, поэтому для более точного выявления недостатков работы системы аудит не должен быть единственным фактором.

Решением в современном мире будет ситуационный контроль распределенных объектов с помощью IoT-технологий, безопасность которых обеспечивает технология распределённых реестров.

Сети Промышленного интернета вещей не могут быть ограничены, периметром информационного объекта. Существенное влияние имеет взаимодействие с произведенным изделием («вещью») на всех этапах его существования, кроме того важное значение имеет доступ ко всем сервисам ЦОД (территориально-распределенных центров обработки данных). Ключевой характеристикой IIoT – технологий.

Обычно, в подобных сценариях играет роль целостный подход к вышестоящим системам мониторинга. Платформа выступает в качестве промежуточного программного обеспечения, агрегируя инциденты со множества разнородных систем мониторинга, управления и контроля нижнего уровня. События, происходящие на физическом уровне, по-прежнему будут связаны, например, пожарная сигнализация или турникет.

Сущность IoT -технологии заключается в следующем:

- устанавливаются механизмы, выполняющие различные процедуры, контроллеры – датчики и человеко-машинные интерфейсы на самые ответственные компоненты оборудования;
- затем осуществляется сбор, хранение, обработка, выдача информации, которая позволит осуществить реальную оценку предприятия;
- полученные данные становятся достоянием всех заинтересованных структурных подразделений и помогают формировать предложения руководителю, для принятия решения.

Тревоги уведомляют специалистов в области ИБ о возникновении важного события или превышении каких-либо полномочий сотрудников или злоумышленников, в какой бы части распределённой PoT-конструкции это не случилось. Без тревог специалист чтобы убедиться в отсутствии проблем должен лично на постоянно основе проводить осмотр помещений, оборудования и других объектов защиты. Тревоги как вспомогательный инструмент заставляют обратить внимание на те или иные моменты работы предприятия.

Система управления инцидентами представляет собой набор «блокчейпок» – программных модулей, использующихся для сбора, хранения, анализа и визуализации данных из различных источников, а также дальнейшей передачи этих данных в другие элементы корпоративной инфраструктуры.

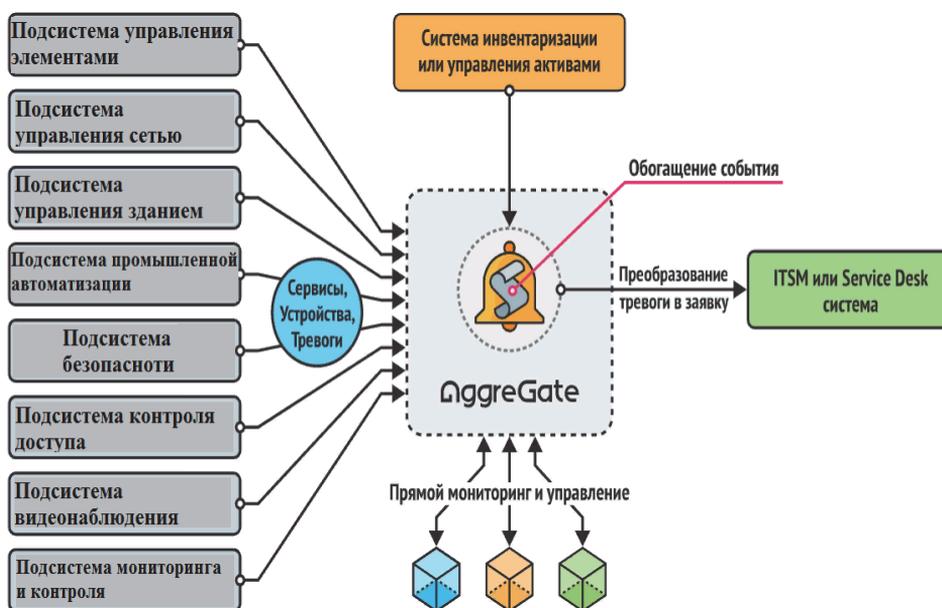


Рисунок 2 – Взаимодействие подсистем управления ИБ

Крупные корпоративные системы, как правило, используются большим количеством сотрудников, включая системных администраторов, инженеров и операторов, бизнес-аналитиков, занимающихся анализом данных, руководителей, просматривающих сводные отчёты, и многих других.

Для таких сложных многопользовательских сред предлагается гибкая архитектура безопасности, которая включает в себя:

1. журналирование событий;
2. безопасность баз данных;
3. ролевой способ управления доступом;
4. состояние защищенности коммуникаций.

Поддержка распределенной архитектуры (распределённого реестра) является одной из немногих в мире платформ промышленного интернета-вещей, которые действительно поддерживают распределенную архитектуру. Такая архитектура может обеспечить весь комплекс задач, которые возлагаются на систему управления информационной безопасностью в ближайшей перспективе.

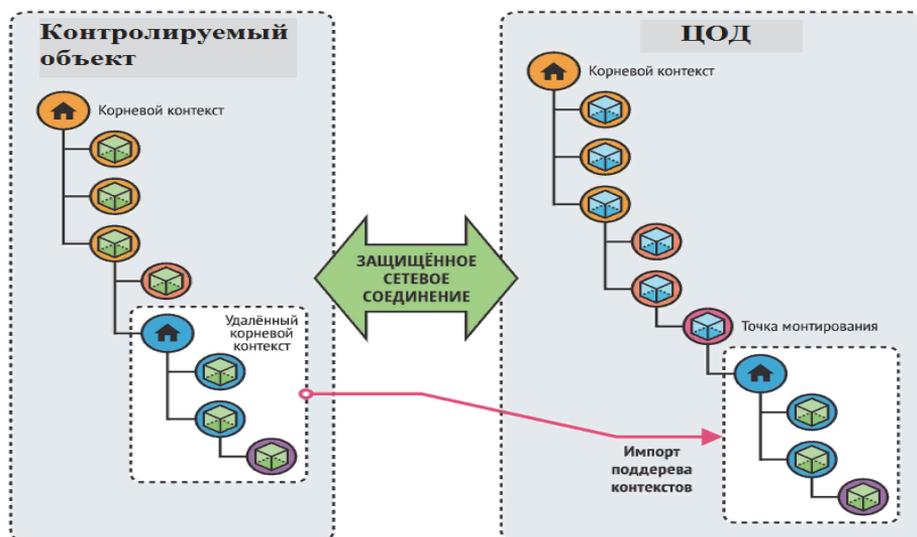


Рисунок 3 – Защищенное сетевое соединение между TRS

Распределенная архитектура полностью независима от третьих лиц, благодаря этому обеспечивается надежность системы. Причем в таких серверах, сформирован собственный массив данных операторов с соответствующей матрицей доступа и допуска к информационному ресурсу.

Основными целями распределенной архитектуры являются:

1. Адаптация к предъявленным требованиям, подразумевает под собой, что серверы нижнего уровня могут быть сильно нагружены, собирая данные и управляя большим количеством устройств в режиме, близком к реальному времени. Как показывает практика количество устройств, которые могут обслуживаться с помощью одного сервера, ограничено. При адаптации системы для управления разумно установить несколько серверов и объединить их в рамках распределенной установки большим числом устройств.
2. Равномерность нагрузки – сервер обеспечивает управления распределенной сетью (доступ, производительность, обработка различного рода запросов от датчиков, формирование различного рода отчетов и доставка их адресату).

3. Средства противодействия атакам. Эти серверы могут находиться на значительном удалении и обязательно должны иметь связь с центральным сервером. Что позволяет не подключать VPN, так как все заинтересованные потребители подключены к центральному серверу

4. Централизация, то есть основной сервер, установлен в центральной диспетчерской. Вторичные серверы могут работать в полностью автоматическом режиме, в то время как их настройка и мониторинг осуществляется через основной сервер.

Благодаря распределённой инфраструктуре множество серверов выполняют различные функции независимо от их уровня. Часть из них может работать на IoT-шлюзах, собирая данные, другие – хранить и обрабатывать информацию, а оставшаяся часть – осуществляет высокоуровневое объединение и распределённые вычисления.

Устройства, которые непосредственно связаны с объектом управления, такое как сенсоры и исполнительное устройство, может быть подключено к серверам напрямую, через агентов, через шлюзы или с помощью их комбинации.

Характерная для крупных компаний многопользовательская среда позволяет создавать огромное количество учётных записей пользователей, объединяя их в блок-цепочку, где каждый блок в прямой зависимости от предыдущего. Каждая попытка доступа к единой модели данных сервером обрабатывается под своим уникальным хэшем согласно правам доступа авторизованного пользователя в определённой цепочке. Активные системные объекты (например, тревоги, сигнатурная подсветка, модели и др.) наследуют права доступа их владельцев, как только обращаются к единой модели данных.

Права доступа пользователей настраиваются с помощью соответствующей таблицы прав, регулирующих уровень доступа пользователя до любого системного ресурса. Это позволяет администратору безопасности реализовывать комплексный подход при формировании доступа должностных лиц организации к обрабатываемому информационному ресурсу (это важно с точки зрения подготовки одновременно документа большим количеством исполнителей, в рамках предложений руководству для принятия решения).

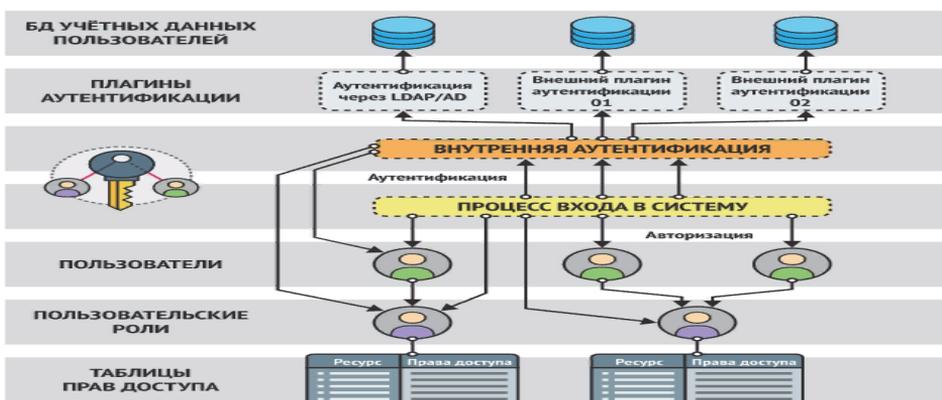


Рисунок 5 – Схема прохождения внутренней аутентификации пользователей

В таблице прав пользователя может задавать уровень доступа каждая запись к одному или нескольким ресурсам, а также к целым поддеревьям, включающим в себя все дочерние ресурсы. Все элементы могут быть объединены и настроены в визуальном виде специальными редакторами, при этом не требуя опыта специалиста ИТ [15].

Комбинируя распределенный реестр с промышленным интернетом вещей, проще реализовать конфиденциальность и целостность, является важным фактором для обеспечения:

- надежных соединений;
- безопасной обработки между устройствами [15].

Это позволяет подключенным устройствам реагировать на производственные атаки и модификации, таким образом, повышает доверие между сторонами в общении. В частности, технология распределенного реестра очень хорошо зашифрован с помощью сложного математического шифрования, способного реагировать на атаки извне. Кроме того, вместо централизованного метода распределенного реестра использует децентрализованный метод, который затрудняет хакерам установление целей. Эта функция сводит к минимуму влияние отдельных атак на устройства IoT, а затем и на все устройство. Основанные на доверии услуги между устройствами IoT суммированы ниже:

- децентрализованная структура распределяет задачи, затрудняя для злоумышленников установление этих целей. В случае частной цепочки блоков, если развитие вычислений ограничено, проблемы безопасности могут быть решены путем защиты сети с помощью инструмента «Безопасный IP»;
- можно поддерживать прозрачность через доверительные сети, обмениваться данными о транзакциях участников и надежно их хранить.
- это гарантирует целостность деталей транзакции для ответа на фальшивые атаки и подделку – каждый участник подтверждает детали транзакции;
- процедура аутентификации и авторизации основных устройств IoT обязательна;
- в общедоступной цепочке блоков можно улучшить эффективность строительства и обслуживания в соответствии с ее распределением. Кроме того, децентрализация повышает эффективность за счет сокращения затрат на строительство и эффективного распределения ресурсов.

В результате сети, использующие распределенный реестр, могут обеспечить надежную среду не только для обмена данными, но и для администраторов, управляющих сетью, и для пользователей.

Мониторинг значимых событий в реальном времени является критической функцией для многих отраслей, таких как учет рабочего времени, мониторинг ИТ-инфраструктуры или контроль доступа. Отслеживание текущих событий является основной из задач операторов таких систем.

Возможности выбираются от простых оповещений о внештатных ситуациях до продвинутой обработки данных модулями интеллектуальной машины, позволяющими находить слабые места и предсказывать события, например, несанкционированные действия на предприятии.

Промышленный Интернет вещей позволяет объединять производствен-

ные, человеческие, транспортные и другие ресурсы предприятия в цифровые сети в целях автоматизации его бизнес-процессов. Основные цели внедрения технологий ПоТ – сокращение издержек и повышение произвольности. Кроме того, технологии Интернета вещей позволяют создавать новые кросс-индустриальные решения и услуги для конечных потребителей за счет объединения различных отраслей в единые коммуникационные сети.

Литература

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации утверждена Указом Президента Российской Федерации от 5 декабря 2016 года N 646.
2. ФЗ № 149 от 27.07.2006 г. (ред. от 18.03.2019г.) «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».
3. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 N 187-ФЗ.
4. Воронин А. Мошенничество в платежной сфере. Бизнес-энциклопедия // М.: Издательский дом «Альпина Паблишер». 2016. 352 с.
5. Андреев Ю.С., Третьяков С.Д., Промышленный интернет вещей // СПб: Университет ИТМО. 2019. 54 с.
6. Мачей Кранц: Интернет вещей. Новая технологическая революция, Переводчик: Мамедьяров З. // Издательство: Бомбора. 2018 г.
7. Тихвинский В.О., Коваль В.А., Бочечка Г.С. Интернет вещей: международная стандартизация // Электросвязь. 2017. № 2.
8. Пушкарев М.С. Интернет вещей (IoT): понятие и значение для формирования правовой основы цифровой трансформации экономики // Вопросы российского и международного права. 2018. Том 8. № 1А. С. 16-27.
9. Тихвинский В.О., Коваль В.А., Бочечка Г.С., Бабин А.И. Сети IoT/M2M: технологии, архитектура и приложения // М.: Издательский дом «Медиа Паблишер». 2017.
10. [Электронный ресурс]. URL: <https://geektimes.ru/company/wirex/blog/277438/> (дата обращения 20.04.2020).
11. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pwc.ru/> (дата обращения 20.04.2020).
12. [Электронный ресурс]. URL: <https://22century.ru/popular-science-publications/blockchain> (дата обращения 20.04.2020).
13. [Электронный ресурс]. URL: <https://habrahabr.ru/post/323128/> (дата обращения 20.04.2020).
14. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения 20.04.2020).
15. [Электронный ресурс]. URL: <https://aggregate.tibbo.com/ru/technology/architecture/distributed-architecture.html> (дата обращения 20.04.2020).

УДК 658.56:669.017:621.793

**Обоснование факторов технологического процесса изготовления
углерод-керамического композиционного материала
методом пропитки расплавами, определяющих качество
получаемого материала**

Т.Н. Антипова, доктор технических наук, доцент, профессор,
В.А. Волкова, аспирант,
Кафедра «Управления качеством и стандартизации»
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

В статье проанализирован процесс получения углерод-керамического композиционного материала методом пропитки расплавами. Определена номенклатура факторов технологического процесса, влияющих на технические и экономические показатели качества, изготавливаемого углерод-керамического композиционного материала методом пропитки расплавами. Методом экспертных оценок выявлены наиболее значимые факторы в технологическом процессе изготовления углерод-керамического композиционного материала, которые определяют качество продукции.

Углерод-керамический композиционный материал, факторы технологического процесса, оценки экспертов.

**Justification of the factors of the technological process of manufacturing
a carbon-ceramic composite material by method of reactive melt
infiltration, which determine the quality of the resulting material**

T.N. Antipova, Doctor Technical Science, docent, professor,
V.A. Volkova, graduate student,
The Department of Quality Control and Standardization
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article discusses the process of obtaining carbon-ceramic composite material by the method of impregnation with melts. The nomenclature of factors of the technological process that affect the technical and economic indicators of the quality of the carbon-ceramic composite material produced by the method of impregnation with melts is determined. By the method of expert evaluations, the most significant factors in the technological process of manufacturing a carbon-ceramic composite material that determine the quality of products are identified.

Carbon-ceramic composite material, technological process factors, the method of expert evaluations.

В связи с развитием авиационной и ракетно-космической техники особую актуальность приобретает разработка технологий производства деталей и конструкций из композиционных материалов, способных выдерживать значительные температурные нагрузки в окислительной среде без изменений геометрии. Разработка новых технологий и исследование существующих по производству подобного рода композиционных материалов необходима для создания многоразовых космических аппаратов, где ряд элементов подвергается воздействию значительных тепловых потоков, силового напора [2, 4].

Наиболее перспективными материалами для создания таких конструкций и изделий являются углерод-керамические композиционные материалы (УККМ), которые обладают высокими прочностными и жесткостными характеристиками, стойкостью к тепловому и окислительному потокам, малой плотностью относительно металлов. В УККМ керамическая матрица обладает высокой термостойкостью, а наполнитель, в виде углеродного каркаса обеспечивает необходимую прочность и жесткость [2, 6].

Современные технологии производства ракетно-космических конструкций и изделий из УККМ многостадийные, так как включают в себя множество подпроцессов и операций. Для изготовления УККМ рассматривают различные способы формирования матрицы и схем армирования, в зависимости от требований, предъявляемых к получаемому материалу.

С учетом анализа аналогичных систем качества процессов изготовления многие авторы показывают, что основные показатели качества углерод-керамических композиционных материалов – это конечная плотность материала, физико-механические характеристики, также отмечают, что материалы, которые должны использоваться в теплонагруженных узлах или деталях, должны обладать стойкостью к высокотемпературному потоку. Необходимо определить факторы, которые воздействуют на качество получаемого материала [1].

Анализируя технологии изготовления УККМ, а также системы управления качеством, можно сделать вывод, что данные системы и технологии, в большинстве случаев, учитывают номенклатуру многочисленных факторов, которые воздействуют на конечную получаемую продукцию, начиная с организации производства, технологического процесса, персонала организации и др., то есть внутренних факторов, и заканчивая качеством оборудования, окружающей среды, сырьевых материалов, то есть внешними факторами [3].

Применение основных теоретических положений управления качеством к производству УККМ требует учёта специфических требований. Одним из важнейших факторов, который способен оказывать влияние на качество УККМ, является технологический процесс изготовления композитных материалов, включая использование сырьевых материалов с требуемыми характеристиками. Следовательно, необходимо провести обоснование системы показателей качества и параметров технологии получения УККМ для улучшения их технико-экономических характеристик [3].

Для обоснования системы показателей качества рассмотрено графическое представление технологии изготовления УККМ (рисунок 1). Данная модель технологического процесса отличается от существующих технологий требованием

введения операций поэтапного контроля самих операций, так и контроля параметров объектов операций. Таким образом выполняется необходимое требование формирования информации обратной связи с объектом управления, то есть объектом после проведения каждой операции. Например, для углерод-керамического композита после операции отжиг параметрами контроля являются привес масс, плотность, пористость и частичные требования, которые предъявляют к конечному продукту. Кроме того, имеют существенные различия способы осуществления некоторых операций. Например, операции блока формирования керамической матрицы может выполняться путем засыпки, а в предлагаемой технологии, путем использования шликера, т.е. предварительного изготовления шликерной композиции и нанесения её на поверхность заготовки материала.

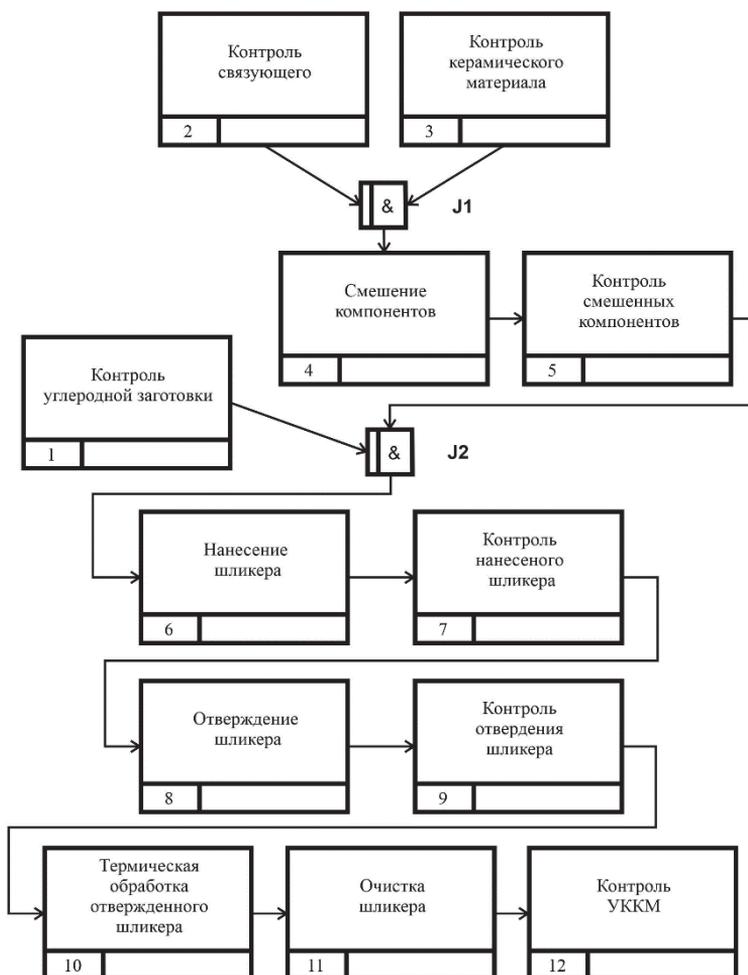


Рисунок 1 – Графическая модель технологического процесса изготовления углерод-керамического композиционного материала методом пропитки расплавами

Одним из методов и инструментов качества для определения влияющих факторов и выявления связей между показателями качества продукции и факто-

ров технологии является причинно-следственная диаграмма, или как её ещё называют диаграмма Исикавы, которая показывает все возможные причины, которые могут влиять на ту или иную проблему.

Диаграмма Исикавы представляет собой «скелет», на основных «костях» указываются основные направления влияния, например, оборудование, персонал, технология, сырьевые материалы, окружающая среда, методы. Каждую основную кость начинают описывать более подробно, например, что в оборудовании причиной возникновения проблемы может служить насос или нагревательный элемент. Таким образом описываются все основные направления.

По анализируемой графической модели технологии, используя метод «мозгового штурма», была рассмотрена только технологическая часть процесса изготовления УККМ методом пропитки расплавами, вследствие чего, была разработана модель причинно-следственной связи основных показателей качества получаемого материала и параметров технологического процесса изготовления, которая представлена на рисунке 2.

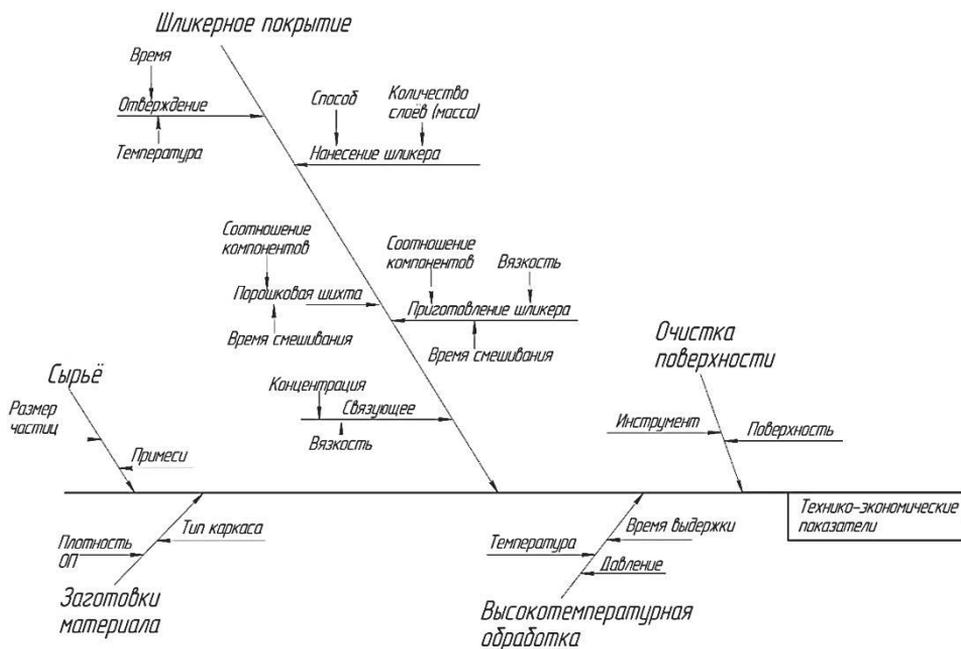


Рисунок 2 – Причинно-следственная диаграмма влияющих факторов технологии на показатели изготавливаемого УККМ

Технологический процесс изготовления углерод-керамических композиционных материалов методом пропитки расплавами, используя шликерное покрытие, состоит из двух последовательных технологических подпроцессов: получение шликерного покрытия на поверхности углеродной заготовки и получение керамической составляющей матрицы в углерод-керамическом композиционном материале. Первый технологический процесс включает приготовление шликерной композиции, послойное нанесение шликерной композиции на по-

верхности углеродной заготовки, отверждение шликерного покрытия, тем самым происходит формирование шликерного покрытия на поверхности углеродной заготовки необходимой толщины. Второй технологический процесс включает проведение отжига, т.е. высокотемпературного процесса в вакуумной печи, очистка поверхности после от разложенного шликерного покрытия, нанесение керамического покрытия на поверхность углерод-керамической заготовки. Система технологических параметров процесса получения углерод-керамических композиционных материалов состоит из следующих этапов, которые соответствуют главным технологическим операциям.

Проведение входного контроля сырьевых материалов:

1. Углеродная заготовка:

- плотность;
- открытая пористость;
- тип каркаса.

2. Порошки:

- фракционный состав;
- насыпная плотность;
- химический состав.

3. Связующее:

- концентрация;
- вязкость.

Контроль качества технологических операций:

1. Смешение порошков:

- скорость смешения;
- время смешения.

2. Приготовление шликера:

- время приготовления;
- скорость смешивания;
- соотношение компонентов.

При выполнении данной операции проводят контроль вязкости получаемого шликера, как объекта.

3. Нанесение шликерного покрытия:

- метод нанесения;
- толщина слоя;
- количество слоев;

4. Отверждение шликерного покрытия:

- температура отверждения;
- время отверждения.

По завершению нанесения и отверждения шликерного покрытия проводится контроль массы заготовки с покрытием.

5. Отжиг (высокотемпературная обработка):

- температура процесса;
- давление;
- время выдержки;

– скорость нагрева.

6. Очистка:

– качество поверхности.

После проведения высокотемпературной обработки и очистки поверхности проводится контроль массы и внешнего вида. Контролируются привес масс, плотность и остаточная открытая пористость.

Номенклатура факторов технологического процесса изготовления углерод-керамического композиционного материала методом пропитки расплавом тугоплавких металлов или их соединений представлена в таблице 1.

Таблица 1– Номенклатура влияющих факторов

Группы влияющих факторов	Влияющие факторы	№
Исходные данные	Показатели порошков	1
	Плотность заготовки	2
	Открытая пористость заготовки	3
	Тип каркаса	4
Шликерное покрытие	Показатели связующего	5
	Соотношение компонентов в шихте	6
	Время смешивания порошков	7
	Соотношение компонентов в шликере	8
	Время приготовления шликера	9
	Способ нанесения шликера	10
	Толщина/масса шликерного покрытия	11
	Параметры отверждения шликерного покрытия	12
Высокотемпературная обработка	Температура процесса	13
	Время выдержки	14
	Скорость нагрева	15
	Давление в процессе	16
Очистка	Качество поверхности	17

Конечным этапом является контроль показателей качества получаемого материала: плотность, остаточная пористость, физико-механические характери-

стики и стойкость к высокотемпературному потоку.

Показатели качества готового высокотемпературного композиционного материала состоят из двух составляющих: технические и экономические показатели качества (рисунок 3).

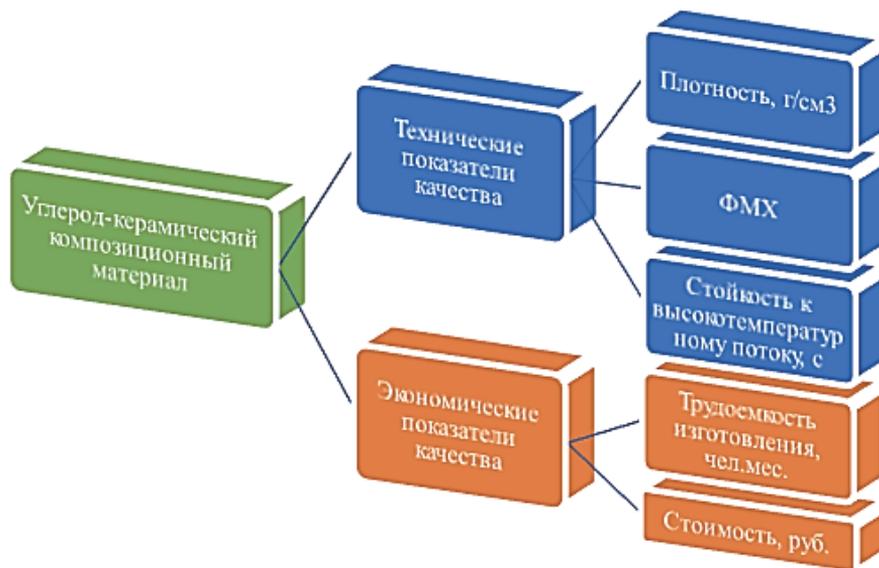


Рисунок 3 – Система показателей качества углерод-керамических композиционных материалов

После определения номенклатуры факторов, влияющих на качество углерод-керамического композиционного материала для управления технологией изготовления и повышения качества необходимо определить и проанализировать зависимость технических и экономических показателей качества конечной продукции от основных факторов и показателей объектов операций технологического процесса изготовления.

В качестве инструмента анализа и выбора наиболее значимых факторов технологического процесса на основные показатели качества получаемого УККМ методом пропитки расплавами применен метод экспертной оценки, в результате чего были определены весовые значения каждого фактора.

Метод ранжирования заключается в присвоении рангов в зависимости от значимости факторов. Наиболее значимому фактору эксперт присваивает ранг 1, наименее значимому – ранг 5, в случае равнозначных факторов, эксперт присваивает одинаковый ранг. По результатам анкетирования и присвоения рангов формируется сводная матрица рангов [5].

Результирующие ранги показателей ранжирования по данным опросов определяются как суммы рангов для каждого показателя. В результате самым значимым фактором является тот, который получил наименьшую сумму рангов, а самым наименее значимым – тот, который имеет наибольшую сумму рангов.

Таблица 2 – Сводная матрица рангов

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Эксперты								
1	Ф а к т о р ы	3	3	2	3	4	2	4	3	2
2		2	3	2	2	1	4	3	2	2
3		1	3	1	2	1	2	2	3	2
4		4	3	3	4	3	3	3	4	3
5		4	3	4	5	5	5	4	3	4
6		2	1	2	2	3	1	2	3	1
7		2	1	2	3	2	2	3	3	2
8		4	3	3	4	3	5	5	4	4
9		3	5	4	5	4	4	5	4	5
10		5	5	4	4	4	4	5	5	3
11		2	1	2	2	1	3	1	1	2
12		5	4	3	4	4	5	3	4	4
13		1	2	2	2	1	1	1	1	2
14		2	2	2	1	1	1	2	2	1
15		2	2	1	2	2	1	2	2	2
16		3	3	3	2	4	3	4	3	2
17		4	3	4	5	4	5	4	4	4

В связи с тем, что в матрице присутствуют одинаковые ранги в оценках всех экспертов, производится переформирование матрицы. Переформирование матрицы проводится без изменения мнения эксперта таким образом, что между присвоенными рангами должны оставаться первоначальные соотношения (больше, меньше или равно). По результатам переформирования матрицы рангов строится новая матрица рангов (таблица 3).

Уровень согласованности мнения определим, вычислив коэффициент конкордации из выражения [5]:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} \cdot m^2(n^3 - n) - m \cdot \sum T_i} \quad (1)$$

где $T_i = \frac{1}{12} \cdot \sum (t_l^3 - t_l)$ (2)

В итоге получаем

$$W = \frac{23383.5}{\frac{1}{12} \cdot 9^2(17^3 - 17) - 9 \cdot 287.5} = 0.77$$

После вычисления коэффициента проводят оценку значимости коэффициента конкордации по критерию Пирсона:

$$\chi^2 = \frac{S}{\frac{1}{12} \cdot mn(n+1) + \frac{1}{n-1} \cdot \sum T_i} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{23383.5}{\frac{1}{12} \cdot 9 \cdot 17(17+1) + \frac{1}{17-1} \cdot 287.5} = 110.54$$

Таблица 3 – Переформированная матрица рангов

№	Эксперты								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10	10,5	6	9,5	13,5	6	12,5	8,5	6,5
2	5,5	10,5	6	5	3	12	8,5	4	6,5
3	1,5	10,5	1,5	5	3	6	4,5	8,5	6,5
4	13,5	10,5	11,5	12,5	9	9	8,5	14	11,5
5	13,5	10,5	15,5	16	17	15,5	12,5	8,5	14,5
6	5,5	2	6	5	9	2,5	4,5	8,5	1,5
7	5,5	2	6	9,5	6,5	6	8,5	8,5	6,5
8	13,5	10,5	11,5	12,5	9	15,5	16	14	14,5
9	10	16,5	15,5	16	13,5	12	16	14	17
10	16,5	16,5	15,5	12,5	13,5	12	16	17	11,5
11	5,5	2	6	5	3	9	1,5	1,5	6,5
12	16,5	15	11,5	12,5	13,5	15,5	8,5	14	14,5
13	1,5	5	6	5	3	2,5	1,5	1,5	6,5
14	5,5	5	6	1	3	2,5	4,5	4	1,5
15	5,5	5	1,5	5	6,5	2,5	4,5	4	6,5
16	10	10,5	11,5	5	13,5	9	12,5	8,5	6,5
17	13,5	10,5	15,5	16	13,5	15,5	12,5	14	14,5

Коэффициент χ^2 , определенный выше, сравнили с табличным значением коэффициента, который соответствует 26,296. Данный коэффициент был установлен для числа степеней свободы $K = n-1 = 17-1 = 16$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Так как значение расчетного коэффициента χ^2 (110,54) больше значения табличного коэффициента (26,296), то коэффициент конкордации $W = 0,77$ является не случайной величиной, и поэтому результаты, которые мы получили в рамках опроса, имеют смысл и могут использоваться в проведении дальнейших исследований.

После определения согласованности мнения экспертов проводим вычисления показателей весомости рассмотренных факторов.

Сводную матрицу преобразуем в матрицу (таблица 4) преобразованных рангов по формуле:

$$s_{ij} = x_{\max} - x_{ij} \quad (4)$$

где $x_{\max} = 5$

Таблица 4 – Матрица преобразованных рангов

№ п/п	Эксперты									Σ	Вес λ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	2	2	3	2	1	3	1	2	3	19	0,058
2	3	2	3	3	4	1	2	3	3	24	0,074
3	4	2	4	3	4	3	3	2	3	28	0,086
4	1	2	2	1	2	2	2	1	2	15	0,046
5	1	2	1	0	0	0	1	2	1	8	0,025
6	3	4	3	3	2	4	3	2	4	28	0,086
7	3	4	3	2	3	3	2	2	3	25	0,077
8	1	2	2	1	2	0	0	1	1	10	0,031
9	2	0	1	0	1	1	0	1	0	6	0,018
10	0	0	1	1	1	1	0	0	2	6	0,018
11	3	4	3	3	4	2	4	4	3	30	0,092
12	0	1	2	1	1	0	2	1	1	9	0,028
13	4	3	3	3	4	4	4	4	3	32	0,098
14	3	3	3	4	4	4	3	3	4	31	0,095
15	3	3	4	3	3	4	3	3	3	29	0,089
16	2	2	2	3	1	2	1	2	3	18	0,055
17	1	2	1	0	1	0	1	1	1	8	0,025

Для наглядности значимости факторов технологического процесса получения УККМ методом пропитки расплавами построим диаграмму значений весовых коэффициентов (рисунок 4).

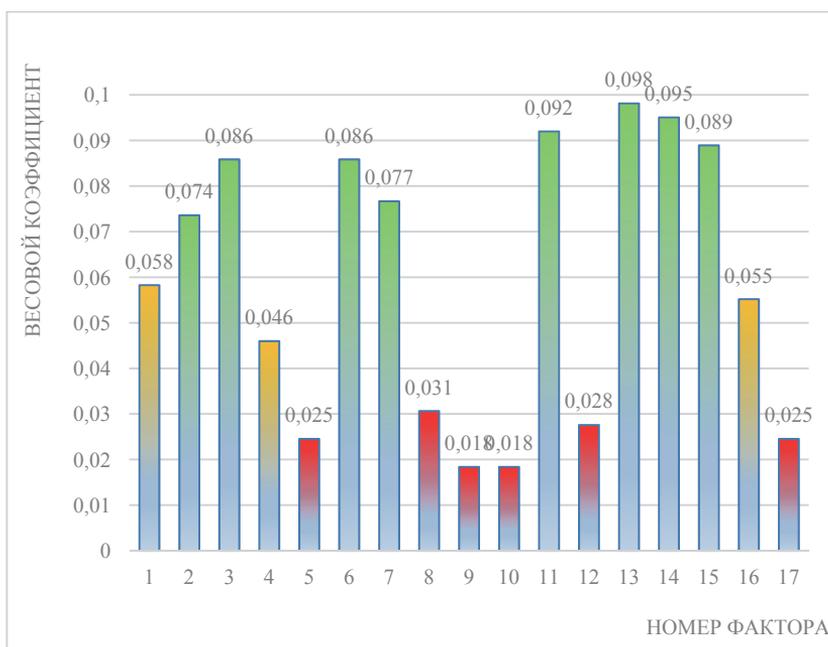


Рисунок 4 – Распределение весовых коэффициентов

Исходя из анализа факторов, на качество углерод-керамического композиционного материала, изготовленного методом пропитки расплавами тугоплавких металлов наибольшее влияние оказывают:

- Температура процесса;
- Время выдержки;
- Толщина/масса шликерного покрытия;
- Скорость нагрева;
- Открытая пористость заготовки;
- Соотношение компонентов в шихте;
- Время смешивания порошков;
- Плотность заготовки.

Выводы.

В результате проведения научных исследований выявлены факторы и параметры, влияющие на качество конечного материала. Определены значимые факторы в технологическом процессе изготовления материала, которые оказывают наибольшее влияние на один из основных показателей качества композиционного материала – содержание керамической матрицы в УККМ. Результаты определения номенклатуры наиболее значимых факторов, влияющих на качество получаемого УККМ методом пропитки расплавами позволит спланировать и провести эксперименты с целью получения зависимостей показателей качества от параметров технологического процесса. Что в дальнейшем позволит определить оптимальные значения управляемых параметров – параметров операций технологического процесса для обеспечения улучшения (повышения) качества изготавливаемого композиционного материала.

Литература

1. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1998. 516 с.
2. Костиков В.И., Варенков А.Н. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы: учебник для вузов // М.: Интермет Инжиниринг. 2003. 560 с.
3. Симоненко Е.П., Севастьянов Д.В., Симоненко Н.П. и др. Перспективные ультравысокотемпературные керамические материалы для авиакосмического применения // Russian Journal of Inorganic Chemistry (eng.). 2013. Т. 58. № 14. С. 1669-1693.
4. Антипова Т.Н., Лабутин А.А., Олешко А.Ю. Совершенствование управления качеством технологий получения композиционных материалов для ракетно-космической промышленности // Управление качеством технологических процессов. Монография. Королёв: Научный консультант. 2015. 134 с.
5. Исаев В.Г., Антипова Т.Н. Концептуальные положения управления качеством системы производства композиционных материалов для ракетно-космической техники // Информационно-технологический вестник. 2017. № 4 (14). С. 30-38.
6. Орлов А.И. Экспертные оценки: учебное пособие // М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. 31 с.

УДК 62-932.4

Разработка структурно-функциональной модели технологического процесса изготовления углерод-керамических композитов методом пропитки расплавами

В.А. Волкова, аспирант,

В.С. Волков, аспирант,

кафедра «Управления качеством и стандартизации»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область

В статье рассмотрены принципы использования процессов жидкофазной технологии для решения задач научно-технического прогресса и использования передовых технологий. В ходе ознакомления с методами моделирования был выбран метод IDEF3 как наиболее оптимальный для решения поставленных задач. Разработаны модели технологического процесса получения углерод-керамического композиционного материала методом пропитки расплавами, которые не были представлены ранее в литературных данных. Представлены рекомендации по практическому использованию полученных результатов работы.

Структурно-функциональная модель, углерод-керамический композиционный материал, пропитка расплавами.

Development of structural and functional models of the technological process of manufacturing carbon-ceramic composites by the method of melt infiltration

V.A. Volkova, graduate student,

V.S. Volkov, graduate student,

the Department of Quality Control and Standardization,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article discusses the principles of using liquid-phase technology processes to solve the problems of scientific and technological progress and the use of advanced technologies. During familiarization with the modeling methods, the IDEF3 method was chosen. The developed models of the technological process for producing a carbon-ceramic composite material by the method of impregnation with melts, which were not previously presented in the literature. Recommendations on the practical use of the results are presented.

Structurally functional model, carbon-ceramic composite material, reactive melt infiltration.

Введение.

На сегодняшний момент композиционные материалы (КМ) широко востребованы в авиационной и ракетно-космической технике. КМ обладают отличительными прочно-жесткостными характеристиками по сравнению с традиционными материалами [9,11]. Одним из направлений использования КМ является изготовление теплонагруженных деталей и узлов конструкций. Основным видом материалов, которые применяются в теплонагруженных конструкциях, являются углерод-керамические композиционные материалы (УККМ). УККМ – это материал, состоящий из углеродного армирующего наполнителя в виде каркаса (преформы) и керамической матрицы. Существует множество технологий изготовления УККМ, различия заключаются как в использовании различных преформ, так и в методах формирования и составах керамической матрицы [3,12]. Наиболее детально технологии изготовления углерод-керамических КМ представлены в [4].

В связи с техническим прогрессом и предъявлением повышенных требований к перспективным летательным аппаратам, и соответственно к элементам теплонагруженных конструкций, возникает необходимость в разработке новых материалов, способных выдерживать тепловые нагрузки более 2000 °С [10,12].

Многие авторы [13,14,15] выделяют технологию пропитки расплавами – RMI (Reactive Melt Infiltration) как наиболее приоритетную для решения задач по применению в изготовлении материалов и деталей различных форм и размеров, в том числе со сложным профилем, с предъявленными повышенными требованиями благодаря возможности использования широкого ассортимента рецептур и варьирования технологических параметров.

Для разработки технологии и унифицированной рецептуры высокотемпературного УККМ, а также для решения вопросов организации, оценки, управления и оптимизации технологии изготовления материалов и конструкций с предъявленными повышенными требованиями в производстве, и в дальнейшем для повышения качества получаемого материала, необходимо разработать структурно-функциональную модель технологического процесса получения углерод-керамического композиционного материала методом пропитки расплавом с применением шликерного метода. При использовании структурно-функциональных моделей возможно представить любые процессы, которые реализуются на предприятии.

Литературные данные по данной технологии ограничиваются только общим описанием процесса (рисунок 1), при этом не указывают и не представляют реальную технологическую последовательность, включенные в неё объекты и процессы, поэтому целью настоящего исследования является разработка структурно-функциональной модели технологического процесса получения углерод-керамического композиционного материала методом пропитки расплавом.

Разработка модели технологического процесса позволит обеспечить общее понимание технологического процесса, определить структуру и динамику организации технологического процесса, установить факторы и требования к технологическим элементам и операциям, осмыслить текущие проблемы системы и определить возможности ее улучшения.



Рисунок 1 – Схема технологического процесса получения углерод-керамического композиционного материала методом пропитки расплавом

Задачи исследования:

- Выбор метода моделирования и разработка на его основе модели технологического процесса получения КМ методом пропитки расплавами.
- Проверка разработанной модели путем проведения экспериментальных исследований.

Выбор метода исследования

В современных предприятиях в сфере машиностроения и исследовательских институтах применяют Единую систему технологической документации (ЕСТД) для представления информации. Однако многие авторы предлагают использовать более современные методы описания процессов. Такими современными методами выступают международные стандарты IDEF, и их использование рекомендуют, по крайней мере, на этапах проектирования технологических процессов, когда еще не выставляются требования по ЕСТД. Данные методы могут применяться как до, так и в процессе разработки документации по ЕСТД [5,6,8]. Различают множество методов IDEF, и каждый предназначен для решения конкретных задач. Для описания технологических операций и процессов наиболее применим – IDEF3. Так он представляет собой методологию документирования процессов, происходящих в системе. Данная методология используется, например, при исследовании технологических процессов на предприятиях и позволяет описать сценарий и последовательность операций для каждого процесса. IDEF3 – является одновременно и стандартом для документирования различных процессов, которые происходят в рассматриваемой системе, и методологией моделирования. Каждый функциональный блок технологии может быть представлен в виде отдельного процесса с использованием инструментов IDEF3.

Данный метод документирования технологических процессов является:

- системой (механизмом) сбора различной информации о происходящих процессах;
- способом фиксации и выражения ситуаций и событий, происходящих в системе, а также их отношений и причинно-следственных связей;
- структурированным приемом выражения знаний о том, как работает система, процесс или организация.

Цель использования описаний по IDEF3 – создание структурированного описания, которое будет отражать информацию о действиях или намерениях

системы, а также обеспечивать организацию и выражение различных пользовательских представлений о системе.

Одним из преимуществ применения данного стандарта является возможность описания поведенческих аспектов существующей или предлагаемой системы и интуитивно понять устройство получения знаний для рассмотрения процессов и системы в целом. При этом IDEF3 включает в себя два метода описания процессов и моделей:

- PFD (Process Flow Description) – графическое описание последовательности операций технологического процесса (поток процессов).

- OSTN (Object State Transition Network) – графическое описание переходов состояний объектов в технологическом процессе, с указанием того, какие у него могут существовать промежуточные состояния (состояния объекта). Метод отражает свойства объекта при каждом переходе системы, т.е. при каждой операции.

Использование выбранного метода в рамках проведения данной работы позволяет создавать графические описания процессов согласно литературному источнику [1] в виде структурно-функциональных моделей.

Разработка модели технологического процесса получения УККМ методом пропитки расплавами с использованием IDEF3 метода моделирования

Применение рассматриваемого метода для описания технологического процесса получения УККМ методом пропитки расплавами с применением шликера позволило создать структурно-функциональную модель в виде описаний потока процессов (PFDD) и состояния объектов (OSTN).

Графическое описание разработанной модели в виде описания потока процессов (операций) представлено на рисунке 2. На модели PFDD прямоугольники обозначают события, стадии процесса или принятие решений, и являются функциональными элементами (Unit of Behavior, UOB). Стрелки – отображение перемещения объекта изготовления в ходе выполнения процесса. Объект, который обозначен J1, является перекрестком слияния, и означает, что все предшествующие действия должны быть выполнены до момента наступления следующего действия [7].

Первые три операции структурно-функциональной модели технологического процесса в виде PFDD являются контрольными, и включают в себя контроль качества углеродной заготовки, связующего и порошковых компонентов. Данные операции позволяют использовать исходное сырье надлежащего качества, при этом возможно выполнение контрольных операций параллельно. Далее происходит процесс смешения связующего и керамических порошковых компонентов, в результате чего образуется шликер. Следующим этапом технологического процесса является нанесение шликера на поверхность углеродной заготовки. После отверждения нанесенного шликера проходит процесс термической обработки в вакуумной печи. Во время нагрева шликер на поверхности заготовки под действием температуры переходит в расплав и формирует керамическую матрицу при взаимодействии с углеродной основой, с образованием УККМ. Завершающим этапом данного процесса является контроль качества получаемого УККМ.

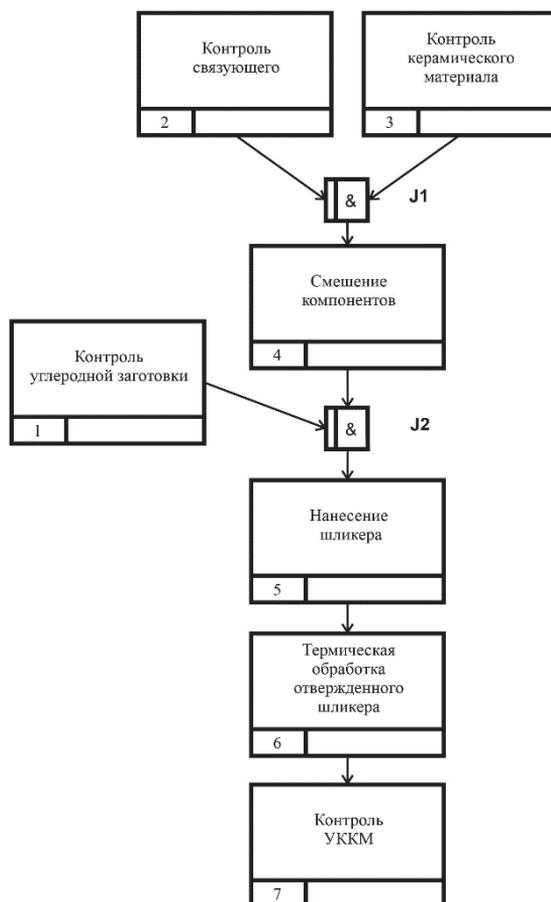


Рисунок 2 – Структурно-функциональная модель технологического процесса получения УККМ методом пропитки расплавом в виде потока процессов (до проведения экспериментальной проверки)

Графическое описание разработанной модели в виде отображения состояний объектов в технологическом процессе и их взаимосвязей с рассмотренными процессами представлено на рисунке 3.

Окружности, показанные на модели, представляют состояния объекта, а стрелки указывают на их изменения. Каждая линия имеет ссылку на соответствующий функциональный блок в виде действия, отмеченный прямоугольником УОВ, в результате которого происходит воспроизводимое ему изменение состояния объекта [7].

Одним из основных объектов и первым в данной модели является углеродная заготовка, прошедшая контроль качества. Вторым и третьим объектами являются связующее и порошковые компоненты, которые также должны проходить контроль качества. При следующей операции объектом процесса уже является шликер, который образовывается при объединении связующего и порошковых компонентов путем выполнения операции «смешение». Полученный шликер и углерод-углеродная заготовка при выполнении действия «нанесение шликера» объединяются в объект «углеродная заготовка со шликером». Завершающим со-

стоянием объекта в системе является УККМ, который приобретает данное состояние после действия «термическая обработка». Также на диаграмме отмечено, что к конечному объекту предъявляются требования, и он должен быть подвергнут контролю качества.

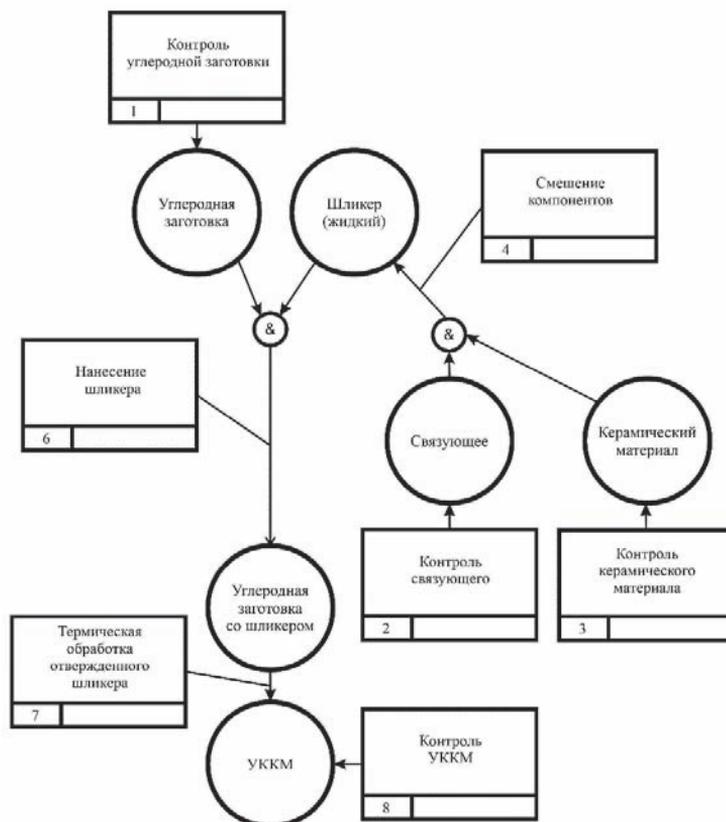


Рисунок 3 – Модель технологического процесса получения углерод-керамического композиционного материала УККМ методом пропитки расплавом в виде состояний, используемых объектов (до проведения экспериментальной проверки)

Таким образом, показаны две модели технологического процесса изготовления УККМ с двух точек зрения, со стороны последовательности описания технологических операций и со стороны изменения состояния объектов при выполнении технологических операций. В совокупности данные модели отвечают на вопросы «что делать?» и «что именно мы получаем?» при выполнении операции.

Верификация полученной модели

В качестве метода управления процессом разработки структурно-функциональных моделей был использован элемент управления качеством, рекомендуемый национальным стандартом ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [2]. Он представляет собой цикл «Планируй – Делай – Проверяй – Действуй» (PDCA, Plan-Do-Check-Act). Данный цикл PCDA состоит из следующих функций: планирова-

ние, организация процесса, контроль выполнения и регулирования (корректировка). Практическая реализация процессного подхода заключается в выполнении проверки и сопоставления разработанных моделей реальной действительности путем экспериментальной отработки заявленной модели.

Во время проведения экспериментальной отработки разработанных моделей были выявлены некоторые несоответствия между модельными и действительными процессами, которые были установлены непосредственно в процессе изготовления. Так, например, разработанные модели не отображают входные и выходные параметры операций, показатели качества объектов, а также не дают понять, когда и какие показатели, и характеристики технологического процесса необходимо устанавливать и контролировать.

Структурно-функциональная модель в виде потоков процессов (операций) после проведения экспериментальной проверки и внесения корректировок представлена на рисунках 4 и 5.

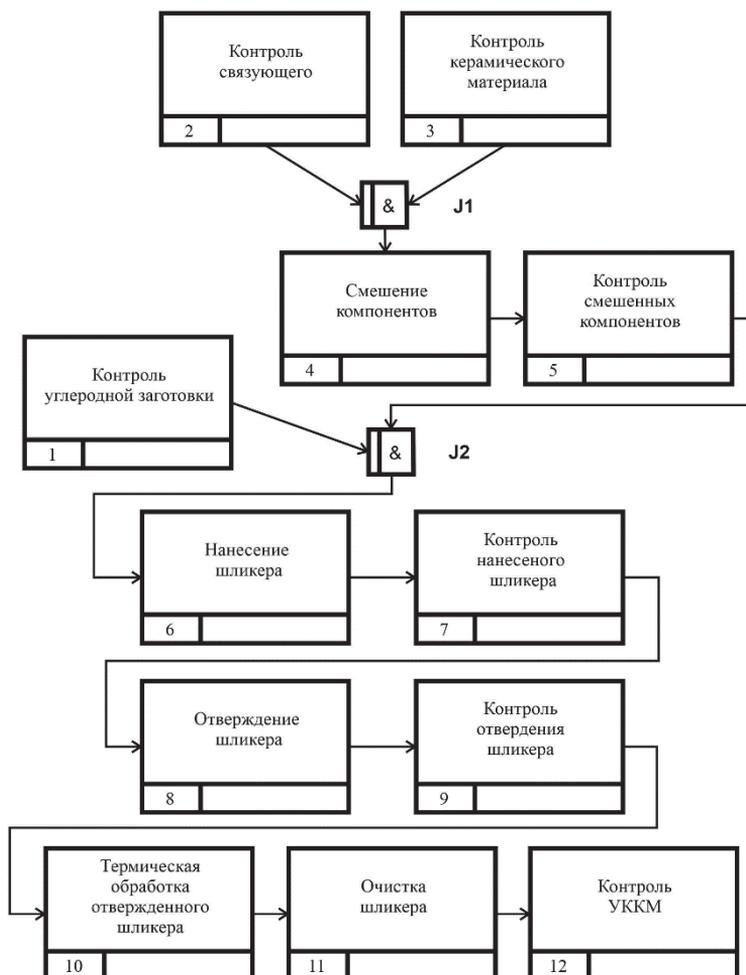


Рисунок 4 – Структурно-функциональная модель технологического процесса получения УККМ методом пропитки расплавом в виде потока процессов (после проведения экспериментальной проверки)

В дополнение к основным процессам, показанным в модели после проведения экспериментальной проверки разработаны контрольные подпроцессы, которые представлены на рисунке 5. Введение дополнительных операций связано с необходимостью установления требований к параметрам основных операций и их контролю.

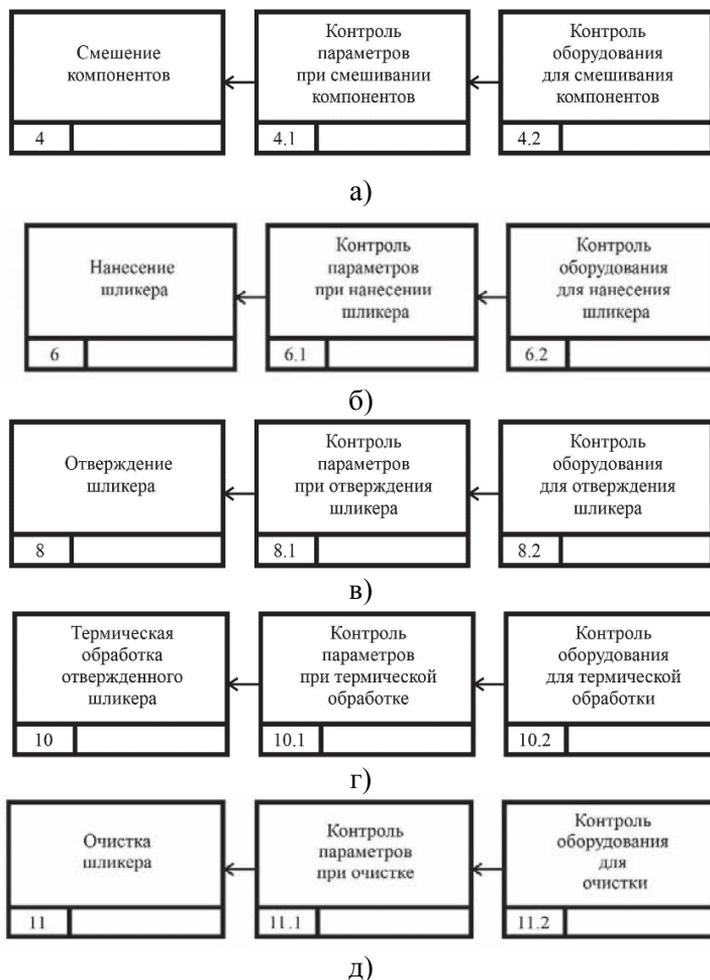


Рисунок 5 – Подпроцессы структурно-функциональной модели технологического процесса получения УККМ методом пропитки расплавами (после проведения экспериментальной проверки)

Экспериментальная отработка и сопоставление технологического процесса разработанной модели позволили изменить представление о состоянии объектов технологического процесса изготовления УККМ методом пропитки расплавами и провести корректировку модели. Результаты внесенных изменений в модели представлены на рисунке 6.

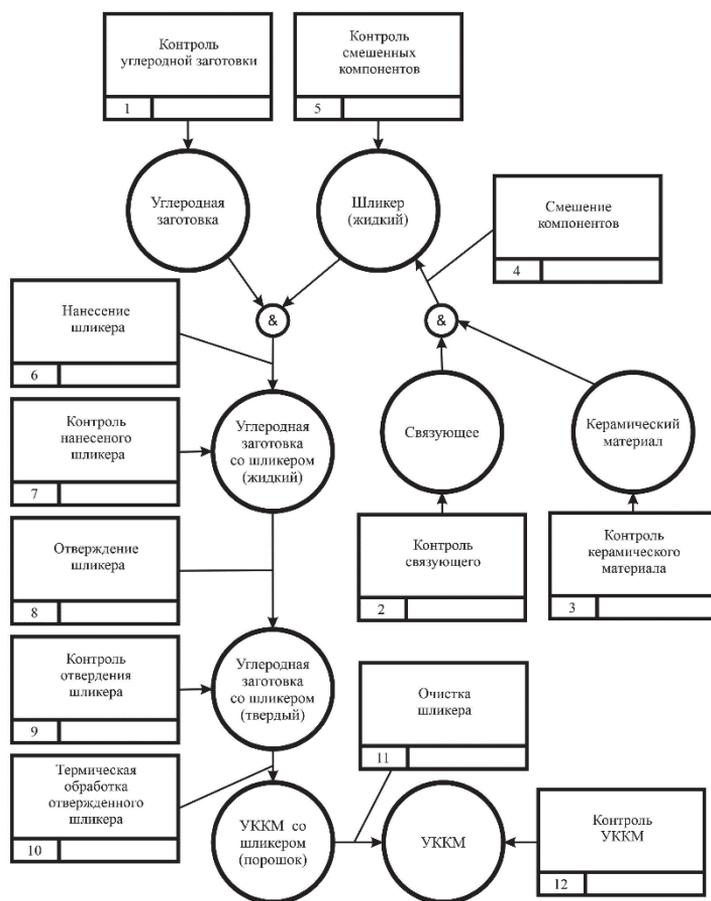


Рисунок 6 – Модель технологического процесса получения УККМ методом пропитки расплавом в виде состояний используемых в нем объектов (после проведения экспериментальной проверки)

Повторная проверка всех установленных процессов и объектов, по сравнению с первичной проверкой, показала практическую возможность использования представленных моделей для решения научно-исследовательских задач, связанных с применением данной технологии.

Обсуждение результатов разработки структурно-функциональных моделей технологического процесса в виде потоков процессов и объектов состояния

Корректировка процессов после проведения первичной и вторичной экспериментальных отработок технологического процесса позволила по-другому оценить происходящие процессы и операции в рассматриваемой системе технологии изготовления УККМ, в отличие от изначально разработанных проектов моделей. Применение методологии IDEF3 позволило теоретически и практически применить заложенные в разработанной модели основы и требования без использования ЕСТД.

Применение метода PFDD в виде описания потока процессов дало воз-

возможность сконцентрировать внимание на операциях и действиях в технологическом процессе и установить их реальную технологическую последовательность. Описание потока процесса охватывает знания о том, «как все работает» в организации, содержит данные о процессе и сети отношений, которые существуют между процессами в контексте общего сценария, в котором они происходят.

Применение метода OSTN в виде описания состояния объектов позволило сконцентрировать внимание на объектах технологического процесса и установить реальную последовательность переходов. Описание сети перехода состояний объекта суммирует допустимые изменения объекта в течение определенного процесса и раскрывает суть того, что происходит с заготовкой материала или детали в течение производственных процессов.

Разработанные структурно-функциональные модели дают возможность устанавливать показатели качества и характеристики объектов технологических переходов, технические требования и параметры технологических режимов и операций. Для решения дальнейших практических и экспериментальных задач необходимо проводить дополнительные исследования по выбору влияющих факторов, оптимизации, управления или улучшения технологического процесса для научно-технического прогресса и изготовления материалов с улучшенными показателями.

Разработанная модель потока процесса может помочь для выбора и определения необходимых технологических режимов изготовления УККМ. Модель описания состояния объектов в технологическом процессе может позволить выбрать стандартизированные показатели и методы контроля качества для представленных в ней объектов.

Заключение. Разработанные структурно-функциональные модели технологического процесса получения УККМ методом пропитки расплавом позволили выявить ключевые элементы процесса и стали основой для построения варианта обобщенной математической модели с учетом показателей структуры, функций и последовательностей взаимодействия для каждого элемента (этапа). Назначение внутренних связей между элементами всех уровней и подуровней позволило на основе исходных данных принимать технические решения и прогнозировать конечные результаты технологического процесса. Использование разработанных моделей может послужить основой для создания системы контроля и управления качеством технологического процесса, что в свою очередь способствует изготовлению композиционного материала требуемого качества.

Литература

1. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения // Официальное издание. М.: Стандартинформ. 2018 год. 10 с.
2. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования // Официальное издание. М.: Стандартинформ. 2018 год. 23 с.
3. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1998. 516 с.

4. Волкова В.А. Анализ и классификация технологических методов получения углерод-керамических композиционных материалов с использованием расплавов тугоплавких металлов или их соединений // Инновационные аспекты социально-экономического развития региона. 2018. С. 132-140.
5. Гродзенский С.Я., Овчинников С.А., Калачева Е.А. Применение стандартов моделирования в CALS-технологиях // Методы менеджмента качества. 2013. № 6. С. 38-43.
6. Евгеньев Г.Б. Российские технологии создания систем класса «Индустрия 4.0». Часть 1 // Известия вузов. Машиностроение. 2018. № 8 (701). С. 55-63.
7. Основы IDEF3 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cfin.ru/vernikov/idef/idef3.shtml> (дата обращения: 05.01.2020).
8. Панов А.Ю., Святлов Е.Е. Применение методов IDEF-моделирования при описании технологических процессов машиностроительного производства // Труды НГТУ им. П.А. Алексеева. 2017. № 4. С. 149-154.
9. Симоненко Е.П., Севастьянов Д.В., Симоненко Н.П. и др. Перспективные ультравысокотемпературные керамические материалы для авиакосмического применения // Russian Journal of Inorganic Chemistry (eng.). 2013. Т. 58, № 14. С.1669-1693.
10. Смердов А.А. Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники // Автореферат диссертации на звание доктора технических наук // Москва. 2008. 410 с.
11. Clyne T.W., Hull D. An introduction to composite materials. Cambridge university press. 2019. 345 p.
12. Department of defense handbook. Composite materials handbook. Volume 5. Ceramic matrix composites (MIL-HDBK-17-5) [Электронный ресурс]. / U.S. Army Research Laboratory // Weapons and Materials Research Directorate. 2002. URL: <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-HDBK-17-5.pdf> (дата обращения 03.01.2020).
13. Paul A. et al. UHTC composites for hypersonic applications // The American Ceramic Society Bulletin. 2012. № 91 (1). P. 22-28.
14. Pi H., Fan S., Wang Y. C/SiC–ZrB₂–ZrC composites fabricated by reactive melt infiltration with ZrSi₂ alloy // Ceramics International. 2012. Т. 38, № 8. P. 6541-6548.
15. Zhu Y. et al. Fabrication of Cf/ZrC composites by infiltrating Cf/C performs with Zr–Cu alloys // Materials Letters. 2013. Т. 108. P. 204-207.

УДК 620.22:629.78

Результаты исследования износостойкости конструкционных материалов

Н.Г. Серёгин, кандидат технических наук, доцент,
заместитель директора завода «Импульс» Акционерного Общества
«Научно-Производственное Объединение Измерительной Техники»
(АО «НПО ИТ»), г. Королев, Московская область,

В.Г. Исаев, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой управления качеством и стандартизации
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Описана конструкция экспериментальной установки для проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов. Представлены результаты сравнительных испытаний износостойкости двух пар трения при статическом нагружении и определена лучшая из них. Приведены результаты испытаний износостойкости лучшей пары трения при динамическом нагружении. Разработана математическая модель динамического изнашивания лучшей пары трения конструкционных материалов.

Износостойкость конструкционных материалов, процесс изнашивания, методика испытаний, экспериментальная установка, статическое нагружение, динамическое нагружение, математическая модель.

Results of research on wear resistance of structural materials

N.G. Seregin, candidate of technical Sciences, associate Professor,
deputy director of the plant «Impulse»
of the joint-Stock company «Scientific and Production Association
of Measuring Equipment» (JSC «NPO IT»), Korolev, Moscow region,

V.G. Isaev, candidate of technical Sciences, associate Professor,
head of the Department of quality management and standardization,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The design of an experimental installation for conducting comparative tests of the wear resistance of various friction pairs of structural materials is described. The results of comparative tests of the wear resistance of two friction pairs under static loading are presented and the best of them is determined. The results of tests of the wear resistance of the best friction pair under dynamic loading are presented. A mathematical model of dynamic wear of the best friction pair of structural materials is developed.

Wear resistance of structural materials, wear process, test method, experimental setup, static loading, dynamic loading, mathematical model.

Предмет исследования

Обеспечение качества производства продукции является одной из первоочередных задач для предприятий, выпускающих ракетно-космическую технику. При этом качество производимых изделий в значительной степени зависит от надежности станочного парка и точности обработки деталей на станках. А износостойкость конструкционных материалов является одним из важнейших показателей, характеризующих надежность машиностроительной продукции. Изучению вопросов обеспечения надежности металлообрабатывающих станков, а также разработке методического аппарата по расчету показателей надежности различного технологического оборудования, используемого при изготовлении продукции ракетно-космической отрасли [1...10]. Для определения закономерностей процесса изнашивания в подвижных сопряжениях механизмов подачи металлорежущих станков следует провести испытания на износ различных конструкционных материалов пар трения. Тем более что износ направляющих механизмов подачи металлорежущих станков вызывает изменение траектории движения токарных или фрезерных суппортов по направляющим скользящим, а это приводит процесс металлообработки к выходу за границы поля допуска по обеспечению заданной величины прямолинейности поверхностей обрабатываемых деталей. Также, возникновение износа направляющих скользящих механизмов подачи металлорежущих станков, косвенно из-за формирования зазоров в стыках механизмов подачи влияет на снижение контактной жесткости и ухудшение динамических характеристик упругих систем механизмов. А ухудшенные динамические характеристики упругих систем механизмов подачи металлорежущих станков приводят к увеличению вибрационных воздействий, вызывающих кинематические возмущения, которые также снижают технологическую точность обработки деталей на станках. Из чего следует, что выбор конструкционных материалов пар трения механизмов подачи имеет большое значение для обеспечения надежности металлорежущих станков. Решение проблемы износостойкости конструкционных материалов особенно важна для оборудования, работающего на любых предприятиях, в первую очередь выпускающих продукцию ракетно-космической отрасли.

Цель и задачи исследования

Целью проведенных исследований износостойкости конструкционных материалов был выбор лучшей пары трения направляющих скользящих технологического оборудования. Для достижения указанной цели в ходе исследований решались следующие задачи:

- разработка методики проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов;
- разработка экспериментальной установки для проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных мате-

риалов;

- проведение сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов;
- выбор лучшей пары трения направляющих скольжения технологического оборудования;
- разработка рекомендаций по установлению закономерностей процессов изнашивания выбранной пары трения направляющих скольжения технологического оборудования в заданном диапазоне эксплуатационных нагрузок.

Методы и средства достижения цели

Методика проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов является нормативным документом, в котором излагаются: метод испытаний, средства измерений и условия при которых проводятся испытания, алгоритмы оценки достоверности результатов испытаний и оценки точности, полученных результатов, формы учёта данных, а также требования охраны труда и охраны окружающей среды. Основным требованием к методике проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов является обеспечение максимальной эффективности сравнительных испытаний и достижение минимальной погрешности результатов испытаний.

Под методом сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов понимают совокупность программ и средств испытаний. Выбирая метод сравнительных испытаний, следует учитывать конструкторско-технологические особенности износостойкости различных пар трения конструкционных материалов, нормы контролируемых параметров их износостойкости и требуемую точность измерения. Средствами испытаний являются экспериментальная установка для проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов и непосредственно конструкционные материалы, применяемые в парах трения.

Методика проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов должна состоять из следующих этапов:

- из проверки экспериментальной установки;
- из подготовки конструкционных материалов, применяемых в парах трения;
- из совместной проверки экспериментальной установки и конструкционных материалов;
- из проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов и регистрации их результатов, а также данных об условиях проведения сравнительных испытаний.

В процессе проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов должны быть обеспечены точность применения средств испытаний и достоверность измерений и контроля измеряемых параметров, воздействующих на конструкционные материалы, приме-

няемые в парах трения. Формы учёта данных следует разработать достаточно подробно, чтобы гарантировать регистрацию всех входных и выходных параметров с указанием единиц измерения, приведённых к единой системе.

Для проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов была использована специальная установка, внешний вид которой представлен на рисунке 1. Экспериментальная установка для проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов позволяет осуществлять физическое моделирование режимов и условий работы в подвижных сопряжениях механизмов подачи металлорежущих станков, работающих на предприятиях ракетно-космической техники.

Экспериментальная установка оснащена четырьмя узлами нагружения (рис. 1), позволяющими производить испытания на каждом из них независимые испытания износостойкости различных пар трения при различных условиях нагружений с высокой точностью. Одной из трудностей в испытаниях износостойкости различных пар трения конструкционных материалов в подвижных сопряжениях механизмов подачи металлорежущих станков является моделирование на экспериментальных установках реверсивного возвратно-поступательного движения суппортов металлорежущих станков по направляющим подачи.

На разработанной и испытанной авторами экспериментальной установке (рис. 1) реверсивное возвратно-поступательное движение суппортов механизмов подачи заменено на вращательное движение четырёх цилиндрических образцов 1 пар трения, моделирующих направляющие скольжение, взаимодействующих с образцами 2 конструкционных материалов, моделирующих накладки суппортов (рис. 2).

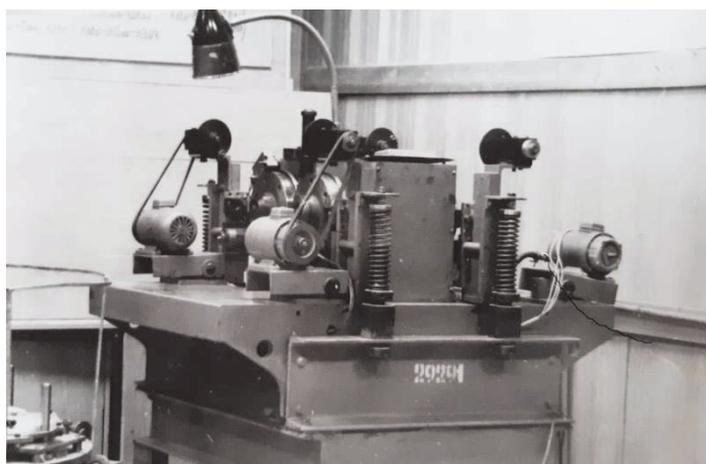


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для проведения сравнительных испытаний износостойкости различных пар трения конструкционных материалов

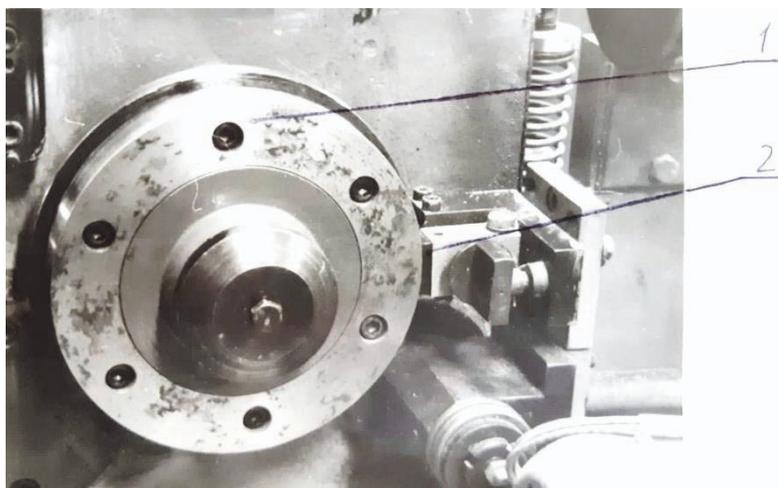


Рисунок 2 – Узел трения экспериментальной установки для проведения сравнительных испытаний износостойкости различных конструкционных материалов

При этом конструкция экспериментальной установки (рис. 1) позволяет проводить не только независимые испытания износостойкости различных пар трения конструкционных материалов, но и с высокой точностью воспроизводить реальные динамические нагружения в контактах пар трения. В том числе, и моделировать вибрационные процессы в контактных площадках различных пар трения конструкционных материалов.

Результаты исследования

В качестве материалов для исследования износостойкости направляющих скольжения механизмов подачи были приняты серый чугун СЧ21-40 и сталь 40Х. А в качестве материалов для исследования износостойкости накладок суппортов – углеволокнит ЭПАН. Сравнительные испытания износостойкости пар трения серый чугун СЧ21-40 – углеволокнит ЭПАН и сталь 40Х – углеволокнит ЭПАН в течении более чем 150 часов, со скоростью подачи $V_s = 11,62$ м/мин и при нормальном давлении по площадке контакта $p = 0,2$ МПа показали преимущество последней. Потому что, пара трения сталь 40Х – углеволокнит ЭПАН обладает меньшей скоростью изнашивания γ (мкм/час), чем пара трения СЧ21-40 – углеволокнит ЭПАН. Результаты их сравнительных испытаний представлены на рисунке 3.

На следующем этапе исследований пара трения сталь 40Х – углеволокнит ЭПАН испытана не только при наличии нормального давления p в диапазоне от 0,1 МПа до 0,4 МПа, но и дополнительно при динамическом приращении нормального давления A от 0,01 МПа до 0,09 Мпа. Результаты сравнительных испытаний этой пары материалов представлены на рисунке 4.

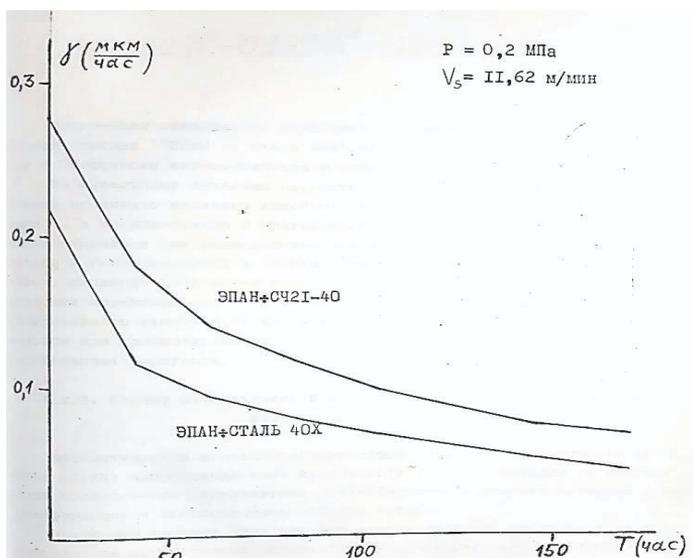


Рисунок 3 – Результаты сравнительных испытаний износостойкости пар трения серый чугун СЧ21-40 – углеволокнит ЭПАН и сталь 40Х – углеволокнит ЭПАН

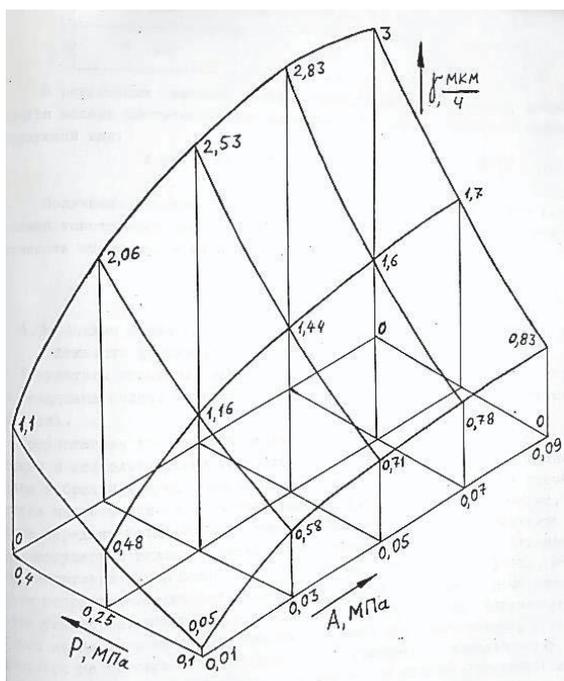


Рисунок 4 – Результаты исследования зависимости скорости изнашивания γ ($\mu\text{м}/\text{ч}$) в паре трения сталь 40Х – углеволокнит ЭПАН от нормального давления p и динамического приращения нормального давления A

Значения величины нормального давления p приняты на основании эксплуатационных наблюдений за работой направляющих скольжения технологического оборудования, а значения величины динамического приращения нормаль-

ного давления A приняты из условия обеспечения не размыкания контакта в паре трения конструкционных материалов.

На основании результатов исследования зависимости скорости изнашивания γ (мкм/ч) в паре трения сталь 40X – углеволокнит ЭПАН от нормального давления p и динамического приращения нормального давления A (рис. 4) разработана математическая модель:

$$\gamma = 1,512 + 0,903 p + 0,372 A + 0,182 p^2 - 0,162 A^2 + 0,212 p A. \quad (1)$$

Математическая модель (1) позволяет рассчитывать скорость изнашивания γ в паре трения сталь 40X – углеволокнит ЭПАН при различных известных значениях нормального давления p и динамического приращения нормального давления A .

Литература

1. Аврамова Т.М, Бушуев В. В., Гиловой Л.Я. и другие. Металлорежущие станки // М.: Машиностроение. 2012. 608 с.
2. Проников А.С. Надёжность машин // М.: Машиностроение. 1978. 590 с.
3. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков // М.: Машиностроение. 1985. 288 с.
4. Кудинов В. А. Динамика станков // М.: Машиностроение. 1967. 358 с.
5. Чичинадзе А.В., Левин А.Л., Бородулин М.М., Зиновьев Е.В. Полимеры в узлах трения машин и приборов // М.: Машиностроение. 1988. 328 с.
6. Волков Е.Б., Судариков Р.С., Сырицын Т.А. Основы теории надёжности ракетных двигателей // М.: Машиностроение. 1974. 399 с.
7. Серёгин Н.Г. Нагрузочно-имитирующие устройства испытательных стендов для исследования надёжности механизмов фрезерных станков // М.: Инженерный вестник. 2014. № 8. С. 33-39.
8. Шашурин В.Д., Ветрова Н.А., Назаров В.В., Серёгин Н.Г. Ускоренные испытания на надёжность технических систем // М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2016. 45 с.
9. Гиясов Б.И., Серёгин Н.Г., Серёгин Д.Н. и другие. Стендовые ускоренные испытания технических систем на надёжность // М.: Издательство АСВ. 2017. 74 с.
10. Исаев В.Г., Серёгин Н.Г., Сорокин С.В. Комплексный расчётно-экспериментальный метод оценки надёжности технических систем летательных аппаратов // М.: Информационно-технологический вестник. 2018. № 4 (18). С. 22-31.
11. Исаев В.Г., Серёгин Н.Г. Анализ надёжности технологического оборудования предприятий ракетно-космической техники на примере консольных фрезерных шпиндельных узлов аппаратов // М.: Информационно-технологический вестник. 2019. № 4 (22). С. 17-23.

УДК669.017

Эффект «памяти жидкости» в стали, чугуне и силумине

К.Ю. Шахназаров, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Материаловедения и технологии
художественной обработки материалов»,
Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург

Явление структурной наследственности получило промышленное применение, несмотря на то что «механизм передачи наследственных признаков расплаву, их сохранение, зарождение в нем новых признаков и передача их твердому металлу – все это сложные, во многом неизученные вопросы» (Б.А. Баум с коллегами).

На примерах стали, чугуна и алюминия предпринята попытка обоснования предположения, что одним из механизмов передачи наследственных признаков может быть эффект «памяти жидкости», который заключается в сохранении ее свойств при очень сильном разбавлении.

Расплав, перлит, мартенсит, аустенит, феррито-цементитная смесь.

The «fluid memory» effect in steel, cast iron and silumin

K.Y. Shakhnazarov, PhD in Engineering Sciences,
Associate Professor of the department «Materials science and technology
of artistic processing of materials»,
Sankt-Petersburg mining university, Sankt-Petersburg

The phenomenon of structural heredity is used by industry, although «the mechanism of transmission of hereditary traits to the melt, their conservation, the generation of new traits in it and their transfer to solid metal are all complex, largely unexplored issues» (B.A. Baum with colleagues).

On the examples of steel, cast iron and aluminum, an attempt was made to substantiate the assumption that one of the mechanisms of transmission of hereditary traits could be the effect of «fluid memory», which consists in maintaining its properties with very strong dilution.

Melt, perlite, martensite, austenite, ferrite-cementite mixture.

Введение

«До сих пор нет единого взгляда на наследственные свойства сплавов, хотя этот вопрос имеет уже полувековую давность» [9, С. 1], [10, С. 606].

«Механизм передачи наследственных признаков расплаву, их сохранение, зарождение в нем новых признаков и передача их твердому металлу – все сложные, во многом неизученные вопросы» [5, С.53].

Попытаемся, используя эффект «памяти жидкости», дать ответ на «сложные» и неизученные вопросы.

Эффект «памяти жидкости» проявляется в сохранении специфических свойств растворов при очень сильном их разбавлении, даже в 10^{120} раз. Так А.А. Пресняков с коллегами [1, С. 153] формулирует этот эффект, открытый Давенасом.

Интерес к столь экзотическому эффекту обоснуем примерами.

Обсуждение литературных данных

При $\sim 0,5-0,6\%C$ установлен независимыми исследователями максимум предела текучести: у литой отожженной стали [16, С. 61]; у отожженной на зернистый перлит стали [4, С. 480]; у термоулучшенной стали [8, С. 144]; у нормализованной стали [3, С. 902].

Поскольку зависимости $\sigma_s - \%C$ однотипны, то на фоне диаграммы Fe – C они показаны одной кривой (рис. 1).

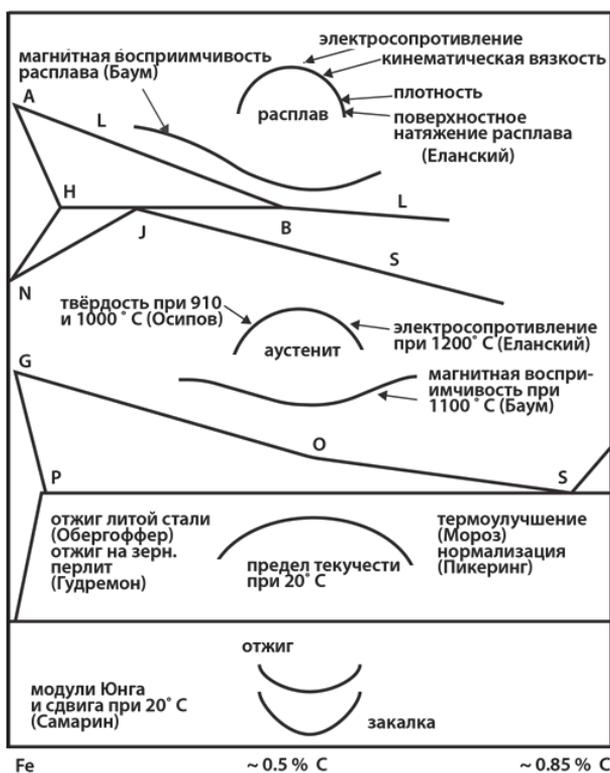


Рисунок 1 – Схематизированная часть диаграммы Fe – C и зависимости свойств от %C

У всех четырех состояний принципиально разная металлографическая структура, но зависимости $\sigma_s - \%C$ качественно одинаковы.

У продуктов отжига и закалки (рис. 1) качественно одинаковые зависимости и модулей Юнга, и сдвига от %C – с минимумами при $0,5-0,6\%C$, хотя структура кардинально разная (мартенсит и феррито-цементитная смесь соответственно) [13, С. 232], [17, С. 7]. Модули показаны двумя кривыми.

Экстремумы предела текучести и модулей упругости авторами не только не комментируются, но даже скрываются.

Например, Э. Гудремон [4, С. 480] провел кривую мимо экспериментальной точки. Ф.Б. Пикеринг не поместил свои данные для нормализованных сталей в свою монографию «Физическое материаловедение и разработка сталей» [11].

Обратимся к родительской фазе этих четырех разных состояний – аустениту.

У аустенита с 0,5-0,6%С максимум твердости при 910 и 1000°C; максимум электросопротивления при 1200°C; минимум магнитной восприимчивости (рис. 1).

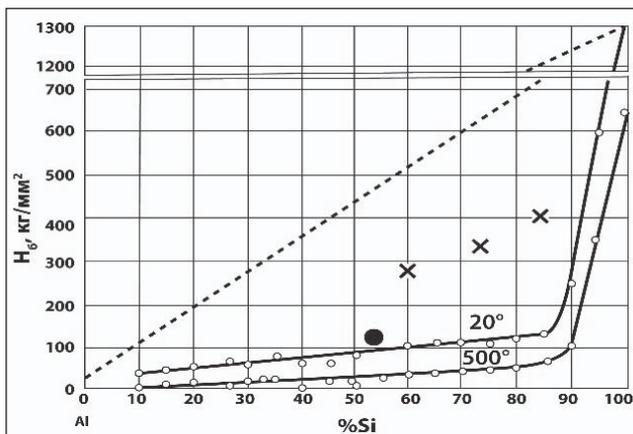


Рисунок 2 – Зависимость твердости силицидов от состава (данные Е.М. Савицкого) (● – твердость горячепрессованного сплава, x – твердость металлокерамических образцов, ----- твердость по правилу аддитивности)

Максимумы твердости и электросопротивления аустенита являются для твердого раствора внедрения абсолютным нонсенсом, как и максимумы предела текучести при 0,5-0,6%С, как и минимумы модулей Юнга и сдвига при 0,5-0,6 %С (рис. 1).

Обратимся к свойствам расплава. При ~ 0,5%С качественно одинаковые максимумы плотности, поверхностного натяжения, кинематической вязкости и электросопротивления (на рисунке они изображены одной кривой). У магнитной восприимчивости расплава минимум.

В расплаве, аустените и мартенсите – растворах – одинаковое содержание углерода.

Но в феррите (тоже твердом растворе) содержание углерода ничтожно по сравнению с аустенитом и расплавом.

Не требует обоснования то, что ответственным за предел текучести и модули упругости после отжига, нормализации и термоулучшения (закалка и отпуск 600 °С) является феррит. (Напомним: в структуре при ~ 0,5%С феррита ~ 92%, а цементита ~ 8%).

Таким образом, одинаковую экстремальную реакцию свойств при ~ 0,5%С расплава, аустенита, мартенсита и феррито-цементитной смеси можно предположительно связать с эффектом «памяти жидкости».

Такое предположение считаем допустимым, поскольку механизм переда-

чи наследственных признаков от аустенита перлиту «недостаточно ясен» [15] даже через 120 лет после начала изучения перлита, которое предпринял Г. Сорби в 1886 г.

Рассмотрим сплавы Al – Si, твердость которых вопиющим образом не подчиняется правилу аддитивности.

Твердость сплавов значительно ниже, чем это требует правило аддитивности (рис. 2). Отметим, что твердость кремния и эвтектики значительно выше, чем у алюминия, но твердость сплавов (до ~ 85%Si) почти не растет. Этот результат привел А.А. Бочвара к поразительному для металловеда выводу: «Однозначной зависимости между составом и свойствами, как оказалось, вообще не существует» [2, С. 743].

Е.М. Савицкий [12, С. 176] предпринял следующие попытки воздействовать на структуру силуминов: изменил условия литья, длительность отжига и даже горячее прессование. Но твердость совершенно не изменилась (рис. 2).

Но металлокерамический способ изготовления сплавов, включающий горячее прессование, повысил твердость в ~ 3 раза, приблизив ее к правилу аддитивности (рис. 2).

Этот способ исключает или ослабляет эффект «памяти жидкости», поскольку в порошковых сплавах взаимодействия атомов компонентов (Al и Si) в расплаве нет. К сожалению, способ приготовления металлических порошков Е.М. Савицким не указан. Поэтому нельзя уверенно отрицать полное отсутствие взаимодействия атомов компонентов в расплаве. Возможно, поэтому твердость сплавов с 60, 75 и 85%Si повысилась не в ~ 5 – 6 раз, а в ~ 3 раза.

У порошковых силуминов нормальное соотношение σ_B (рис. 3, кривая 1) и δ (рис. 3, кривая 2): увеличение доли кремния от ~ 8 до ~ 30% монотонно снижает δ , увеличивая σ_B [14, С. 124].



Рисунок 3 – Схематизированная диаграмма состояния и зависимость свойств от содержания кремния (данные Г.Б. Строганова и др.)

Но у литых в кокиль, или в землю, или деформированных на 86,5% при $\sim 250^{\circ}\text{C}$ силуминов эвтектической точки ($\sim 12\% \text{Si}$) соответствует аномалия: максимуму $\sigma_{\text{в}}$ (рис. 3, кривая 3) отвечает максимум δ (рис. 3, кривая 4) [14, С. 121]. Поскольку зависимости $\sigma_{\text{в}} - \% \text{Si}$ и $\delta - \% \text{Si}$ качественно одинаковы, то они показаны обобщенными кривыми 3 и 4, хотя структура у этих трех состояний кардинально разная.

Можно предположить, что отсутствие аномального хода кривых $\sigma_{\text{в}}$ и δ у спеченного силумина связано с ослаблением или уничтожением эффекта «памяти жидкости», которого у металлокерамического силумина быть не может, поскольку его структура и свойства формировались без расплавления на последней стадии приготовления.

В насыщенной экспериментальными данными работах Г.М. Кимстача [6], [7] с соавторами приведено 18 кривых с экстремумами: на 8 кривых максимумы, на 10 кривых минимумы.

Кривые однотипны. Поэтому приведем только две. Рядом с кривыми и в подписи к рисункам указаны некоторые изученные особенности структуры и свойств.

Кривые ярко иллюстрируют эффект наследственности: выдержка расплава синтетического чугуна с $\sim 3,5\% \text{C}$ и $1,7\% \text{Mn}$ в продолжении 120 мин качественно одинаково влияет на характеристики расплава, аустенита и феррита. Последний, как известно, в отличие от расплава и аустенита сильно разбавлен углеродом по отношению к родительским фазам (расплаву и аустениту). Но его реакция на выдержку 120 мин качественно такая же, как у аустенита и расплава.

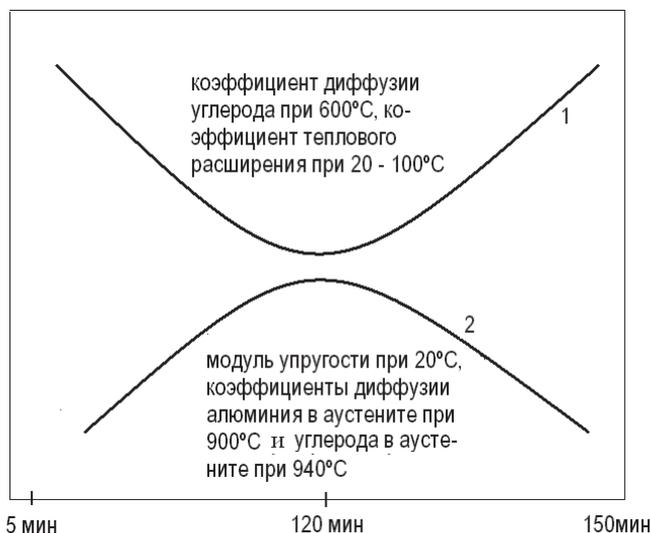


Рисунок 4 – Зависимость характеристик структуры и свойств от времени выдержки синтетического чугуна с $\sim 3,5\% \text{C}$ и $1,7\% \text{C}$ при 1480°C ; 1 – температура конца эвтектоидного превращения, энергия активации диффузии алюминия при 900°C , дисперсность перлита, количество графита; 2 – дисперсность перлита, энергия активации диффузии углерода в феррите при 600°C , количество связанного углерода, твердость перлита (данные Г.М. Кимстача и др.)

Важно заключение авторов: «закономерно изменяется как микроструктура, так и структурно чувствительные свойства... Но столь же закономерно изменяются и свойства, мало зависящие от структуры» – «коэффициент теплового расширения и модуль упругости (рис. 4, кривые 1, 2), которые характеризуют жесткость сплава и определяются прочностью межатомных связей».

Обратим внимание на диффузионные константы, которые, согласно Г.В. Курдюмову, тоже характеризуют связь между атомами железа. Экстремальная зависимость констант (рис. 4, кривые 1, 2) и в феррите, и в аустените, в сотни раз различающихся содержанием углерода, может быть связана с «воспоминанием», «памятью» о совместном существовании в расплаве, а затем в аустените, производное которых – феррит – наследует родительские свойства.

Разумеется, предлагаемая концепция является всего лишь версией: природе эффекта «памяти жидкости» вряд ли удастся раскрыть, как это случилось с парадоксом теплоемкости, постулатами Бора, дуальностью электрона.

Считаем продуктивной версию А.А. Преснякова: в расплаве существует дальний «электронный» порядок, который «приказывает» ионам занять то или иное место в той или иной кристаллической решетке в процессе затвердевания.

Литература

1. Аубакирова Р.К., Дегтярева А.С., Пресняков А.А. Закономерности развития эвтектоидных реакций в бинарных системах // Алма-Ата: Наука. 1990. 168 с.
2. Бочвар А.А. // Известия АН СССР. 1946. № 5. С. 743-752.
3. Burns K.W., Pickering F.B. Deformation and fracture of ferrite-perlite structures // Journ. Of the Iron and steel institute. 1964. V. 202. № 11. P. 899-906.
4. Гудремон Э. Специальные стали. В 2-х т. Т.1 // М.: Metallurgizdat. 1959. 952 с.
5. Баум Б.А., Хасин Г.А., Тягунов Г.В. Жидкая сталь // М.: Metallurgiya. 1984. 208 с.
6. Кимстач Г.М., Драпкин Б.М., Шилова М.Н., Уртаев Д.А. // Metallurgiya mashinostroeniya. 2005. № 3. С. 18-23.
7. Кимстач Г.М., Шилова М.Н., Драпкин Б.М., Уртаев Д.А. // Metallurgiya mashinostroeniya. 2006. № 3. С. 20-23.
8. Мороз Л.С. Тонкая структура и прочность стали // М.: Metallurgizdat. 1957. 159 с.
9. Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах // М.: Mashinostroeniye. 2005. 476 с.
10. Никитин К.В., Никитин В.И. Управление качеством литых изделий из сплавов на основе явления структурной наследственности // Сб. докл. Девятого международного конгресса «Цветные металлы и минералы» // Красноярск. 2017. С. 606-613.
11. Пикеринг Ф.Б. Физическое материаловедение и разработка сталей. Пер. с англ. А. П. Бащенко и др. // М.: Metallurgiya. 1982. 182 с.
12. Савицкий Е.М. Влияние температуры на механические свойства металлов и сплавов // М.: Изд-во АН СССР. 1957. 294 с.

13. Самарин А.М. Структура и свойства сплавов железа с углеродом // Сб. Металловедение. Материалы симпозиума, посвященного 100-летию открытия Д.К. Черновым полиморфизма железа // М.: Наука. 1971. С. 231-235.
14. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием // М.: Metallurgia. 1977. 271 с.
15. Счастливцев В.М. Перлит в углеродистых сталях // УРО РАН. 2006. 311 с.
16. Обергоффер П. Техническое железо // М., Л.: Metallurgizdat. 1940. 535 с.
17. Шахназаров К.Ю. Диаграмма железо-углерод Д.К. Чернова, структура и свойства стали // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 1. С. 6-9.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site:www. unitech-mo.ru

Подписано в печать 17.06.2020
Формат В5
Печать офсетная. Усл.печ.л. 11,6
Тираж 500 экз.
Заказ № 82-11
Отпечатано
в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва
Хорошевское шоссе, 35, корп.2
Тел.: +7 (926) 609-32-93,
+7 (499) 195-60-77
E-mail :keyneslab@gmail.com
Site:www.n-ko.ru