

---

УДК 629.7

## **Системное исследование и прогнозирование с помощью технологий быстрого прототипирования**

**А.Э. Аббасов**, аспирант,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Рассмотрены технологии трехмерного моделирования и быстрого прототипирования; проанализированы подходы для отработки и сборки изделий и материалов сложных технических систем и возможность их реализации с помощью современных информационных технологий; определена эффективность комплексного применения информационных технологий трехмерного моделирования и аддитивных технологий.*

Опытные образцы, макеты, трехмерное моделирование.

## **System research and prediction with rapid prototyping technology**

**A.E. Abbasov**, a graduate student,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*The technology of three-dimensional modeling and rapid prototyping; Approaches for testing and assembly products and materials of complex technical systems and the ability to implement them with the help of modern information technologies; The efficiency of the integrated use of information technology and three-dimensional modeling of additive technologies.*

Prototypes, layouts, three-dimensional modeling.

Технологии быстрого прототипирования (быстрого «макетирования») широко применяются на современном этапе развития средств вычислительной техники для быстрого создания опытных образцов или работающей модели системы, для демонстрации заказчику или проверки возможности реализации. Макеты могут быть выполнены из металла, из пластика, или в электронном виде с помощью технологий трехмерного моделирования [1...3].

При системном исследовании и прогнозировании возможности создания новых изделий и материалов для промышленной и ракетно-космической техники большое значение имеют технологические процессы их отработки и сборки. Актуально проведение научных исследований по сокращению процесса отработки и сборки изделий и материалов с помощью компьютерных технологий визуализации технологического процесса сборки [4], аддитивных технологий создания цифровой модели с помощью 3D-сканирования и макетирования с помощью 3D-

---

печати [5], специализированных программных сред для расчета оптимальных по выбранному критерию параметров изделий [6].

### **Анализ подходов для отработки и сборки сложных технических изделий и материалов.**

Проведенный анализ представленных вариантов технологического процесса отработки и сборки технических изделий и материалов показал, что качество процессов не соответствует показателям или по точности результата, или по трудоемкости и затратам материальных и энергетических ресурсов [7]. Обеспечение оптимального сочетания высокой точности размеров проектируемых изделий и минимальных затрат в процессе их сборки, обнаружение технологических несоответствий на ранней стадии в процессе моделирования возможно за счет применения технологий трехмерного моделирования. Трехмерность дает возможность в некоторых случаях значительно сокращать линейные размеры изделия, упрощать его конструкцию и сборку. Возможен полный переход на новые стандарты конструкторской документации (КД) с использованием методов визуализации с применением стандартных 3D-образов [4]. На предприятиях градообразующих предприятий города Королева Московской области и многих других предприятий КД ведется на основе методологии нисходящего проектирования с запуском в производство документов в виде аннотированных трехмерных моделей.

Создание общей сборки происходит параллельно с разработкой комплекта конструкторской документации на изделие, 3D-модели используются как для выявления недостатков конструкции, так и для создания видов на чертежах. Для планирования и организации таких работ служит сквозной график, который реализуется в виде диаграммы Ганта, в табличной форме или с помощью инструментария Workflow в PDM-системе. Контроль выполнения работ и, при необходимости, изменение сроков осуществляется централизованно. Для этих целей, как правило, используется ERP-система.

Возможности трехмерного моделирования также можно использовать для эффективного решения следующих задач, возникающих в процессе разработки промышленной и космической техники: использование трехмерной модели как объекта макетно-конструкторских испытаний при отработке разрабатываемой документации; подготовка исходных данных для расчетов с использованием конечно-элементного моделирования; подготовка исходных данных для разработки интерактивных электронных технических руководств по технологическим процессам отработки и сборки изделия.

Для отработки и сборки сложных изделий проанализируем два подхода:

1) использование аддитивных технологий получения 3D-макетов, распечатанных с помощью 3D-принтера [5], и 3D-образов, полученных с помощью 3D-сканера;

2) использование методов оптимизации параметров моделируемого изделия с помощью передачи данных о геометрии изделия из трехмерной среды в специализированный расчетный пакет [4].

При использовании этих подходов ценным становится не владение деталью (изделием), а его информационной моделью (цифровой информацией), а также возможность воспроизвести эту цифровую информацию либо в виртуаль-

ной среде, либо напечатать с помощью аддитивных технологий. Необходимо определить, какой из описанных подходов является наиболее целесообразным для определения ошибок и технологических несоответствий на этапе проектирования и разработки технологического процесса сборки сложных изделий космической техники.

- 1) Применение аддитивных технологий 3D печати.
- 2) Использование информационных технологий визуализации с применением стандартных 3D-образов.

### Применение аддитивных технологий 3D печати.

С помощью аддитивных технологий 3D-печати осуществляется создание цельных трехмерных объектов практически любой геометрической формы. В основе аддитивных технологий – цифровые технологии, с помощью которых осуществляется цифровое описание изделия и строится компьютерная трехмерная модель. Эти объекты устраняют ограничения «псевдотрехмерного рисунка», созданного с помощью компьютерных технологий трехмерного моделирования. От традиционных методов механообработки изделия аддитивные технологии отличаются тем, что вместо «вычитания» материала из массива заготовки изделия они используют методы: получения изделия «добавлением» (аддитивный метод), прототипированием (метод послойного синтеза), все методы синтеза деталей и конструкций – прототипов, опытных образцов, серийных изделий. Основное предназначение аддитивных технологий: создание прототипа изделия, который можно использовать в качестве опытного образца для отработки изделия на этапе проектирования и оптимизации его параметров.

Статистические данные по применению аддитивных технологий в различных сферах приведены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Области применения и характеристики рынка аддитивных технологий

До возникновения информационных технологий прототипирования устранение ошибок и недочетов при проектировании сложных сборных систем, состоящих из агрегатов и изделий различного назначения, связанных между собой сложной геометрической компоновкой (например, ракетные двигатели и связанные с ними системы, устройства системы управления рециркуляцией, оборудование телекоммуникационных систем) осуществлялось при сборке макетов изделий в металле. Но этот подход может приводить к повторному изготовлению де-

---

талей и сборочных единиц, изменивших свою геометрию в процессе увязки компоновки изделия. Способ замены конструкторских металлических макетов макетами, изготовленными с помощью технологии 3D печати в пластике позволяет сократить затраты на разработку в 10-15 раз и ускорить процесс изготовления макетов [5]. Макет, изготовленный с помощью 3D-принтера в пластике, выполняет те же функции, что и обычный металлический конструкторский макет: проверка собираемости, отработка технологии сборки, поиск ошибок и неточностей в конструкторской документации.

При применении макетов из пластика необходимо учитывать, что модель состоит из различных сборочных единиц (клапаны, регуляторы), элементов силовой схемы (кронштейны, опоры) и крепежа (болты, гайки). Если в модели присутствуют трубопроводы для соединения отдельных узлов и агрегатов, то соединить концевые элементы трубопроводов с ответными элементами трубопроводов с использованием 3D-пластика затруднительно. Лучше заменить их металлическими трубами, но при этом надо уменьшить массогабаритные размеры этих труб (например, толщину трубы) для того, чтобы снизить нагрузку на несущие элементы макета, выполненные из пластика. В связи с трудоемкостью выполнения 3D макетов из пластика крепежа с «прорисованной» резьбой также предпочтительнее использовать металлический крепеж. Это дополнительное время и дополнительные материалы. При прототипировании электропривода невозможно обеспечить нужную плотность укладки обмотки электропривода. Аналогично, создание 3D-образов, полученных с помощью 3D-сканера, не всегда целесообразно применять для изготовления макетов из пластика.

3D-оборудование аддитивных технологий способно работать не только с полимерными материалами, но и с металлами. В таблице 1 [8] приведена классификация методов создания аддитивных технологий. Наиболее динамично развивающимся считается направление исследования промышленных материалов и создания на их основе конструкций сложных геометрических форм. Широко распространен SLM-метод (от англ. Selective laser melting – селективная лазерная плавка): лазер сплавляет металлический порошок из металла в контур будущей детали. Оборудование работает с металлами и производит готовую продукцию за один технологический процесс. При помощи SLM установки был произведен и успешно протестирован инжектор двигателя для ракеты RL-10 [8]. Компактный 3-D принтер компании Made In Space способен создавать детали в условиях невесомости на Международной космической станции.

Преимущества аддитивных технологий: уменьшение времени изготовления деталей (1 месяц вместо 3 месяцев), уменьшение времени сборки (на 5 дней), уменьшение веса напечатанного изделия (приблизительно на 300 г легче традиционной конструкции, что дает почти 1 кг экономии для ряда изделий). Затраты на эксплуатацию изделий и устройств сокращаются, так как напечатанные из порошка титана детали с большей вероятностью сохраняют эксплуатируемое оборудование от возможных сбоев.

**Таблица 1 – Методы создания аддитивных технологий**

Метод	Технология	Принцип создания	Материал	Компания	Цена
Экструзия	Моделирование методом послойного наплавления (Fused deposition modeling (FDM))	Подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков.	Термопластики и композиты, включая ABS, PLA, поликарбонаты, полиамиды, полистирол, лигнин	Stratasys Ltd. (США)	10-300 тыс.\$
Грануляция	Прямое лазерное спекание металлов (Direct metal laser sintering (DMLS))	Подразумевает использование лазера для спекания частиц порошкообразного материала до образования трехмерного физического объекта. Спекание производится за счет вычерчивания контуров, заложенных в цифровой модели. По завершении сканирования рабочая платформа опускается, и наносится новый слой материала. Процесс повторяется до образования полной модели.	1) Порошковые металлы и сплавы, включая нержавеющей сталь, инструментальную сталь, кобальт-хромовые сплавы, титан, алюминий;	EOS GmbH (Германия) Concept Laser GmbH (Германия)	200 тыс.\$ до 1 млн.\$ и более
	Выборочное (селективное) лазерное спекание (Selective laser sintering, SLS))		2) Керамические порошковые сплавы;	3D Systems (США)	75-800 тыс.\$
	Выборочная (селективная) лазерная плавка (Selective laser melting (SLM))		3) Термопластики	SLM Solutions Group AG (Германия)	500 тыс. до 1,5 млн.\$ и более

Структурные компоненты цифровой 3D-технологии когнитивного программирования для воспроизведения сложных пространственных форм приведены на рисунке 2.



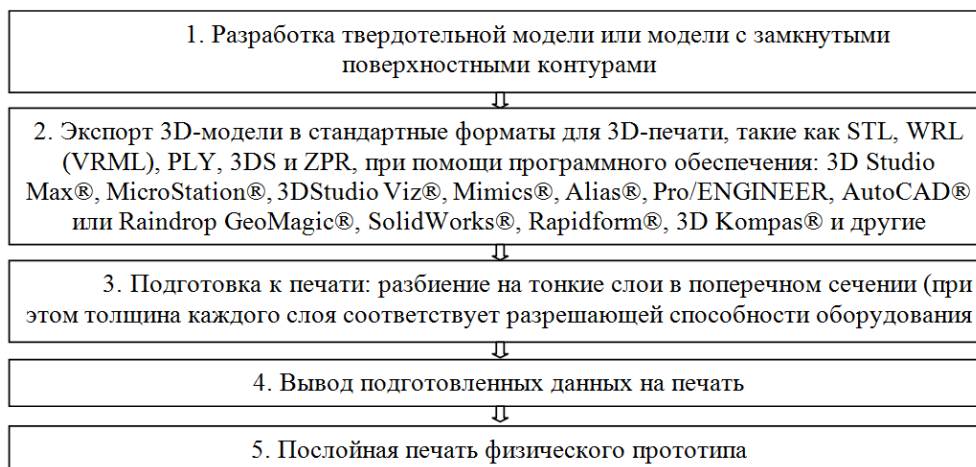
**Рисунок 2 – Концептуальная схема системы когнитивного программирования**

В таблице 2 приведены различные технологии 3D печати и указаны материалы, из которых трехмерная печать позволяет создавать твердотельные объекты: пластик, порошки металла, керамики, фотополимерные и биоматериалы и др.

**Таблица 2 – Сравнительные характеристики технологий 3D печати**

	Лазерная технология печати			Струйная технология печати		
	Стереолито-графия SLA	Лазерное спекание SLS	Ламинирование LOM	Послойное наложение расплавленной нити FDM	Полимеризация под действием УФ MJM, PolyJet, DODJet	Спекание порошка
Фирма-производитель* оборудования	3D Systems	3D Systems	Interltek	Stratasys	3DSystems (MJM) Object Geometries (PolyJet) Solidscape (DODJet)	ZCorporation
Моделирующий материал	фотополимер	Порошок легкосплавного пластика, металла, керамики	Тонкие листы пластика, керамики, металлическая фольга	ABS – термопластик	Фотополимерный пластик различных типов и цветов	Полимерный порошок
Толщина печатного слоя, мм	0,02 – 0,15	0,08 – 0,15	0,168	0,178 – 0,33	Порядка 0,016	0,089 0,203
Скорость печати мм/час	3,5 – 5	10–15 мм/час	—	0,127–0,33 мм/мин	До 20мм в час	2–4 слоя в минуту
Формат входного файла печати	STL, SLC	STL	STL	STL	STL, ODL и SLC	STL, VRML, PLY, 3DS, ZPR
Максимальный объем объекта при печати, мм	650×750×550	550×550×750	160×201×135	914×609×914	500×400×200	203×254×203 254×381×203

Схема прототипирования изделия приведена на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Этапы прототипирования изделия**

Способ замены конструкторских металлических макетов макетами, изготовленными с помощью технологии 3D печати в пластике [5] позволяет сократить затраты на разработку в 10-15 раз и ускорить процесс изготовления макетов. Макет, изготовленный с помощью 3D-принтера в пластике, выполняет те же функции, что и обычный металлический конструкторский макет: проверка собираемости, отработка технологии сборки, поиск ошибок и неточностей в конструкторской документации.

Однако при трехмерном сканировании, в зависимости от возможностей и разрешения 3D сканеров, возникает проблема точного воспроизведения сканируемого прототипа. Необходимо учитывать, что модель состоит из различных сборочных единиц (клапанов, регуляторов), элементов силовой схемы (крон-



---

штейнов, опор) и крепежа (болтов, гаек).

Если в модели присутствуют трубопроводы для соединения отдельных узлов и агрегатов, то соединить концевые элементы трубопроводов с ответными элементами трубопроводов с использованием 3D-пластика затруднительно. Лучше заменить их металлическими трубами, как показано на рисунке 4, но при этом надо уменьшить массогабаритные размеры этих труб (например, толщину трубы) для того, чтобы снизить нагрузку на несущие элементы макета, выполненные из пластика.

В связи с трудоемкостью выполнения 3D моделей крепежа с «прорисованной» резьбой также предпочтительнее использовать металлический крепеж. Это дополнительное время и дополнительные материалы.

Аналогично, создание 3D-образов, полученных с помощью 3D-сканера, приемлемо не для всех устройств и изделий ракетно-космической техники.

Примеры целесообразности применения аддитивных технологий: для достаточно простых автомобильных деталей (шестеренки для регулировки положения сидения, защелки шторки багажника, корпуса для боковых зеркал, крышки омывателей фар на бампере, корпуса фар под модульную оптику и т.д.).

В этом случае нет проблем изготовить макеты с помощью 3D-редакторов SketchUP, Blender, OpenSource.



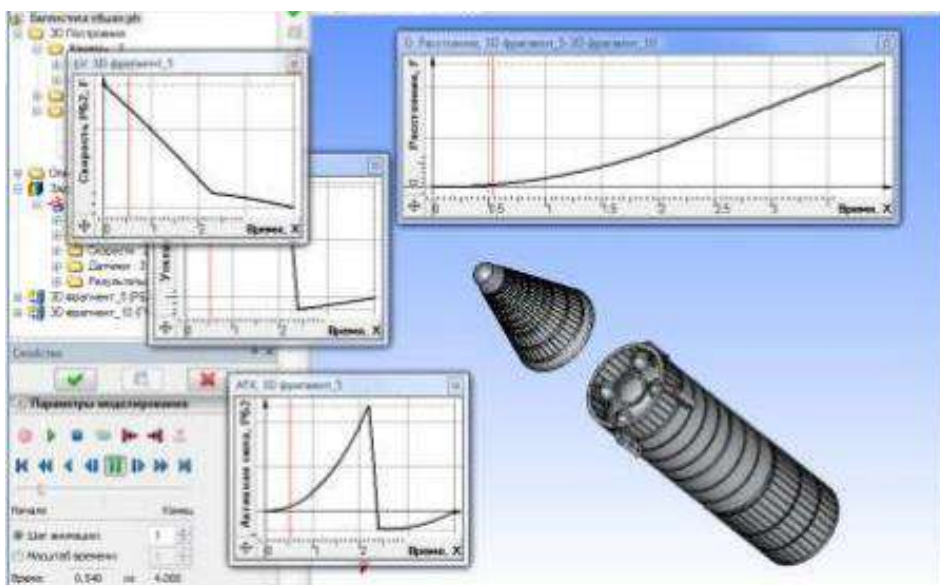
**Рисунок 4 – Пример использования в 3D-макете из пластика металлических трубопроводов и крепежа для соединения отдельных узлов и агрегатов (ФГУП ГКНПЦ им. М. В. Хруничева и КБ химмаш им. А. М. Исаева)**

В настоящее время производители 3D-принтеров работают над возможностью печати одновременно формы и содержания, например, корпуса и электронной «начинки» различных электронных устройств.

**Использование информационных технологий визуализации с применением стандартных 3D-образов.**

При использовании информационных технологий визуализации с применением стандартных 3D-образов точность технологических процессов проектирования, отработки и сборки осуществляется с помощью передачи данных о геометрии изделия из трехмерной среды в специализированный расчетный пакет. Данный метод позволяет не только обнаружить технологические несоответствия на ранней стадии в процессе моделирования, но и улучшить массогабаритные характеристики, рассчитать характеристики моделируемого изделия в соответствии с заданным критерием оптимизации, прогнозировать работу изделия в различных условиях эксплуатации, при различных задающих воздействиях [9...12].

Пример трехмерного моделирования для отработки разделения ступеней баллистической ракеты в среде T-FLEX CAD 3D с использованием приложения «T-FLEX Анализ» для статического и теплового анализа и приложения «T-FLEX Динамика» для динамического анализа процесса разделения ступеней ракет в штатном и нештатном режимах, приведён на рисунке 5.



**Рисунок 5 – Использование трехмерных компьютерных геометрических моделей для расчета параметров при разделении ступеней баллистической ракеты в специализированных программных пакетах**

Трехмерные компьютерные модели можно применять в визуально-наглядной инструкции для описания сборки технологического процесса как для обучающихся, так и для сотрудников производств. Требования конструкторской документации будут написаны в допустимой упрощенной форме. Введение эффектов анимации в трехмерной среде моделирования позволит использовать трехмерные компьютерные модели в качестве исходных данных для разработки интерактивных электронных технических руководств по технологическим процессам отработки и сборки изделия.

#### **Оценка сложности программной реализации 3D моделей.**

Трехмерные модели технических изделий и устройств основаны на математическом описании и программной реализации структур данных моделируе-



мых объектов. Должна быть произведена программная обработка координат вершин треугольников и нормалей, из которых состоит трехмерная модель; а также твердотельных объектов, прямых линий, кривых, точек, информации об иерархических структурах сборочных узлов, количестве треугольников, сборочных узлов, твердотельных объектов, поверхностных объектов, прямых и кривых линий, точек.

Трёхмерная модель состоит из вершин, граней, полигонов, текстуры, карты нормалей, изображенных на рисунке 6.

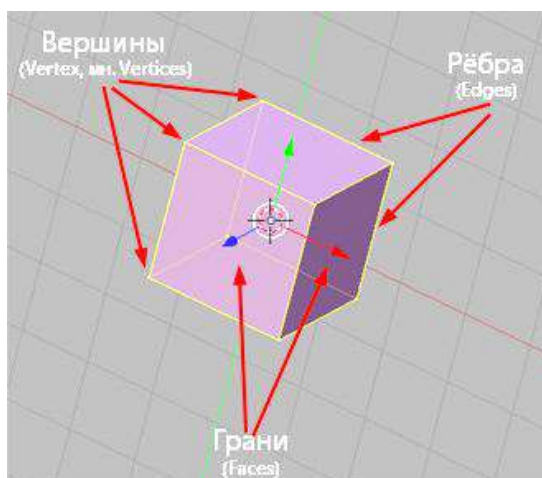


Рисунок 6 – Структура 3D-модели

Состав 3D модели, основанный на том, что любую сложную фигуру или поверхность можно представить как множество простых фигур (поверхностей), описан в таблице 3.

Таблица 3 – Состав 3D модели

№ п/п	Простые фигуры
1.	Вершина (ед. Vertex, мн. Vertices) – это абстрактная геометрическая точка с координатами X, Y и Z. Вершиной она называется потому, что является крайней точкой либо замкнутого полигона (плоского многоугольника), либо объёмной фигуры.
2.	Грань (Edge) – отрезок прямой, соединяющий две вершины, в трёхмерной графике является ограничителем для полигонов.
3.	Полигон (poly, polygon) – основная функциональная составляющая: плоская многоугольная фигура (обычно трёхмерные редакторы и другие приложения предпочитают оперировать только треугольниками и четырёхугольниками), из множества которых состоит поверхности трёхмерной фигуры.
4.	Текстура – изображение, покрывающее поверхность трёхмерной фигуры, используется для придания трёхмерной фигуре материальной достоверности.
5.	Нормаль – вектор, перпендикулярный поверхности в каждой данной её точке.
6.	Карта нормалей – это определённого рода текстура, цветовая информация которой (то есть, цвет каждого пикселя) считается как информация о расположении нормали каждой точке того или иного объекта; с помощью карты нормали можно сформировать иллюзию более сложной поверхности, чем она есть на самом деле.

---

Аналитические соотношения для теоретической оценки сложности программной реализации 3D-моделей

$$P_{stl} = \sum_{j=1}^J (S w_j^V(x, y, z) + w_j^N(N_{x,y,z})); \quad (1)$$

$$P_{step} = \sum_{i=1}^I \left( \sum_{h=1}^H w_{hi}^{sol} + \sum_{k=1}^K w_{ki}^{surf} + \sum_{l=1}^L w_{li}^{line} + \sum_{m=1}^M w_{mi}^{curve} + \sum_{n=1}^N w_{mi}^{point} + w_i^{AsH} \right) \quad (2)$$

где  $w_j^V(x, y, z)$ ,  $w_j^N(N_{x,y,z})$  – затраты на хранение в памяти и программную обработку координат вершин треугольников и нормалей;  $w_{hi}^{sol}$ ,  $w_{ki}^{surf}$ ,  $w_{li}^{line}$ ,  $w_{mi}^{curve}$ ,  $w_{mi}^{point}$ ,  $w_i^{AsH}$  – затраты на хранение в памяти и программную обработку твердотельных объектов, прямых линий, кривых, точек, информации об иерархических структурах сборочных узлов;  $J$  – количество треугольников в модели;  $I$  – количество сборочных узлов;  $H$  – количество твердотельных объектов;  $K$  – количество поверхностных объектов;  $L$  – количество прямых линий;  $M$  – количество кривых линий;  $N$  – количество точек.

Адекватность модели можно проверить с помощью тестирования.

Проведенные исследования [11,15] показали, что комплексное применение информационных технологий трехмерного моделирования и аддитивных технологий позволяет сократить срок разработки изделия (устройства) по сравнению с традиционными методами организации технологического процесса сборки и обработки, более чем на 40%. Количество изменений, вносимых при обработке и сборке на разных стадиях проектирования изделий (устройств) по причине технологических несоответствий и недостатков конструкции, снижается в 2 – 2,5 раза.

#### **Выводы.**

Аддитивные технологии на современном этапе развития не позволяют создать на 3D-принтере (3D-сканере) прототипы сложных технических изделий (устройств, материалов), в составе которых имеются резьбовые соединения, трубопроводы малого сечения, электрические обмотки. Аддитивные технологии с использованием пластиков нецелесообразно использовать для изготовления штатных и летных изделий в силу малых конструкционных свойств пластиков, но возможно их применение для опытно-конструкторских разработок новейших образцов изделий (устройств, материалов) ракетно-космической техники. Обработку и сборку технических устройств, включающих сложные резьбовые соединения, электроприводы, магнитопроводы, целесообразно проводить в виртуальной трехмерной среде, с использованием специализированных расчетных пакетов, так как в этом случае будут осуществлены все требования по точности геометрических размеров, и можно будет прогнозировать их работу в различных условиях эксплуатации. Комплексное применение информационных технологий трехмерного моделирования и аддитивных технологий позволяет сократить срок разработки изделия (устройства) по сравнению с традиционными методами организации технологического процесса сборки и обработки, более чем на 40%.

---

### *Литература*

1. Аббасов, А. Э. Расчёт параметров клапана системы рециркуляции в программной среде Maxwell 14.0 / А. Э. Аббасов // Информационно-технологический Вестник. – №2(02). – 2014. – С. 3 – 9.
2. Аббасов, А. Э. Совершенствование технологического процесса обработки и сборки приборов и устройств ракетно-космической техники: сб. тр. по материалам Отраслевой научно-технической конференции приборостроительных организаций Роскосмоса «Информационно-управляющие и измерительные системы – 2015». – 26-27.03.2015 – Королев МО.
3. Александров, В. В. DIGITAL AVATAR – Цифровое воплощение инфокоммуникационных систем / В. В. Александров, В. А. Сарычев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – №7. – т.8. – 2010. – С. 3–10.
4. Александров, В. В. Цифровая технология 3D промышленного производства / В. В. Александров, В. В. Александрова, А. А. Зайцева, С. П. Хурс // Труды СПИИРАН. – 2010. – Вып. 4(15). – С. 85–92.
5. Артюшенко, В. М. Комплекс полунатурного моделирования систем автоматического управления летательных аппаратов и ракетно-космической техники / В. М. Артюшенко, Н. А. Васильев, Т. С. Аббасова // Сб. тр. Международной научно-практической Интернет-конференции «Современные образовательные технологии, используемые в очном, заочном и дополнительном образовании»: Финансово-Технологическая Академия. – Королев: ФТА. – 2013.
6. Артюшенко, В. М. Сервис информационных систем при аварийном планировании / В. М. Артюшенко, Т. С. Аббасова // Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса. – 2010. – №4. – С. 68-74.
7. Артюшенко, В. М. Условия эффективного применения виртуальных лабораторий для инженерного образования: сб. тр. по материалам II-ой международной научно-практической Интернет-конференции «Инновационные технологии в современном образовании» 19.12.2014 / В. М. Артюшенко, Т. С. Аббасова, А. Э. Аббасов // Королев МО, Финансово-технологическая академия, ФТА: Изд-во «Алькор Паблицерс». – 2015. – С. 12 – 19 (456 с.) – ISBN 978-5-906099-85-3.
8. Вокин, Г. Г. Космические услуги: особенности инфраструктурного обеспечения и потребления / Г. Г. Вокин, Л. Г. Азаренко // Сервис в России и за рубежом, № 4(23) – 2011.
9. Данилова, А. Д. Научные исследования на базовой кафедре Финансово-технологической академии / А. Д. Данилова, Т.С. Аббасова // сборник материалов Международной научно-практической конференции 24-25 апреля 2014 г. «Перспективы, организационные формы эффективность развития сотрудничества российских и зарубежных ВУЗов»: Королев МО: Финансово-технологическая академия, ФТА, Изд-во «Канцлер». – 2014. – С. 342 – 350 (512 с.) – ISBN 978-5-91730-388-8.
10. Панченко, В. А. Применение аддитивных технологий при проектировании изделий и блоков для ракетно-космических систем: тезисы докладов XX-ой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов – Россия / г. Королев, Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королева. – 10-14.11.2014. – С. 400 – 402 (707 с.).

- 
11. Чумаков, Д. М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники / Д. М. Чумаков // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 78. – 02 декабря 2014. – Режим доступа: [www.mai.ru/science/trudy](http://www.mai.ru/science/trudy).
  12. Voppana, V. Chowdary, Divesh R. Sahatoo, Raj Bhatti. Some STL File Generation Issues in Rapid Prototyping // Fifth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2007) – Developing Entrepreneurial Engineers for the Sustainable Growth of Latin America and the Caribbean: Education, Innovation, Technology and Practice, 29 May – 1 June 2007. – Tampico, México.

## **Оценка качества программного обеспечения для современных систем обработки информации**

**А.Э. Аббасов**, аспирант,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область,  
**Т.Э. Аббасов**, студент,  
Московский государственный технический университет им. Баумана,  
МГТУ им. Баумана, г. Москва

*Проанализированы условия интенсивного развития программного обеспечения; выявлены проблемы оценки показателей качества программного обеспечения для систем обработки информации; методическую поддержку оценки качества программного обеспечения предлагается осуществлять с помощью единого информационного ресурса в виде сайта с понятным для каждого пользователя интерфейсом; даны рекомендации по отбору моделей и методов оценки качества ПО, интеграции разнородной метрической информации.*

Метрики программного обеспечения, юзабилити-оценка, ментальные модели, модели реализации, модели представления.

## **Quality evaluation software for modern information processing systems**

**A.E. Abbasov**, a graduate student,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,  
**T.E. Abbasov**, a student of Moscow State Technical University, Bauman,  
MSTU Bauman, Moscow

*The conditions of intensive development of software; identified problems quality assessment software for information processing systems; methodological support to assess the quality of the software is offered to carry out with the help of a single information resource in the form of a site with a clear interface for every user; recommendations for the selection of models and methods for assessing the quality of the software, the integration of heterogeneous metric information.*

Software metrics, usability evaluation, mental models, implementation models, presentation models.

В условиях интенсивного развития программного обеспечения (ПО) пользователь поставлен в затруднительное положение, обусловленное сложностью выбора эффективного ПО для решения поставленных задач обработки информации. Он вынужден вести длительный поиск необходимого программного продукта, оценивая стоимость внедрения и его качество. Часто у него отсутст-

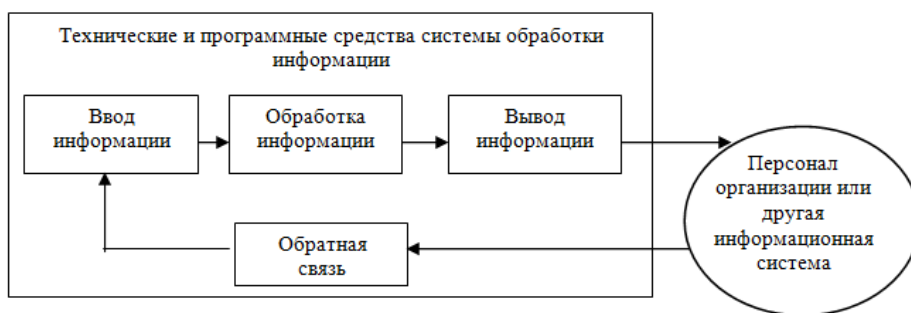
вуют четкие представления о способах оценки качества новых программных продуктов, он располагает только рекламной информацией.

В работах [1...5] представлен обзор метрик ПО (метрики размера программ, сложности потока управления программ, стилистики и понятности программ, оценки сложности на этапе проектирования тестируемого ПО, объектно-ориентированные метрики для проектирования архитектуры ПО и др.). Основное предназначение метрик – определить сложность тестирования и определить время на затраты проектирования ПО, но не соотношение цена/качество и удобство пользовательского интерфейса, которые интересуют пользователя. С точки зрения пользователей, особенно начинающих, даже несложные измерения качества ПО с помощью метрик вызывают затруднения. Эти измерения доступны и понятны только разработчикам и тестировщикам, при этом метрики не учитывают опыт сотрудников, процесс измерения может быть искажен, разработчики могут подгонять под заданные показатели свои программы [1].

Стремление сделать метрики универсальными, игнорирование области применения разрабатываемого ПО и этапов его жизненного цикла, необоснованное использование ПО в разноплановых процедурах принятия производственных решений делает актуальным разработку доступных для понимания рядовому пользователю моделей и методов оценки ПО.

Проблемы оценки показателей качества ПО систем обработки информации.

Системы обработки информации (СОИ) – совокупность технических средств и программного обеспечения, а также методов обработки информации и действий персонала, обеспечивающая выполнение автоматизированной обработки информации. Структурная схема СОИ приведена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Процессы в системе обработки информации**

Качество программных средств зависит от качества технических средств. Человечество накопило большой опыт в вопросах обеспечения надежности технических средств и систем. При этом чаще всего используются два основных пути обеспечения надежности средств и систем – повышение надежности элементов, из которых делается система (средство, механизм), и использование избыточности. Например, чтобы самолеты могли садиться независимо от направления ветра, делаются две взаимно перпендикулярные взлетно-посадочные полосы, чтобы неисправности двигателей не приводили к авариям, ставятся четыре двигателя, хотя самолет может лететь и при двух работающих двигателях. В случае



---

часового механизма используется в основном первый путь: качество шестерен тщательно контролируется, спираль подвергается специальной термической обработке, в качестве подшипников используются рубиновые зерна и т.д. Естественно, что в такой сложной технической системе, как сеть персональных компьютеров, используются оба пути повышения надежности.

Однако персональный компьютер (ПК), который является основным элементом СОИ, имеет в своем составе ПО. Если ПК отказывает, то сразу же возникает альтернатива: что работает неправильно – собственно компьютер (аппаратные средства) или программа. Детали, из которых состоит программа, – команды машинного языка – не знают «усталости» и старения. В данном случае неконтролируемым фактором являются входные данные. Эти данные привели вычислительную систему в такое состояние, в которое она не должна была попасть или которое не было предусмотрено при создании программы.

Таким образом, программа отказывает только по одной причине: допущены ошибки при ее разработке. Поэтому эпитет «надежная» по отношению к программе должен быть дополнен эпитетами «правильная» или «корректная».

Надежность ПО определяется как вероятность его работы без отказов в течение определённого периода времени, рассчитанная с учётом стоимости для пользователя каждого отказа.

Правильность программы означает существенное качество программы, которое определяется не внешними неконтролируемыми факторами, а следующими двумя причинами:

- а) недостатками нашего собственного мышления;
- б) фактором общения друг с другом, поскольку чаще всего программа является результатом труда нескольких людей.

В отношении программы для научных расчетов по заданным формулам критерии правильности программы у пользователя и программиста одинаковы – программа должна на языке машины отображать заданные соотношения. В более сложных задачах, таких как СОИ, информационно-справочные системы, задачи искусственного интеллекта и др., довольно часто оказывается, что заказчик (пользователь) имел в виду нечто иное, чем разработчики программы. Вот почему большое значение имеют технические условия и внешние спецификации на математическое обеспечение. Многие вещи, очевидные для заказчика, не являются таковыми для программиста. Поэтому правильная с точки зрения программиста программа может оказаться неправильной с точки зрения пользователя.

Несмотря на то, что программы могут быть только «правильными» или «неправильными», существует целый ряд причин, по которым следует оценивать их надежность. Прежде всего, в настоящее время нет достаточно эффективных средств и методов, позволяющих создавать совершенно «правильные» программы или устанавливать их правильность. Если программа «неправильна», то это еще не значит, что она не пригодна к использованию. Например, если информационно-справочная система на запрос о дате прибытия судна в порт печатает

13ИЮНЯ

вместо

*13 ИЮНЯ,*

то такую систему можно считать вполне работоспособной.

---

С другой стороны, если при составлении расписания рейсов не учитывается 29 февраля, то такая программа неработоспособна, хотя каждые три года из четырех она будет вполне надежна.

Правильность является более узким понятием, чем надежность, поскольку она гарантирует нормальную работу программы в четко очерченных условиях внешней среды, например при заранее оговоренных интервалах входных данных. Поскольку современные СОИ имеют практически бесконечное множество состояний как внутренних, так и входных, то фактически невозможно установить правильность подобных систем. Для этих систем весьма важное значение приобретает свойство устойчивости программы.

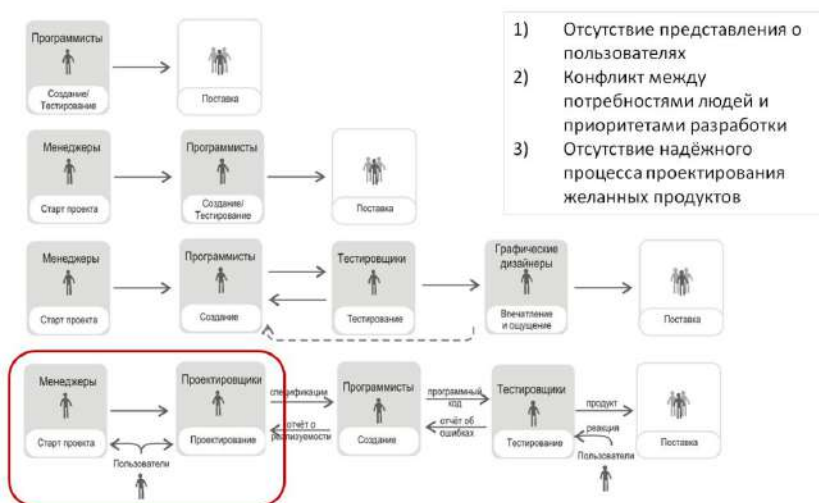
Программа является устойчивой, если вычислительная система, реализующая ее, функционирует успешно, несмотря на случайные отклонения как во внешних условиях (например, неправильные входные данные), так и внутри нее самой (например, отказ одного из дисководов).

Термин «устойчивость», следовательно, аналогичен термину «нечувствительность» к отказам или сбоям. Устойчивость программы предполагает, что она не создает аварийных ситуаций при определенном виде отказах оборудования системы, плохих входных данных, неправильном применении и возможно даже ошибках в ней самой – во всех тех ситуациях, которые плохо поддаются точному учету при составлении функциональных спецификаций на систему обработки информации. Необходимо предусмотреть меры для устранения этих опасных ситуаций. Прежде всего, это возможность автоматического выбора альтернативного варианта при возникновении или обнаружении отказа. Например, если программа убеждается в неисправности принтера А, то она осуществляет выдачу данных на принтер В, или просто информирует пользователя о замеченной неисправности. Устойчивость всегда предполагает блокирование распространения возникшей в какой-либо части системы ошибки и, если возможно, восстановление нормального хода вычислительного процесса.

Пользователь СОИ воспринимает ее через интерфейс, так как только посредством интерфейса конечный пользователь может судить о качестве и функциональности программного продукта. Уровень удобства и комфорта интерфейса становится важным фактором конкурентоспособности программного продукта. Но как определить, что один программный продукт «удобней», чем другой, и на сколько?

Для осуществления требований работы СОИ в режиме реального времени, при котором обеспечивается взаимодействие СОИ с внешними по отношению к ней процессами в темпе, соизмеримом со скоростью протекания этих процессов, важна оценка жизненного цикла ПО и непрерывности информационной поддержки.

На рисунке 2 показана схема усложняющихся процессов разработки ПО и увеличения количества специалистов, участвующих в его разработке. Интенсивное развитие ПО порождает конфликты между потребностями людей и приоритетами разработки. Возникает вопрос о целесообразности приобретения новой версии программного продукта или замены одного программного продукта на другой.



**Рисунок 2 – Эволюция процесса разработки ПО**

Возникает необходимость формализовать процесс проектирования и оценки качества ПО. Однако не все показатели качества ПО можно формализовать и представить с помощью формального математического языка (например, с помощью метрик), так как процесс проектирования ПО относится к творческим процессам. В этом случае для таких показателей процесс формализации происходит на уровне методологии (совокупности методов, способов и стратегий проектирования и оценки ПО) [6]. Оценка качества ПО должны проводиться как в процессе проектирования, так и на всех фазах жизненного цикла, и включать выбор номенклатуры показателей, их оценку и сопоставление значений показателей, полученных в результате сравнения, с базовыми значениями.

Выбор номенклатуры показателей, их оценка и сопоставление значений с базовыми значениями

Иерархическая структура комплексных показателей качества программного обеспечения (с соответствующей нумерацией) представлена в таблице 1. Вариант оценки значимости коэффициентов приводится в качестве примера. Дальнейшая детализация комплексных показателей зависит от приложения, оцениваемого элемента конфигурации и задач оценки. Типовой вариант детализации в методике приводится в таблицах оценочных элементов по показателям качества.

Как видно из таблицы 1, все метрики должны иметь одну и ту же область значений, соответствующую выбранной шкале:  $[0, 1 \div 1]$  или  $[0, 1 \div 10]$ .

Однако оценка с помощью метрик недостаточна по причинам, проанализированным ранее в статье, необходим системный подход к проблеме оценки качества ППО. Системный подход включает разработку дополнительных процедур и критериев оценки в зависимости от назначения ПО, нахождение аналитических зависимостей для вычисления обобщенного показателя качества ПО, вычисление весовых коэффициентов значимости каждого критерия качества, входящего в обобщенный показатель качества [7,8].

Оценка качества ПО с точки зрения интерфейса пользователя.

Сегодня при разработке ПО все активнее применяется юзабилити-оценка, которая в таблице 1 представлена как понятность, обучаемость, простота использования, привлекательность, согласованность. В настоящее время английское слово «usability» не переводится, а так и используется в речи и текстах. В последние два десятка лет было предложено множество определений понятия юзабилити, однако консенсус в отношении концепции юзабилити достигнут так и не был. По мере развития программных продуктов, появления графических программ N-мерного моделирования модели и методы оценки юзабилити совершенствуются.

Предлагаемая модель интеграции юзабилити-оценки в процесс разработки программного продукта представлена на рисунке 3. График проведения юзабилити-оценки: на протяжении всего цикла разработки программного продукта. Сначала проводится тестирование предыдущей версии или конкурирующих программных продуктов, и определяются цели, которые необходимо достигнуть в процессе разработки. Разработка продукта – процесс итерационный, с помощью обратной связи оцениваются необходимые корректировки, которые необходимо внести. Подтверждение соответствия программного продукта заданным целям должно произойти на заключительном этапе.

**Таблица 1 – Типовая структура показателей качества ПО**

Код	Показатель	Значимость
1	<b>Функциональные возможности (Functionality)</b>	0,3
1.1	Пригодность (Suitability)	0,3
1.2	Правильность (Accuracy)	0,2
1.3	Способность к взаимодействию (Interoperability)	0,1
1.5	Защищенность (Security)	0,2
1.4	Согласованность (Compliance)	0,2
2	<b>Надежность (Reliability)</b>	0,3
2.1	Завершенность (Maturity)	0,4
2.2	Устойчивость к ошибкам (Fault tolerance)	0,3
2.3	Восстанавливаемость (Recoverability)	0,2
2.4	Согласованность (Compliance)	0,1
3	<b>Практичность (Usability)</b>	0,1
3.1	Понятность (Understandability)	0,2
3.2	Обучаемость (Lernability)	0,2
3.3	Простота использования (Operability)	0,3
3.4	Привлекательность (Attractiveness)	0,2
3.5	Согласованность (Compliance)	0,1
4	<b>Эффективность (Efficiency)</b>	0,1
4.1	Временная эффективность (Time behavior)	0,5
4.2	Ресурсоемкость (Resource behavior)	0,3
4.3	Согласованность (Compliance)	0,2
5	<b>Сопровождаемость (Maintainability)</b>	0,1
5.1	Анализируемость (Analysability)	0,2
5.2	Изменяемость (Changeability)	0,2
5.3	Стабильность (Stability)	0,2
5.4	Тестируемость (Testability)	0,3
5.5	Согласованность (Compliance)	0,1
6	<b>Мобильность (Portability)</b>	0,1
6.1	Адаптируемость (Adaptability)	0,2
6.2	Простота установки (Installability)	0,3
6.3	Сосуществование (Co-existence)	0,2
6.4	Взаимозаменяемость (Replaceability)	0,2
6.5	Согласованность (Compliance)	0,1



**Рисунок 3 – Модель юзабилити-оценки**

При использовании модели, приведенной на рисунке 3, для оценки прототипов необходимо учитывать, что эти программные продукты задействуют только часть действий по разработке пользовательского интерфейса. Необходима систематическая оценка, основанная на других альтернативных продуктах разработки: персоны, сценарии и варианты, которые дают более полное и широкое взаимодействие оценки и дизайна [9].

При постановке задачи все процессы оценки должны быть сфокусированы на тех вопросах, на которые хочет получить ответы разработчик ПО. При разработке тестовых вопросов необходимо связать это действие с моделями и текущими выпусками, задействованными в процессе разработки, относительно типичных задач типичных пользователей, то есть ответы на тестовые вопросы должен уметь дать и рядовой пользователь. Тестовые вопросы приводятся не только в инструкции по оценке юзабилити разработчиками, но и на общем информационном ресурсе (сайте), доступном для пользователей для оценки ПО.

Отклики в виде списков, содержащих проблемы юзабилити, нужны для сравнения разработчиками методов юзабилити-оценки. На этом этапе выявляется соответствие потенциальных проблем, которые не всегда являются действительными проблемами юзабилити, реальным проблемам. Например, при определении весового коэффициента проблемам в зависимости от их типа сложности таким проблема, как универсальность и понятность присваивается равный вес при подсчете.

Задача генерации рекомендаций и приоритетов для управления разработкой отличается от задачи оценки ответной реакции тем, что продукты оценки могут не содержать никаких указаний на то, что устранить обнаруженные проблемы или последовательность устранения проблем в зависимости от важности каждой из них. Сегодня вопрос установления приоритетов среди проблем юзабилити в научных исследованиях мало раскрыт. На практике процесс анализа проблем для формирования рекомендаций, проведенный по результатам составленных юзабилити-тестов, показывает, что обычно рекомендации формируются для конкретного случая использования программного продукта без применения подробно разработанной процедуры или метода. Задача юзабилити-оценки – присвоить интерфейсу максимально высокие потребительские свойства для

---

достижения успешного человеко-компьютерного взаимодействия. Тщательный отбор моделей и методов оценки, установление приоритетов и рекомендаций является важным не только для оценки юзабилити, но и в целом качества ПО.

Существует два основных подхода к организации взаимодействия между процедурой юзабилити-оценки и разработкой пользовательского интерфейса.

Первый подход основан на разделении. Главная идея этого подхода состоит в том, что оценка и разработка производятся отдельно друг от друга разными группами людей. В данном подходе разделяются дизайнеры интерфейса, которые являются частью команды разработки. Эта часть команды создает и внедряет программный продукт. Оценщики юзабилити (другая часть команды) проводят оценку и предоставляют результаты и рекомендации, которые уже используются разработчиками.

Второй подход основывается на интеграции. Процессы юзабилити-оценки и разработки пользовательского интерфейса производятся интегрировано в одном и том же процессе и одной и той же командой. Данный подход предназначен для использования дизайнерами и разработчиками, которые проводят оценочные мероприятия в ходе выполнения своей работы. Проблема недостаточного взаимодействия между оценкой юзабилити и разработкой пользовательского интерфейса очевидна – это следует как из научной литературы, так и из примеров и опытов практической разработки программного обеспечения.

При определении процедур и методов для оценки юзабилити с точки зрения тех атрибутов (качеств), которые лежат в основе СОИ, для которой предназначено ПО, необходимо проанализировать ментальные модели, модели реализации и представления, представленные на рисунке 4. Ментальные модели основаны на предыдущем опыте идеи, стратегии, они обозначают способы понимания, существующие в уме человека, и отражает видение программы пользователем. К этому «видению» и должен стремиться разработчик. Модели представления отображают экранное представление возможностей программного продукта, осуществляют соединение с источниками данных, описывают необходимый интерфейс с другими компонентами архитектуры СОИ. Модель реализации отражает технологию разработки программного продукта. В данном случае большое влияние оказывает качество технического обеспечения СОИ и его энергетические характеристики – энергопотребление процессором, памятью, программным обеспечением по отношению к количеству выполненных инструкций операций доступа к памяти данных и памяти команд [4,5], а также количественные характеристики скорости выполнения определённых операций на компьютере (других средствах вычислительной техники). Например, для офисных программ (Word, Excel) требуется меньшие вычислительные мощности, для графических программ (SolidWorks, Kompas-3D, Adobe Photoshop) – большие вычислительные мощности. Одной из тенденций развития человеко-машинного интерфейса СОИ является визуализация данных. Визуальный интерфейс должен использоваться для систем поддержки принятия решений. Широко используются программы трехмерного моделирования для визуализации данных, которые также требуют больших вычислительных ресурсов, и при их недостатке будут некорректно работать.



## Ментальные модели, модели реализации и представления



Рисунок 4 – Модели при оценке юзабилити ПО

Модель реализации, как видно из рисунка 4, наиболее далека от ментальной модели пользователя. Многие программы следуют модели реализации, хотя они должны быть приближены к модели пользователя. При этом необходимо учитывать, что «видение» одного пользователя может сильно отличаться от «видения» другого пользователя, поэтому необходимо представить как можно больше возможностей для отображения «видений» всех пользователей. Например, в программе Adobe Photoshop в диалоговом режиме можно выбрать любую замену цвета для фотографии, сделать ее черно-белой. Цвет будет выбран в зависимости от характера фотографии самим пользователем. Для изображения, приведенного на рисунке 5, пользователь выберет мрачные тона.



Рисунок 5 – Пример обработки изображения в программе Adobe Photoshop

С развитием программ N-мерного моделирования актуально оценивать с точки зрения пользователя [10,11]:

- 1) интерфейс программы при трехмерной визуализации элементов (3D проектирование);
- 2) интерфейс отображения календарно-сетевых графиков проекта внедрения (4D проектирование);
- 3) интерфейс визуализации стоимостных показателей, характеризующих затраты на внедрение проекта (5D проектирование);

4) интерфейс визуализации средств мониторинга и анализа программного и технического обеспечения проекта (6D проектирование).

Приведем примеры нового свойства юзабилити – визуализации результатов расчетов. На рисунке 6 а приведен пример построения схемы распространения магнитной индукции в магнитной системе электропривода в среде Maxwell [12]. Схема служит для того, чтобы проанализировать, корректно ли собрана модель, для правильности дальнейших расчётов и построения управляющих зависимостей [13,14]. Интерфейс программы позволяет определить величину плотности магнитной индукции (выраженной в Тесла) с помощью визуализации цветовой маркировкой.

На рисунке 6 б приведен пример программного приложения, созданного пользователем самостоятельно в среде WPF (от англ. Windows Presentation Foundation – фундамент презентаций Windows). С помощью созданного приложения можно рассчитать сопротивление и допуск сопротивления резисторов с цветной маркировкой в виде 4 и 5 колец. Интерфейс программы также ориентирован на цветовую маркировку.

При разработке программных продуктов крупными компаниями и отдельными пользователями обычно ставится задача сокращения времени разработки для ускорения выхода продукта на рынок. Сокращение времени не должно производиться в ущерб времени, отведенного на юзабилити-оценку и оценку других метрик ПО, несмотря на сложность интеграции этих оценок во все точки процесса разработки.

Разработка сайта для оценки ПО.

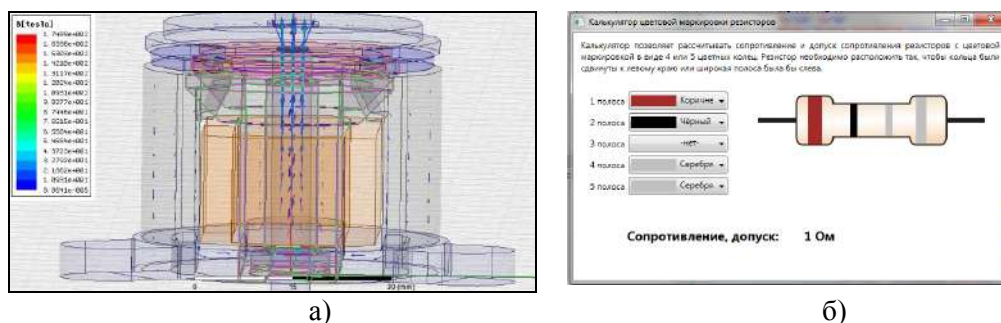


Рисунок 6 – Определение интерфейсом программы количественных характеристик с помощью цветовой маркировки: а) в среде Maxwell; б) в среде WPF

Как было показано выше, для оценки качества ПО необходим общий информационный ресурс (сайт), доступный для всех пользователей. Разработано большое количество информационных систем для оценки качества ПО, но они сложны в использовании, ориентированы в основном на разработчиков, имеют большую стоимость.

Также встает вопрос о юзабилити самого сайта. Для создания разработки удобного пользовательского интерфейса сайта рекомендуется технология декларативного программирования при помощи языка XAML (от англ. eXtensible Application Markup Language – расширяемый язык разметки приложений) на основе WPF. Кнопки вывода на экран тестов для оценки юзабилити являются эле-

---

ментами управления и задаются с помощью различных цветов, кистей, градиентных заливок. Для создания пользовательских кнопок и графических примитивов служат несложные команды

```
<Button>
    <Image Source="myphoto.jpg">
</Button>
<Canvas                                xmlns                                =
"http://schemas.microsoft.com/2003/xaml">
    <Line X1 = "0" Y1 = "0" X2 = "100" Y2 = "200"
Stroke = "red" />
</Canvas>
```

При создании тестов используется код языка разметки гипертекста HTML, создающий флажки для выбора одного или нескольких вариантов. Например:

```
Какие из сервисов Интернета вы используете наиболее
часто:<BR>
<INPUT TYPE="checkbox" NAME="group" VALUE="www">
WWW <BR>
<INPUT TYPE="checkbox" NAME="group" VALUE="e-
mail">
e-mail <BR>
<INPUT TYPE="checkbox" NAME="group" VALUE="ftp">
FTP <BR>
```

Язык разметки гипертекста HTML конвертируется в XAML.

Тестовые вопросы для пользователей ПО могут включать предоставление следующих сведений:

- технические характеристики вычислительных средств СООИ;
- программно-аппаратная конфигурация их персонального компьютера;
- требования к быстродействию ПО;
- возможность визуализации расчетных данных;
- возможность дальнейшей работы с данными после их визуализации;
- стоимость ПО, доступная пользователю;
- предполагаемые производители ПО.

По результатам ответов пользователя на тесты и указанного ценового диапазона выдаются рекомендации по выбору ПО. Пользователь также может оценить уже установленные на его компьютере программные продукты с помощью загрузки примитивов программы на сайт. Будут проведены расчеты метрик по результатам анализа загруженных данных, расчет топологической и информационной сложности программы, визуализация полученных числовых оценок на экране. Для пользователей сайта, ранее не сталкивавшихся с метриками и проблемами оценки качества ПО, необходимо ввести раздел информирования, в котором представлены все метрики, краткое их описание, а также формулы и их применение.

Выводы.

Методическая поддержка для оценки качества ПО должна быть доступна для всех пользователей и разработчиков. Методическую поддержку предлагается

---

осуществлять с помощью единого информационного ресурса в виде сайта с понятным для каждого пользователя интерфейсом. Даны рекомендации по отбору моделей и методов оценки качества ПО, интеграции разнородной метрической информации.

*Литература*

1. Вареница, В. В. Проблемы вычисления метрик сложности программного обеспечения при проведении аудита безопасности кода методом ручного рецензирования / В. В. Вареница // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2011. – № СПЕС. – С. 79-84.
2. Романов, В. Ю. Анализ объектно-ориентированных метрик для проектирования архитектуры программного обеспечения / В. Ю. Романов // International Journal of Open Information Technologies. – 2014. – Т. 2. № 3. – С. 11-17.
3. Романов, В. Ю. Визуализация программных метрик при описании архитектуры программного обеспечения / В. Ю. Романов // International Journal of Open Information Technologies. – 2014. – Т. 2. № 2. – С. 21-28.
4. Юрченко, А. В. Проектирование и анализ программного обеспечения с низким энергопотреблением с помощью программных метрик энергоэффективности / А. В. Юрченко // Электронное издание «Наука и образование». ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н. Э. Баумана». Эл № ФС 77 – 48211. – 2013 – № 1.
5. Мищенко, В. О. Энергетический анализ программного обеспечения с примерами Ада-программ / В. О. Мищенко // Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина. – 2007. – 119 с.
6. Нуриев, Н. К. Формализация проектирования программного обеспечения и ее использование в учебном процессе / Н. К. Нуриев // Образовательные технологии и общество. – 2002. – Том 5. № 4. – С. 189 – 213.
7. Артюшенко, В. М. Современные исследования в области теоретических основ информатики, системного анализа, управления и обработки информации / В. М. Артюшенко, Т. С. Аббасова, И. М. Белюченко, Н. А. Васильев, В. Н. Зиновьев, Ю. В. Стреналюк, Г. Г. Вокин, К. Л. Самаров, М. Е. Ставровский, С. П. Посеренин, И. М. Разумовский, В. Ю. Фоминский. Монография / под науч. ред. док. техн. наук, проф. В. М. Артюшенко. – Королев. – ГБОУ ВПО ФТА. – 2014. – 174 с.
8. Артюшенко, В. М. Системный анализ в области управления и обработки информации: монография / В. М. Артюшенко, Т. С. Аббасова, И. М. Белюченко и др. – Королев: Изд-во ГБОУ ВО МО «ТУ». – 2015. – 168 с.
9. Мишина, А. В. Тенденции развития юзабилити-оценки для повышения качества программного обеспечения / А. В. Мишина // «Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия»: Материалы IV международной научной конференции 1-2 сентября. – North Charleston. – SC, USA: CreateSpace. – 2014. – С. 11 – 17.
10. Аббасова, Т. С. Подходы к моделированию и проектированию телекоммуникационных сетей на основе N-мерных технологий / Т. С. Аббасова // Информационно-технологический Вестник. – №2(04). – 2015. – С. 39 – 54.

- 
11. Аббасова, Т. С. Информационное и программное обеспечение для тестирования производительности сетевых узлов территориально-распределенных центров обработки данных / Т. С. Аббасова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2010. – Т. 6. – № 3. – С. 10-13.
  12. Аббасов, А. Э. Конвертирование трехмерных компьютерных геометрических моделей для оптимизации параметров моделируемых устройств / А. Э. Аббасов // Компьютерные исследования и моделирование. – Том 7. – № 1. – 2015 – С. 81 – 91. ISSN: 2076-7633 (Print). – 2077-6853 (Online).
  13. Аббасов, А. Э. Геометрические модели управления рециркуляцией отработавших газов автомобиля / А. Э. Аббасов // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – №1 (56). – С. 182 – 191.
  14. Аббасов, А. Э. Оптимизация параметров моделируемых устройств. Инновационные аспекты социально-экономического развития региона: сб. тр. По материалам V ежегодной научной конференции аспирантов ФТА / А. Э. Аббасов // сборник – Королев МО. – 18.12.2014. – С. 10-19.

---

УДК 681.3

**Анализ влияния аддитивных негауссовских помех на точность измерения параметров движения в радиосистемах ближнего действия**

**В.М. Артюшенко**, д.т.н., профессор,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область,  
**В.И. Воловач**, к.т.н., доцент, зав.кафедрой Поволжского государственного университета сервиса, г. Тольятти

*Осуществлен анализ влияния негауссовских аддитивных помех на точность оценки параметров полезного сигнала, несущих информацию о движении лоцируемого объекта, находящегося на малых расстояниях от радиолокационного измерителя. Проведена оценка потенциальной точности измерения информационные параметры сигнала на фоне негауссовских аддитивных помех. Получены инженерные оценки информационных параметров сигнала на фоне аддитивных негауссовских помех, имеющих как коррелированный, так и независимый характер.*

Потенциальная точность измерения, негауссовские аддитивные помехи, радиосистемы ближнего действия.

**Analysis of influence of additive non-Gaussian noise on accuracy of motion parameters measurement in short-range radio systems**

**V.M. Artyushenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,  
**V.I. Volovach**, Ph.D., associate professor, head of department of the Volga State University of Service, Tolyatti

*The analysis of the influence of non-Gaussian additive noise on the accuracy of estimates of the parameters of useful signal, carrying information about the movement of detected object located at a small distances from the radar meter was carried out. Estimation of potential accuracy of the measurement of informative signal parameters on background of non-Gaussian additive noise was obtained. Engineering estimations of the informative signal parameters on the background of additive non-Gaussian noise, with both correlated and independent nature were found.*

Potential measurement accuracy, non-Gaussian additive noise, short-range radio system.

В статье рассматриваются вопросы оценки параметров сигнала, несущих информацию о движении объектов и находящихся под воздействием аддитивных негауссовских помех.



---

Оценка информационных параметров проводилась в дискретном времени наблюдения, причем оценке подлежали только неэнергетические информационные параметры. Для определения количественных оценок измеряемых параметров использованы нижние границы неравенства Крамера-Рао. Для оценки влияния негауссовских помех на точность измерения используется отношение дисперсии погрешности измерения при наличии аддитивных помех к дисперсии погрешности измерения при воздействии гауссовских помех.

Осуществлена оценка точности скалярного информационного параметра на фоне аддитивной некоррелированной помехи. Показано, что с увеличением отличия ПРВ информационного параметра и воздействующей аддитивной негауссовской помехи от гауссовской величина приведенной дисперсии уменьшается, что приводит к увеличению точности оценки измеряемого информационного параметра.

Произведена оценка точности измерения векторного информационного параметра на фоне аддитивной некоррелированной помехи для случаев взаимной зависимости и независимости оцениваемых параметров. Показано, что нижние границы дисперсии оценок частоты и фазы минимальны, если привязка измерений осуществляется к середине интервала наблюдения. Так же, как и в предыдущем случае, увеличение отличия ПРВ аддитивной негауссовской помехи от ПРВ гауссовской помехи приводит к большему выигрышу в точности оцениваемого параметра.

Произведена оценка точности измерения информационных параметров сигнала на фоне коррелированных аддитивных негауссовских помех. Показано, что увеличение коэффициента корреляции приводит к увеличению обобщенного отношения «сигнал/помеха», что в свою очередь приводит к уменьшению погрешности измерения информационного параметра. Отмечается, что апостериорная дисперсия измерения информационного параметра при воздействии негауссовской помехи меньше, когда помеха имеет коррелированный характер. Доказано, что увеличение отличия переходной ПРВ от гауссовской, приводит к увеличению точности оцениваемого информационного параметра. Также показано, что на приведенную погрешность измерения информационного параметра оказывают влияние как величина приведенного обобщенного отношения «сигнал/помеха», так и константа, определяемая параметром ПРВ.

Показано, что в случае совместной оценки (измерения) нескольких информационных параметров полезного сигнала на фоне некоррелированной негауссовской помехи, предельная эффективность оценки (измерения) является такой же, как и в случае измерения одного информационного параметра.

Вопросы измерения (оценки) параметров сигналов, несущих информацию о движении объектов, в радиолокации являются традиционными и весьма подробно рассмотрены в [1, 2 и др.]. Достаточно хорошо изучены вопросы радиолокационного измерения точечных [3, 4] и отчасти сложных дискретных [5, 6] целей. Вместе с тем многие аспекты, связанные с измерением информационных параметров сигнала, несущих информацию о движении объектов, находящихся на малых расстояниях от радиолокационных измерителей, являются ещё недостаточно изученными и имеют ряд специфических особенностей как теоретического, так и практического характера [7, 8].

В большинстве работ, посвященных вопросам оценки параметров сигналов, считалось, что на полезный сигнал воздействует аддитивная помеха, описываемая, как правило, гауссовской плотностью распределения вероятности (ПРВ). Однако, как показывают исследования [9–11], принимаемый измерителем сигнал подвержен воздействию аддитивных помех, имеющих ярко выраженный негауссовский характер. Для радиолокации, радионавигации, телеметрии, радиоизмерительной техники представляет значительный интерес получить оптимальную оценку параметров обрабатываемых сигналов при наличии помех с произвольной плотностью распределения вероятности.

Как известно, методы решения задачи оптимальной оценки параметров сигнала можно получить, основываясь на математической статистике и теории нелинейной фильтрации [1, 12]. Произведем оценку информационных параметров в дискретном времени наблюдения. Считаем, что в течение времени  $[0, T]$  наблюдается выборки случайного процесса  $Y_h \equiv Y(t_h)$  ( $h = 1, \dots, H$ ), являющегося смесью полезного сигнала  $S(\vec{\lambda}, t_h)$  и аддитивной  $n(t_h)$  помехи, имеющей негауссовский характер. Полезный сигнал содержит совокупность параметров  $\vec{\lambda} = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$ , подлежащих измерению (оцениванию), причем считается, что на интервале наблюдения эти параметры остаются неизменными. Для определения количественных оценок измеряемых параметров используем нижние границы неравенства Крамера-Рао [1, 12, 13]. Влияние негауссовских аддитивных помех на точность измерения будем оценивать отношением дисперсии погрешности измерения при наличии аддитивных помех к дисперсии погрешности измерения, когда эти помехи носят гауссовский характер.

Заметим, что оценке будут подлежать только неэнергетические информационные параметры полезного сигнала. При этом считается, что оценки являются функциями достаточных статистик и обладают асимптотическими свойствами состоятельности, как правило, несмещенности и нормальности.

Известно, что оценка  $\hat{\lambda}$  информационного параметра  $\lambda$  полезного сигнала  $s(\lambda, t)$  по максимуму апостериорной ПРВ находится из уравнения

$$\left. \frac{dW_y(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda = \hat{\lambda}} = 0. \quad (1)$$

Учитывая, что  $W_y(\lambda) = CW_\lambda(\lambda)W_\Pi(\lambda)$ , где  $C$  – постоянная нормировки;  $W_\lambda(\lambda)$  – априорная ПРВ;  $W_\Pi(\lambda)$  – функция правдоподобия, запишем:

$$\left. \frac{dW_y(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda = \hat{\lambda}} = \left[ \frac{d \ln W_\Pi(\lambda)}{d\lambda} + \frac{d \ln W_\lambda(\lambda)}{d\lambda} \right]_{\lambda = \hat{\lambda}} = 0. \quad (2)$$

Откуда, в соответствии с теоремой Крамера-Рао, дисперсия любой несмещенной оценки информационного параметра определяется неравенством [12]

$$M\{(\hat{\lambda} - \lambda)^2\} \geq \left[ -M\left\{\frac{d^2 \ln W_{\Pi}(\lambda)}{d\lambda^2}\right\} - M\left\{\frac{d^2 \ln W_{\lambda}(\lambda)}{d\lambda^2}\right\} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где усреднение осуществляется по результатам наблюдения и характеристикам случайного параметра  $\lambda$ .

Преобразуем (3) к виду:

$$M\{(\hat{\lambda} - \lambda)^2\} \geq \left[ -M\left\{\frac{d^2 \ln W_{\Pi}(\lambda)}{d\lambda^2}\right\} + I_{\phi}^{\lambda} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $I_{\phi}^{\lambda} = -M\left\{\frac{d^2 \ln W_{\lambda}(\lambda)}{d\lambda^2}\right\}$  – количество информации по Фишеру, заключенное в одномерном ПРВ  $W_{\lambda}(\lambda)$ .

**1. Оценка точности измерения скалярного информационного параметра на фоне аддитивной некоррелированной помехи.** Конкретизируем неравенство Крамера-Рао для случая воздействия аддитивных негауссовских помех с независимыми значениями.

Пусть на вход измерительного радиолокационного устройства поступает аддитивная смесь вида  $y_h = s(\lambda, t_h) + n_h$ , полезного сигнала  $s(\lambda, t_h)$ , несущего информацию об одном из интересующих нас параметре движения лоцируемого объекта  $\lambda$ , и аддитивная негауссовская некоррелированная помеха  $n(t_h)$ .

Считаем, что логарифм функции правдоподобия (ЛФП), входящий в (4), существует и имеет вид:  $B_n(n_h) = \ln W_n\{y_h - s(\hat{\lambda}, t_h)\}$ , в котором  $W_n\{\cdot\}$  – одномерная ПРВ аддитивной негауссовской помехи.

Первая производная от ЛФП по информационному параметру будет равна:

$$B_{\lambda,h}^{I'} = \frac{d}{d\hat{\lambda}} \ln W_n\{y_h - s(\hat{\lambda}, t_h)\} = s'_{\lambda}(\hat{\lambda}, t_h) \frac{d}{dn_h} \ln W_n(n_h) = s'_{\lambda}(\hat{\lambda}, t_h) B_{n,h}^{II'}$$

Соответственно, вторая производная

$$B_{\lambda,h,h}^{II''} = \{y_h - s(\hat{\lambda}, t_h)\} = [s'_{\lambda}(\hat{\lambda}, t_h)]^2 \frac{d^2}{dn_h^2} \ln W_n(n_h) + s''_{\lambda}(\hat{\lambda}, t_h) \frac{d}{dn_h} \ln W_n(n_h) = [s'_{\lambda}(\hat{\lambda}, t_h)]^2 B_{n,h,h}^{II''} + s''_{\lambda}(\hat{\lambda}, t_h) B_{n,h}^{II''}$$

Усреднив вторую производную ЛФП по времени и по множеству, запишем:

$$\tilde{B}_{\lambda,h,h}^{II''} = -M\left\{\frac{d^2}{d\hat{\lambda}^2} \ln W_{\Pi}(\hat{\lambda})\right\} = P_s I_{\phi}^{\lambda},$$

где  $P_s = \langle [s'_{\lambda}(\hat{\lambda}, t_h)]^2 \rangle = \lim_{H \rightarrow \infty} H^{-1} \sum_{h=1}^H \left[ \frac{ds(\hat{\lambda}, t_h)}{d\hat{\lambda}} \right]^2$ ;  $I_{\phi}^{\lambda} = M\left\langle \frac{d^2}{dn_h^2} \ln W_n(n_h) \right\rangle$

– количество информации по Фишеру относительно аддитивной негауссовской

---

помехи, заключенное в одномерном ПРВ  $W_n(n_h)$ .

С учетом введенных обозначений, представим неравенство Крамера-Рао в виде:

$$\sigma_{\lambda n}^2 \geq \left\{ P_s \mu_n^2 \sigma_n^{-2} + \mu_\lambda^2 \sigma_\lambda^{-2} \right\}^{-1}, \quad (7)$$

где  $\mu_n^2$  и  $\mu_\lambda^2$  – коэффициенты, учитывающие повышение точности демодуляции информационного процесса за счет отличия, соответственно, ПРВ перехода информационного процесса и аддитивной помехи от гауссовских. При негауссовских помехах всегда  $\mu^2 > 1$  [14].

Введем обозначение  $\rho_n = P_s \sigma_\lambda^2 / \sigma_n^2$ , играющее в данном случае роль обобщенного отношения сигнал-помеха. В этом случае выражение (7) запишется:

$$\sigma_{\lambda n}^2 \geq \sigma_\lambda^{-2} \left\{ \rho_n \mu_n^2 + \mu_\lambda^2 \right\}^{-1}. \quad (8)$$

Полученные неравенства (7) и (8) описывают нижние границы неравенства Крамера-Рао для дисперсии несмещенной оценки информационного параметра полезного сигнала при воздействии аддитивной негауссовской помехи с независимыми значениями.

Произведем количественную оценку точности измерения, получаемую в результате учета негауссовского характера как ПРВ информационного параметра  $\hat{\lambda}$ , так и воздействующей аддитивной помехи  $n_h$ . Для этого построим зависимости приведенной дисперсии,  $\delta_{\lambda n}^2 = f(\sigma_{\lambda n}^2 / \sigma_{\lambda gn}^2)$ , где  $\sigma_{\lambda gn}^2$  – дисперсия нормальной погрешности измерения (оценки), рассчитанная для случая, когда информационный параметр и аддитивная помеха являются случайными гауссовскими процессами, описываемыми одномерными распределениями. При этом будем считать, что обобщенное ОСП  $\rho_n$  в обоих случаях равны между собой.

Учитывая, что для гауссовских некоррелированных процессов коэффициент  $\mu^2 = 1$  [14], исходя из выше сказанного, получим:

$$\delta_{\lambda n}^2 = \frac{\sigma_{\lambda n}^2}{\sigma_{\lambda gn}^2} = \frac{(\rho_n + 1)}{\rho_n \mu_n^2 + \mu_\lambda^2}. \quad (9)$$

На рисунке 1 представлены графические зависимости  $\delta_{\lambda n}^2 = f(\mu_\lambda^2, \mu_n^2)$ , построенные для случаев  $\rho_n = 1$  и  $\rho_n = 10$ .

Из выражения (9) и приведенных графиков видно, что с увеличением коэффициентов  $\mu_\lambda^2$  и  $\mu_n^2$ , а, следовательно, с увеличением отличия ПРВ информационного параметра и воздействующей аддитивной помехи от гауссовской величина приведенной дисперсии уменьшается, что в свою очередь приводит к увеличению точности оценки измеряемого информационного параметра.

При высоком качестве измерения информационного параметра (больших соотношениях сигнал-помеха) апостериорная плотность распределения вероятности (АПРВ)  $W_y(\lambda)$  в окрестности истинного значения  $\lambda_n$  существенно уже

априорной  $W_y(\lambda)$  ПРВ [14]. В этом случае значением  $I_\phi^\lambda$  можно пренебречь, и неравенство Крамера-Рао будет определяться выражением:

$$\sigma_{\hat{\lambda}_m}^2 \geq \{I_\phi^\lambda P_{s'}\}^{-1} = \{\mu_n \sigma_n^{-2} H^{-1} \sum_{h=1}^H [ds(\hat{\lambda}, t_h) / d\hat{\lambda}]^2\}^{-1}. \quad (10)$$

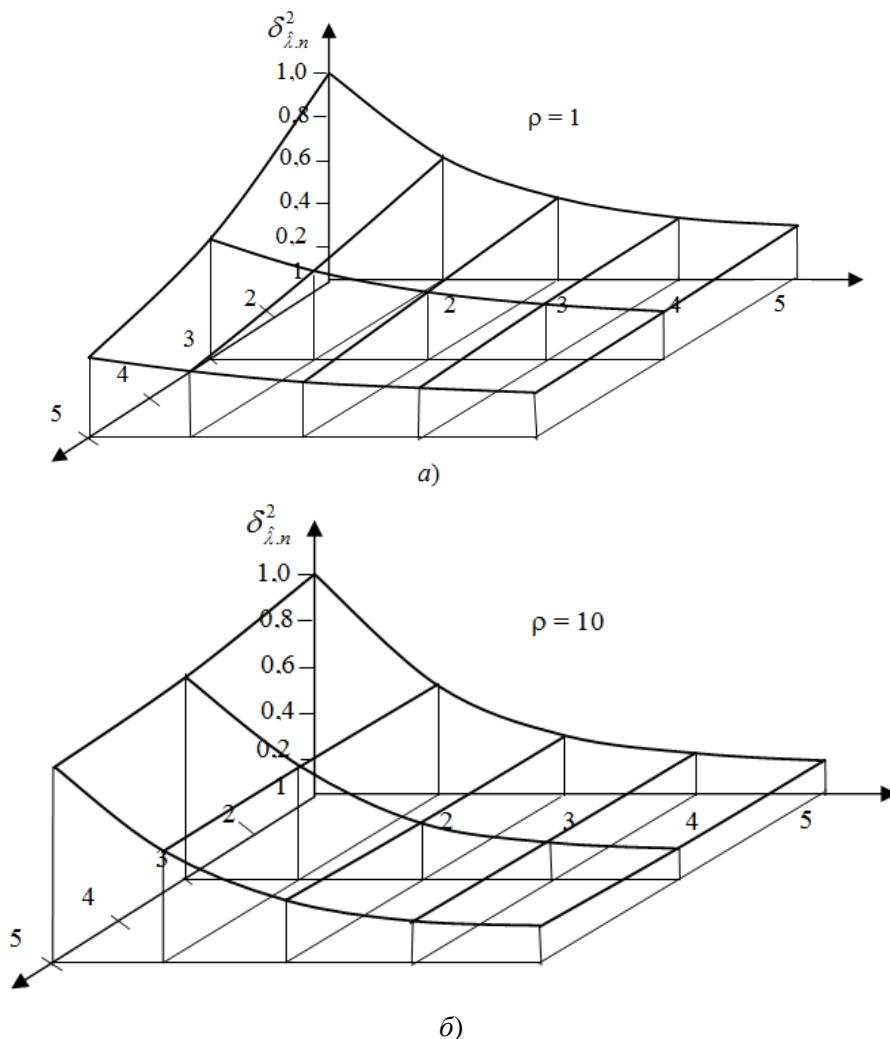


Рисунок 1 – Зависимости  $\delta_{\hat{\lambda}, n}^2 = f(\mu_n^2, \mu_\lambda^2)$  при: а –  $\rho = 1$ ; б –  $\rho = 10$

На примере измерения (оценки) частоты  $\lambda = \omega$  полезного сигнала

$$s(\lambda, t_h) = U_m \cos(\omega t_h + \varphi_h). \quad (11)$$

оценим выигрыш, получаемый при учете негауссовского характера аддитивной помехи. Считаем, что ПРВ измеряемого информационного (оцениваемого) параметра и воздействующей помехи известны и имеют негауссовский характер. Оценка информационного параметра осуществляется на интервале измерения  $[0, T]$ . Предполагаем, что моменты времени, соответствующие началу и концу обрабатываемого сигнала, точно известны и совпадают с границами интервала изме-

рения. Воспользовавшись изложенной в [12] методикой, а также результатами, связанными с оценкой частоты сигнала на фоне гауссовских помех с независимыми значениями, после опускаемых из-за громоздкости математических преобразований, приняв для удобства  $\sigma_\omega^2 = 1$ , получим выражение для дисперсии частоты полезного сигнала  $s(\lambda, t_h)$  при воздействии негауссовских аддитивных помех с независимыми значениями:

$$\sigma_\omega^2 \geq \left\{ \mu_n^2 \frac{\rho T^2}{12} + \mu_\omega^2 \right\}^{-1}, \quad (12)$$

где  $\rho = U_m^2 / 2\sigma_n^2$ .

Полученные выражения показывают, что на точность измерения (оценки) частоты полезного сигнала  $s(\lambda, t_h)$  при воздействии негауссовской аддитивной помехи с независимыми значениями существенно влияют не только такие параметры как  $\rho$  и  $T$ , но и величина коэффициентов  $\mu_\omega^2$  и  $\mu_n^2$ , учитывающих, соответственно, отличие ПРВ измеряемого (оцениваемого) информационного параметра и помехи от гауссовской. Как видно из представленного неравенства, чем больше отличие ПРВ оцениваемого параметра и воздействующей помехи от гауссовской, тем точность оценки частоты выше.

**2. Оценка точности измерения векторного информационного параметра на фоне аддитивной некоррелированной помехи.** Рассмотрим случай одновременного измерения (оценки) нескольких информационных параметров полезного сигнала  $s(\vec{\lambda}, t_h)$ ,  $\vec{\lambda} = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$ , на фоне воздействия негауссовской аддитивной помехи, имеющей некоррелированный характер.

Оценку точности рассмотрим на примере одновременного измерения  $\omega$ ,  $\dot{\omega}$  и  $\varphi$  полезного сигнала

$$s(\vec{\lambda}, t_h) = U_{m.h} \sin[(\omega + 0,5\dot{\omega}t_h)t_h + \varphi], \quad (13)$$

несущих информацию о параметрах движения лоцируемого объекта.

Так же, как и в предыдущем случае, будем считать, что оценка измеряемых параметров осуществляется на интервале наблюдения  $[0, T]$ , причем моменты времени, соответствующие началу и концу обрабатываемого сигнала точно известны и совпадают с границами интервала наблюдения.

Воспользуемся методикой, изложенной [15] для определения одновременной оценки информационных параметров сигнала на фоне гауссовской некоррелированной помехи.

Для удобства проведения дальнейшего анализа представим сигнал  $s(\vec{\lambda}, t_h)$  в виде

$$s(\vec{\lambda}, t_h) = U_{m.h} \sin(\lambda_1 + \lambda_2 t_h + \lambda_3 t_h^2), \quad (14)$$

где  $\lambda_1 = \varphi$ ;  $\lambda_2 = \omega$ ;  $\lambda_3 = 0,5\dot{\omega}$ .

Заметим, что в нашем случае при оценке информационных параметров по максимуму АПРВ должны выполняться три уравнения:



$$\left. \frac{dW_y(\vec{\lambda})}{d\lambda_1} \right|_{\lambda_1 = \hat{\lambda}_1} = 0; \quad \left. \frac{dW_y(\vec{\lambda})}{d\lambda_2} \right|_{\lambda_2 = \hat{\lambda}_2} = 0; \quad \left. \frac{dW_y(\vec{\lambda})}{d\lambda_3} \right|_{\lambda_3 = \hat{\lambda}_3} = 0.$$

Выражение нижней границы неравенства Крамера-Рао для дисперсии несмещенных совместных параметров полезного сигнала  $\vec{\lambda} = \{\varphi, \omega, \dot{\omega}\}$  запишется [16]

$$\sigma_{\lambda_{ij}}^2 \geq |J_{ij}|/|J|; \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (15)$$

где  $|J_{ij}|$  – алгебраическое дополнение элемента  $J_{ij}$  информационной матрицы Фишера  $\|J\|$ ;  $|J|$  – определитель матрицы  $\|J\|$ .

Заметим, что элементы информационной матрицы при  $i \neq j$  учитывают взаимную зависимость оцениваемых параметров. В случае если измеряемые параметры не зависят друг от друга, информационная матрица упрощается, приобретая вид:

$$\|J\| = \begin{vmatrix} J_{11} & & 0 \\ & J_{22} & \\ 0 & & J_{33} \end{vmatrix}.$$

Дисперсия того или иного параметра при этом будет определяться выражением:

$$\sigma_{a.i}^2 = \sigma_{a.ii}^2 = |J_{ii}|/|J|; \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Элементы матрицы определяются соотношением

$$J_{ij} = \int_{h=1}^H h'_{\lambda_i}(\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \hat{\lambda}_3, t_1, t_h) s'_{\lambda_j}(\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \hat{\lambda}_3, t_h) \Delta + I_{\phi,ij}^{\lambda}. \quad (16)$$

Здесь:  $H = T/\Delta$  – целая часть отношения;  $\Delta = h - (h-1)$  – интервал взятия временных отсчетов;  $t_1$  – начало времени измерения;  $s'_{\lambda_j}$  – производная от обрабатываемого полезного сигнала по оцениваемому параметру  $\lambda_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ), определяемая при  $\vec{\lambda} = \hat{\lambda}$ ;  $I_{\phi,ij}^{\lambda}$  – составляющая информационной матрицы Фишера относительно измеряемых параметров, заключенная в совместной ПРВ оцениваемых параметров  $W_{\vec{\lambda}}(\vec{\lambda})$ ;  $h'_{\lambda_i}$  – производная по параметру  $\lambda_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ), определяемая при  $\vec{\lambda} = \hat{\lambda}$  от весовой функции  $h(\vec{\lambda}, t_1, t_h)$ , являющаяся решением уравнения:

$$\sum_{h=1}^H R_n(t_h - t_{h-1}) h(\vec{\lambda}, t_1, t_h) \Delta = s(\vec{\lambda}, t_h),$$

где  $R_n(t_h - t_{h-1})$  – корреляционная функция помехи.

В случае  $\delta$ -коррелированного шума

$$h(\bar{\lambda}, t_1, t_h) = \mu_n^2 N_n^{-2} s(\bar{\lambda}, t_h),$$

где  $N_n^{-2}$  – спектральная плотность помехи. Выражение (16) примет вид:

$$J_{ij} = \mu_n^2 \sigma_{n\Delta}^{-2} \sum_{h=1}^H s'_{\lambda,i}(\hat{\lambda}, t_h) s'_{\lambda,j}(\hat{\lambda}, t_h) + I_{\phi,ij}^\lambda, \quad (17)$$

где  $\sigma_{n\Delta}^{-2} = N_n^2 / \Delta$  – дисперсия воздействующей помехи в полосе  $f = 1 / \Delta$ .

Для обрабатываемого сигнала производные будут определяться:

$$s'_{\lambda,i}(\hat{\lambda}, t_h) = U_{mh} t_h^{i-1} \cos(\hat{\lambda}_1 + \hat{\lambda}_2 t_h + \hat{\lambda}_3 t_h^2), \quad i = 1, 2, 3. \quad (18)$$

Сделав необходимые тригонометрические преобразования, получим

$$J_{ij} = 0,5 \mu_n^2 \sigma_{n\Delta}^{-2} \sum_{h=1}^H U_{m,h}^2 t_h^{i+j-2} [1 + \cos 2(\hat{\lambda}_1 + \hat{\lambda}_2 t_h + \hat{\lambda}_3 t_h^2)] + I_{\phi,ij}^\lambda, \quad (19)$$

где принято, что  $t = 0$ , то есть интервал измерения соответствует  $-T \leq t \leq 0$ .

Считая, что оцениваемые информационные параметры на интервале измерения остаются неизменными, принимаем, что их величины равны значениям, принимаемым в момент времени окончания интервала измерения.

При значении косинуса в (19), равном единице, что равносильно допущению  $\omega T \gg 1$ , и большом числе отсчетов ( $H \simeq T / \Delta \gg 1$ ) на интервале оценки информационных параметров получим:

$$J_{ij} = \mu_n^2 \frac{U_m^2}{2\sigma_n^2} (-1)^{i+j-2} T^{i+j-2} (i+j-2)^{-1} + I_{\phi,ij}^\lambda, \quad (20)$$

где  $U_m = H^{-1} \sum_{h=1}^H U_{m,h}$ ;  $\sigma_n^2 = \frac{N_n^2}{\Delta H} = N_n^2 / T$  – дисперсия аддитивной помехи.

Обозначив через  $\rho = U_m^2 / 2\sigma_n^2$ , играющее в данном случае роль обобщенного отношения сигнал/помеха (ОСП), запишем матрицу  $\|J\|$  в виде:

$$\|J\| = \left\{ \mu_n^2 \rho \begin{vmatrix} 1 & -0,5T & \frac{1}{3}T^2 \\ -0,5T & \frac{1}{3}T^2 & -0,25T^3 \\ \frac{1}{3}T^2 & -0,25T^3 & 0,2T^4 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} I_{\phi,11}^\lambda & I_{\phi,12}^\lambda & I_{\phi,13}^\lambda \\ I_{\phi,21}^\lambda & I_{\phi,22}^\lambda & I_{\phi,23}^\lambda \\ I_{\phi,31}^\lambda & I_{\phi,32}^\lambda & I_{\phi,33}^\lambda \end{vmatrix} \right\}. \quad (21)$$

Если ПРВ измеряемых (оцениваемых) параметров

$$W_{\bar{\lambda}}(\vec{\lambda}) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{3/2} D^{0,5}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\pi\sigma^2} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 D_{i,k} (\lambda_i - a)(\lambda_k - a) \right\},$$

где  $\sigma^2$  и  $a$  – соответственно, дисперсия и среднее значение;  $D$  – детерминант матрицы  $R_{\bar{\lambda}}$  элементы которой  $R_{ik} = R_{ki} = R(\tau_k - \tau_i) = B_{\bar{\lambda}}(\tau_k - \tau_i) / B_{\bar{\lambda}}(0)$  представляют значения нормированной корреляционной функции;  $D_{ik}$  – алгебраическое дополнение элемента  $R_{ik}$  в матрице, то информационная матрица

$\|I_{\phi,ij}^\lambda\|$  в (21), примет вид:

$$\|I_{\phi,ij}^{\lambda}\| = \frac{1}{(2\sigma^2 D)} \begin{vmatrix} 2D_{11} & D_{12} + D_{21} & D_{13} + D_{31} \\ D_{21} + D_{12} & 2D_{22} & D_{23} + D_{32} \\ D_{31} + D_{13} & D_{32} + D_{23} & 2D_{33} \end{vmatrix}.$$

При оценке информационных параметров методом максимального правдоподобия корреляционная матрица ошибок (21) примет вид:

$$\|J\| = \mu_n^2 \rho \begin{vmatrix} 1 & -0,5T & \frac{1}{3}T^2 \\ -0,5T & \frac{1}{3}T^2 & -0,25T^3 \\ \frac{1}{3}T^2 & -0,25T^3 & 0,2T^4 \end{vmatrix}. \quad (21a)$$

Определитель матрицы в этом случае будет равен:

$$|J| = (\mu_n^2 \rho)^3 T^6 / 2160.$$

Подставляя (20) и (22) в (15), зная, что  $\lambda_3 = 0,5\dot{\omega}$ , после несложных преобразований получим выражение для определения оценок нижних границ неравенства Крамера-Рао информационных параметров полезного сигнала (13) при воздействии негауссовских аддитивных помех с независимыми значениями, которые будут иметь следующий вид:

– для частоты

$$\sigma_{\dot{\omega}}^2 \geq \{\mu_n^2 \rho T^2 / 192\}^{-1}; \quad (22a)$$

– для производной частоты

$$\sigma_{\ddot{\omega}}^2 \geq \{\mu_n^2 \rho T^4 / 720\}^{-1}; \quad (22б)$$

– для фазы

$$\sigma_{\dot{\phi}}^2 \geq \{\mu_n^2 \rho / 9\}^{-1}. \quad (22в)$$

Если объект движется с постоянной скоростью, то есть  $\dot{\omega} = 0$ , то

$$\sigma_{\dot{\omega}}^2 \geq \{\mu_n^2 \rho T^2 / 12\}^{-1}; \quad (23)$$

$$\sigma_{\dot{\phi}}^2 \geq \{\mu_n^2 \rho / 4\}^{-1}. \quad (24)$$

Если начальная фаза колебания известна, а частота постоянна, то

$$\sigma_{\dot{\omega}}^2 \geq \{\mu_n^2 \rho T^2 / 3\}^{-1}. \quad (25)$$

В тех случаях, когда объект является неподвижным, то есть необходимо измерить только фазу обрабатываемого сигнала (при известной частоте)

$$\sigma_{\dot{\phi}}^2 \geq \{\mu_n^2 \rho\}^{-1}. \quad (26)$$

Если значения информационных параметров полезного сигнала принимаются равными их значениям в момент, совпадающий с серединой интервала измерения, выражение для определения элементов матрицы  $\|J_{ij}\|$  будут иметь вид:

$$J_{ij} = \mu_n^2 \frac{U_m^2}{2\sigma_n^2} (-1)^{i+j-2} [(0,5T)^{i+j-2} - (-0,5T)^{i+j-2}] (i+j-1)^{-1} + I_{\phi,ij}^\lambda. \quad (27)$$

При оценке информационных параметров методом максимального правдоподобия матрица  $\|J\|$  запишется:

$$\|J\| = \mu_n^2 \rho \begin{vmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{12} T^2 \\ 0 & \frac{1}{12} T^2 & 0 \\ \frac{1}{12} T^2 & 0 & \frac{1}{80} T^4 \end{vmatrix}. \quad (28)$$

Откуда  $|J| = (\mu_n^2 \rho)^3 T^6 / 2160$ . В этом случае:

– для частоты

$$\sigma_{\hat{\omega}}^2 \geq \{\mu_n^2 \rho T^2 / 12\}^{-1}; \quad (29a)$$

– для производной частоты

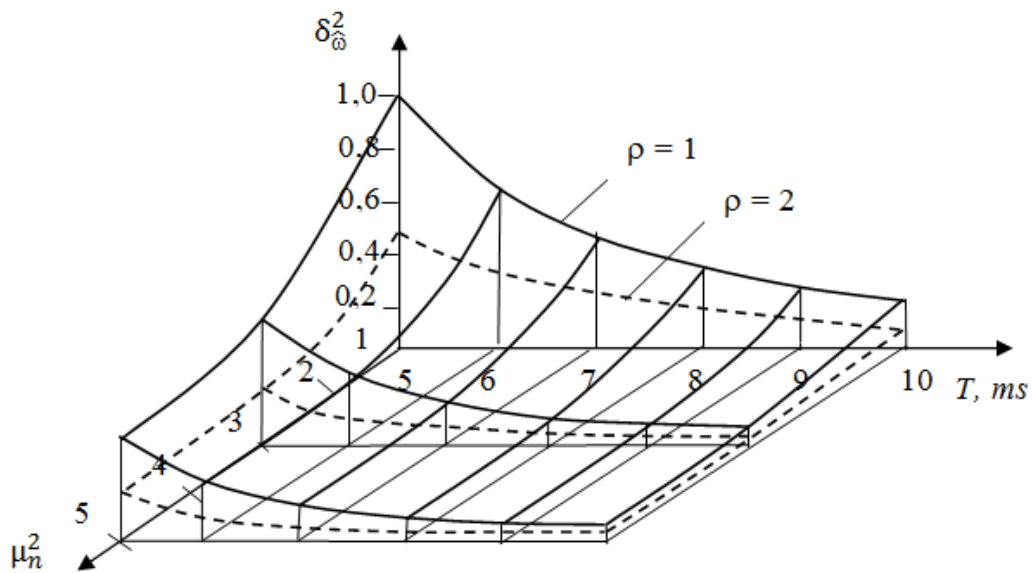
$$\sigma_{\dot{\omega}}^2 \geq \{\mu_n^2 \rho T^4 / 720\}^{-1}; \quad (29б)$$

– для фазы

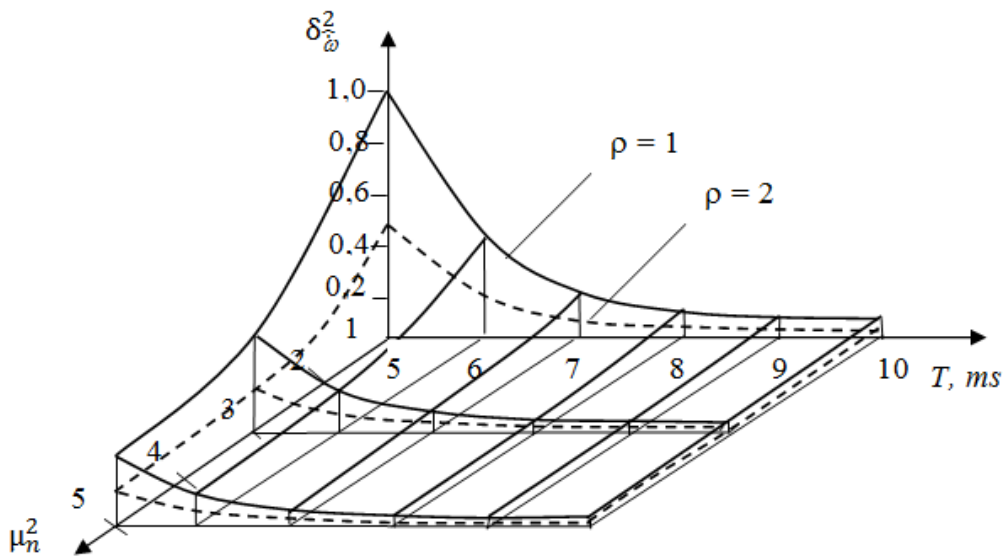
$$\sigma_{\hat{\phi}}^2 \geq \{4\mu_n^2 \rho / 9\}^{-1}. \quad (29в)$$

Сравнение (23) и (29) показывает, что нижние границы дисперсии оценок  $\hat{\omega}$  и  $\hat{\phi}$  значительно меньше, если привязка измерений осуществляется к середине интервала наблюдения. Повышение точности измерения при такой привязке связано с тем, что в этом случае, как видно из (28), недиагональные элементы  $J_{12}$ ,  $J_{21}$ ,  $J_{23}$  и  $J_{32}$  равны нулю и лишь элементы  $J_{13}$  и  $J_{31}$  отличны от него. В случае отличия от нуля недиагональных элементов в матрице  $\|J\|$  следует учитывать наличие корреляционных связей между ошибками оценок отдельных измеряемых параметров.

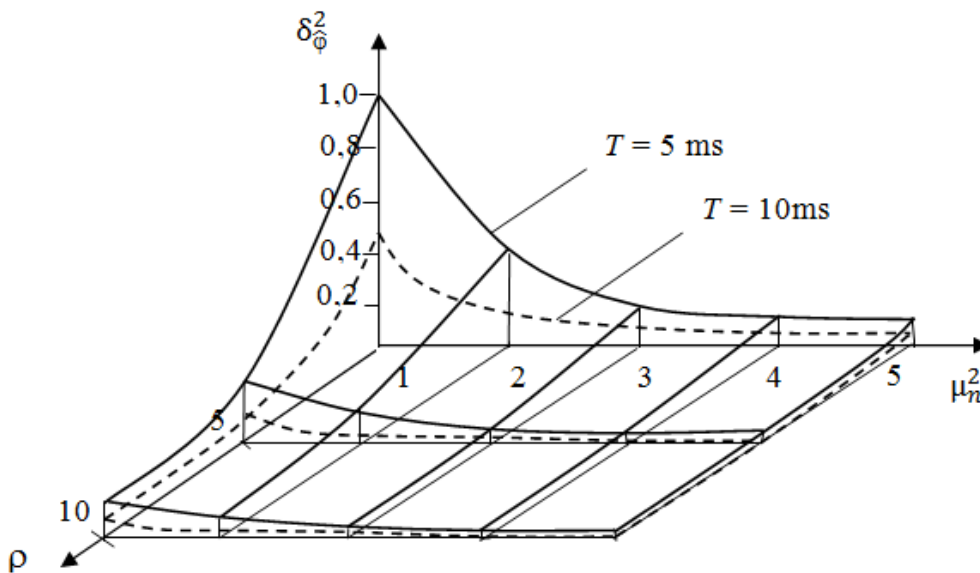
На рисунке 2 представлены зависимости, иллюстрирующие приведенные погрешности  $\delta_{\hat{\lambda},n}^2 = f(\sigma_{\hat{\lambda},n}^2 / \sigma_{\hat{\lambda},n}^2)$  измерения (оценки) информационных параметров  $\hat{\lambda} = \varphi, \omega, \dot{\omega}$  сигнала  $(\hat{\lambda}, t_h)$ , несущих информацию о параметрах движения лоцируемого объекта, для случая, когда величины  $\varphi, \omega$  и  $\dot{\omega}$  принимаются равными значениям в момент окончания интервала измерения.



a)



б)



в)

Рисунок 2 – Зависимости  $\delta_{\lambda}^2 = f(T, \mu_n^2)$ , где:  $a - \hat{\lambda} = \hat{\omega}$ ;  $b - \hat{\lambda} = \hat{\omega}$ ;  $\nu$  – зависимость  $\delta_{\phi}^2 = f(\mu_n^2, \rho)$

Из графиков видно, что с увеличением  $\rho$ ,  $T$  и  $\mu_n^2$  приведенная погрешность измерения (оценки) уменьшается, а значит точность измерения – возрастает.

Как видно, учет негауссовского характера воздействующей аддитивной помехи позволяет значительно повысить точность оцениваемого параметра, причем, чем больше ПРВ аддитивной помехи отличается от гауссовской, тем выше получаемый выигрыш.

**3. Оценка точности измерения информационных параметров сигнала на фоне коррелированных аддитивных негауссовских помех.** Рассмотрим случай, когда информационный параметр оценивается на фоне коррелированной, в общем случае, негауссовской помехи. Будем считать, что помеха описывается переходной ПРВ  $W_n(n_h | n_{h-1})$ . Измерение (оценка) информационного параметра ведется в дискретном времени наблюдения на интервале  $[0, T]$ , причем  $\hat{\lambda}_h = \hat{\lambda}_{h-1} = \hat{\lambda}$ .

Логарифм функции правдоподобия существует и описывается выражением:

$$B_n(n) = \ln W_n \{ y_h - s(\hat{\lambda}, t_h) | y_{h-1} - s(\hat{\lambda}, t_{h-1}) \}, \quad (30)$$

где  $y_{h-1} - s(\hat{\lambda}, t_{h-1}) = n_{h-1}$ ,  $i = 0, 1$ .

При этом функция правдоподобия удовлетворяет условиям регулярности [17]:

$$\left\langle \frac{\partial}{\partial \hat{\lambda}} \ln W_n \{y_h - s(\hat{\lambda}, t_h) \mid y_{h-1} - s(\hat{\lambda}, t_{h-1})\} \right\rangle = 0; \quad (31)$$

$$\left\langle \frac{\partial}{\partial \hat{\lambda}^2} \ln W_n \{y_h - s(\hat{\lambda}, t_h) \mid y_{h-1} - s(\hat{\lambda}, t_{h-1})\} \right\rangle = \left\langle \left[ \frac{\partial}{\partial \hat{\lambda}} \ln W_n \{y_h - s(\hat{\lambda}, t_h) \mid y_{h-1} - s(\hat{\lambda}, t_{h-1})\} \right]^2 \right\rangle. \quad (32)$$

Запишем производную ЛФП (30) по информационному параметру в виде:

$$\left\langle \frac{\partial}{\partial \hat{\lambda}} \ln W_n \{y_h - s(\hat{\lambda}, t_h) \mid y_{h-1} - s(\hat{\lambda}, t_{h-1})\} \right\rangle = H^{-1} \sum_{h=1}^H \left[ -\frac{d}{dn_h} \ln W_n(n_h \mid n_{h-1}) s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_h) - \right. \\ \left. - \frac{d}{dn_{h-1}} \ln W_n(n_h \mid n_{h-1}) s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_h) \right] = H^{-1} \sum_{h=1}^H \left[ -B''_{n,h} s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_h) - B''_{n,h-1} s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_{h-1}) \right] \quad (33)$$

Заметим, что соотношение (31) выполняется, если

$$\left\langle \frac{d}{dn_{h-i}} \ln W_n(n_h \mid n_{h-i}) \right\rangle = 0, \quad i = 0, 1. \quad (34)$$

С учетом соотношений (32), (34), дифференцируя (33), получим

$$\left\langle \frac{\partial}{\partial \hat{\lambda}^2} \ln W_n \{y_h - s(\hat{\lambda}, t_h) \mid y_{h-1} - s(\hat{\lambda}, t_{h-1})\} \right\rangle = \\ = H^{-1} \sum_{h=1}^H \left[ B''_{n,h,h} [s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_h)]^2 + 2B''_{n,h,h-1} [s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_h) s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_{h-1})] + B''_{n,h-1,h-1} [s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_{h-1})]^2 \right]. \quad (35)$$

Усреднив (35) не только б по множеству, но и по времени, используя результаты, полученные [18], преобразуем (35) к виду:

$$\tilde{B}''_\lambda = I''_{n,11} P_{11} + 2I''_{n,12} P_{12} + I''_{n,22} P_{22}. \quad (36)$$

Правая часть (36), согласно [13], представляет собой след матрицы  $IP$

$$\text{tr}[IP] = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 I_{ij} P_{ij}; \quad i, j = 1, 2,$$

где  $I_{ij} = I''_{n,\alpha\beta}(\alpha, \beta = 1, 2)$  – составляющие информационной матрицы Фишера относительно аддитивной помехи заключенные в переходной ПРВ  $W_n(n_h \mid n_{h-1})$ , определенные в (29, a);  $P_{ij}$  – элементы матрицы  $\|P\|$ , определенные в [18]:

$$i = j; \quad P_{ij} = P_s = \lim_{H \rightarrow \infty} H^{-1} \sum_{h=1}^H [s'_i]^2; \\ i \neq j; \quad P_{ij} = P_s = \lim_{H \rightarrow \infty} H^{-1} \sum_{h=1}^H [s'_i s'_j] \quad i, j = 1, 2.$$

С учетом сказанного, выражение (36) можно записать в виде:

$$\tilde{B}''_\lambda = \text{tr}[IP].$$

В этом случае, выражение для нижней границы неравенства Крамера-Рао, в общем случае, запишется:

$$\sigma_{\hat{\lambda},k}^2 \geq [\text{tr}[IP] + I_\phi^\lambda]^{-1}. \quad (37)$$

При оценке измеряемого параметра методом максимального правдоподобия (37) переходит в неравенство:

$$\sigma_{\hat{\lambda},k}^2 \geq [\text{tr}[IP]]^{-1}. \quad (38)$$

Заметим, что в случае некоррелированной помехи выражения (37), (38) переходят, соответственно, в выражения (5) и (10).

Если на полезный сигнал воздействует гауссовская коррелированная помеха с переходной ПРВ вида:

$$W_n(n_h|n_{h-1}) = [2\pi\sigma_{n,h}(1-r_n^2)]^{-0.5} \exp\{-(n_h - \sigma_{n,h}\sigma_{n,h-1}^{-1}r_n n_{h-1})^2 \times (2\sigma_{n,h}(1-r_n^2))^{-1}\},$$

где  $\sigma_{n,h}$  и  $\sigma_{n,h-1}$  – соответственно, дисперсия величины  $n$  на шаге  $h$  и  $h-1$ ;  $r_n$  – коэффициент корреляции выборок  $n_h$  и  $n_{h-1}$ , с учетом того, что в этом случае информационная матрица Фишера гауссовского случайного процесса  $n(t)$  имеет вид [18]:

$$\|I_{\Phi,r}\| = \begin{vmatrix} I_{\Phi.11} & I_{\Phi.12} \\ I_{\Phi.21} & I_{\Phi.22} \end{vmatrix} = [\sigma_n^2(1-r_n^2)]^{-1} \begin{vmatrix} 1 & -r_n \\ -r_n & r_n^2 \end{vmatrix},$$

а так же элементов матрицы  $\|P\|$ , определяемых выражениями

$$P_{11} = \lim_{H \rightarrow \infty} H^{-1} \sum_{h=1}^H [s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_h)]^2;$$

$$P_{11} = P_{21} = \lim_{H \rightarrow \infty} H^{-1} \sum_{h=1}^H [s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_h) s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_{h-1})];$$

$$P_{22} = \lim_{H \rightarrow \infty} H^{-1} \sum_{h=1}^H [s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_{h-1})]^2,$$

после несложных математических преобразований, запишем (38) в виде:

$$\sigma_{\lambda,k}^2 \geq \left\{ \frac{[s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_h) - r_n s'_\lambda(\hat{\lambda}, t_{h-1})]^2}{\sigma_n^2(1-r_n^2)} \right\}^{-1} = \left\{ \frac{[\Delta s_h]^2}{\sigma_n^2(1-r_n^2)} \right\}^{-1}. \quad (39)$$

Данное выражение, вплоть до обозначений, полностью совпадает с выражением, полученным в работах [19, 20] для случая коррелированных гауссовских помех.

Перепишем (39) в виде:  $\sigma_{\lambda,k}^2 \geq [\rho_{\Gamma,k}]^{-1}$ , где  $\rho_{\Gamma,k} = \frac{[\Delta s_h]^2}{\sigma_n^2(1-r_n^2)}$  – величина,

играющая роль ОСП при измерении информационного параметра на фоне гауссовской аддитивной помехи с дисперсией  $\sigma_n^2$  и коэффициентом корреляции  $r_n$ .

В работе [21] показано, что величину  $\rho_{\Gamma,k}$  необходимо рассматривать в спектральном представлении

$$\rho_{\Gamma,k} = \frac{0,5}{\pi} \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} \frac{|s_s(\omega)|^2}{s_n(\omega)} d\omega,$$

где  $|s_s(\omega)|$  – амплитудный спектр сигнала;  $s_n(\omega)$  – энергетический спектр помехи;  $\Delta t = h - (h-1)$ .

В том случае, когда аддитивная помеха сильно коррелирована  $r_n \rightarrow 1$ , то есть спектр  $s_n(\omega)$  уже спектра  $|s_s(\omega)|$ , получаем, что [19]

$$|s_s(\omega)| \gg \frac{1}{2\pi s_n(0)} \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} |s_s(\omega)|^2 d\omega = P_s \sigma_n^{-2}, \quad (40)$$

где  $P_s \sigma_n^{-2} = \rho_{\Gamma n}$  – обобщенное ОСП при воздействии некоррелированной гауссовской аддитивной помехи.

Как видно из (40)



$$\rho_{г.к} \gg \rho_{гн}. \quad (41)$$

Следовательно

$$\sigma_{\hat{\lambda}.г.к}^2 \ll \sigma_{\hat{\lambda}.гн}^2. \quad (42)$$

Таким образом, увеличение коэффициента корреляции приводит к увеличению обобщенного ОСП, что в свою очередь ведет к уменьшению погрешности измерения информационного параметра, а значит и к повышению точности его измерения.

Воспользовавшись материалами [14, 18], введем соотношение

$$\mu = I_{\phi}^n / I_{\phi.г}^n, \quad (43)$$

характеризующее предельную эффективность измерения (оценки) информационного параметра  $\hat{\lambda}$  на фоне негауссовской помехи с переходной ПРВ  $W_n(n_h | n_{h-1})$  по сравнению с оценкой при воздействии гауссовской помехи, для которой дисперсия  $\sigma_n^2$  и коэффициент корреляции  $r_n$  совпадают с дисперсией и коэффициентом корреляции коррелированной гауссовской помехи [19].

Напомним, что величина  $I_{\phi}^n$  зависит от вида ПРВ  $W_n(n_h | n_{h-1})$ , причем, чем больше ПРВ отличается от гауссовской, тем больше величина коэффициента  $\mu$ . Для гауссовской переходной ПРВ  $W_n(n_h | n_{h-1})$

$$I_{\phi.г}^n = \frac{[s'_{\lambda}(\hat{\lambda}, t_h) - r_n s'_{\lambda}(\hat{\lambda}, t_{h-1})]^2}{\sigma_n^2 (1 - r_n^2)}.$$

С учетом (38), (43) и полученного соотношения запишем, что при воздействии на полезный сигнал негауссовской коррелированной помехи апостериорная погрешность измерения (оценки) информационного параметра будет определяться следующим выражением:

$$\sigma_{\hat{\lambda}.к.нг}^2 \geq [\mu \text{tr}[IP]]^{-1} = \left\{ \frac{[s'_{\lambda}(\hat{\lambda}, t_h) - r_n s'_{\lambda}(\hat{\lambda}, t_{h-1})]^2}{\mu \sigma_n^2 (1 - r_n^2)} \right\}^{-1}.$$

Следовательно, как видно из полученного неравенства с увеличением отличия переходной ПРВ  $W_n(n_h | n_{h-1})$  от гауссовской, точность измеряемого (оцениваемого) параметра возрастает.

Следует отметить, что так как [14, 20]  $\mu \geq 1$ , то с учетом неравенств (41) и (42) получаем, что при воздействии коррелированной негауссовской помехи апостериорная дисперсия измерения информационного параметра  $\sigma_{\hat{\lambda}.к.нг}^2$  всегда меньше, чем апостериорная дисперсия при воздействии той же негауссовской помехи, но имеющей некоррелированный характер  $\sigma_{\hat{\lambda}.н.нг}^2$ , то есть  $\sigma_{\hat{\lambda}.н.нг}^2 \gg \sigma_{\hat{\lambda}.к.нг}^2$ .

Рассмотрим влияние величины коэффициента  $\mu$  на оценку информационного параметра на примере приведенной погрешности измерения  $\delta_{\hat{\lambda}}^2 = \sigma_{\hat{\lambda}.в}^2 / \sigma_{\hat{\lambda}.г.г}^2$ , где  $\sigma_{\hat{\lambda}.в}^2$  – апостериорная погрешность измерения

при воздействии коррелированной негауссовской помехи, описывающейся переходной ПРВ вида:

$$W(n_h | n_{h-1}) = \frac{\nu}{2\Gamma(\nu^{-1})\sigma} \left[ \frac{\Gamma(3/\nu)}{(1-r^2)\Gamma(\nu^{-1})} \right]^{0.5} \exp \left\{ - \left[ \frac{\Gamma(3/\nu)}{(1-r^2)\Gamma(\nu^{-1})} \right]^{\nu/2} \left[ \frac{|n_h - rn_{h-1}|^\nu}{\sigma^\nu} \right] \right\}, \quad (44)$$

где  $\Gamma(\cdot)$  – гамма функция.

В этом случае, информационная матрица имеет вид [18]:

$$\|I_\Phi\| = \frac{\nu(\nu-1)\Gamma(3/\nu)\Gamma\Gamma(1-\nu^{-1})}{\sigma_n^2\Gamma^2(1/\nu)(1-r_n^2)} \begin{vmatrix} 1 & -r_n \\ -r_n & r_n^2 \end{vmatrix} = A(\nu)I_{\Phi,\Gamma},$$

где  $A(\nu) = \frac{\nu(\nu-1)\Gamma(3/\nu)\Gamma\Gamma(1-\nu^{-1})}{\Gamma^2(1/\nu)}$ ;  $\nu \geq 2$  – константа, зависящая от параметра

ПРВ.

Тогда, согласно (43)

$$\mu = \frac{I_{\Phi}^n}{I_{\Phi\Gamma}^n} A(\nu) = \frac{\nu(\nu-1)\Gamma\left(\frac{3}{\nu}\right)\Gamma(1-\nu^{-1})}{\Gamma^2(\nu^{-1})}$$

Запишем выражение для приведенной погрешности в виде:

$$\delta_{\lambda}^2 = [\mu\rho]^{-1} = \left\{ \frac{\Gamma^2(\nu^{-1})}{[\nu(\nu-1)\Gamma\left(\frac{3}{\nu}\right)\Gamma(1-\nu^{-1})]\rho} \right\}$$

где  $\rho = \rho_\nu / \rho_{k,\Gamma}$ ;  $\rho_\nu$  – обобщенное ОСП при воздействии негауссовской помехи с ПРВ (44).

Напомним, что при  $\nu = 2$  ПРВ вида (44) переходит в гауссовское [18], при этом, как видно из (43),  $\mu = 1$ .

На рисунке 3 показаны зависимости, из которых видно, что на приведенную погрешность измерения информационного параметра влияет не только величина  $\rho$ , играющая роль приведенного обобщенного ОСП, но и параметр  $\nu$ , определяющий значение  $\mu$ .

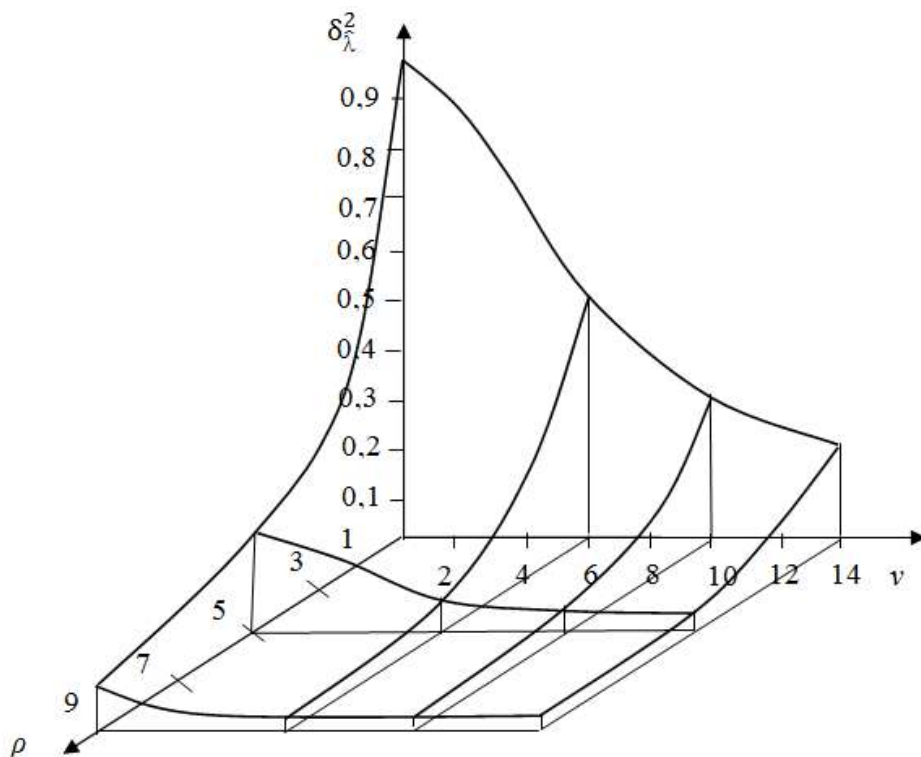


Рисунок 3 – Зависимости  $\delta_\lambda^2 = f(\nu, \rho)$

Чем больше  $\nu$  отлочно от 2 ( $\mu = 1$ ), тем меньше величина приведенной погрешности.

Повторив выше изложенные рассуждения для случая совместной оценки нескольких информационных параметров полезного сигнала на фоне коррелированной, в общем случае, негауссовской помехи, приходим к выводу, что предельная эффективность измерения (оценки) (см. (43)) в этом случае является такой же, как и при измерении одного информационного параметра. При этом необходимо помнить, что величину обобщенного ОСП, входящую в выражение, определяющее оценки нижних границ неравенства Крамера-Рао (см. (15)), как это было показано выше, необходимо рассматривать в спектральном представлении.

Таким образом, осуществлена оценка точности измерения информационных параметров полезных сигналов, несущих информацию о параметрах движения лоцируемых объектов, на фоне аддитивных, в общем случае, негауссовских помех, имеющих как коррелированный, так и независимый характер. Показано, что учет негауссовского характера воздействующей аддитивной помехи приводит к значительному повышению точности измерения параметров сигнала. Показано, что в случае коррелированной негауссовской помехи увеличение коэффициента корреляции приводит к увеличению обобщенного ОСП, что, в свою очередь, ведет к повышению точности измерения параметров.

Получены инженерные оценки информационных параметров сигнала на фоне аддитивных негауссовских помех, имеющих как коррелированный, так и

---

независимый характер, позволяющие оценить потенциальную точность и потери в измерении параметров движения при работе радиолокационных измерителей на малых расстояниях от лоцируемых объектов. Показано, что учет негауссовского характера аддитивной помехи приводит к значительному повышению потенциальной точности измерения параметров сигнала. Так, при  $\rho = 1$ ,  $T = 10 \text{ мС}$  для аддитивной помехи с  $\mu_n^2 = 2$  потенциальная точность при совместном измерении параметров сигнала увеличивается для частоты в 5 раз, для производной частоты в 10 раз, для фазы – в 2 раза. Показано, что в случае коррелированных аддитивных негауссовских помех увеличение коэффициента корреляции ведет к увеличению обобщенного ОСП, что, в свою очередь, повышает потенциальную точность измеряемых параметров.

#### *Литература*

1. Сосулин, Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: учеб. пособие для вузов / Ю. Г. Сосулин // М.: Радио и связь. – 1992.
2. Финкельштейн, М. И. Основы радиолокации / М. И. Финкельштейн // М.: Радио и связь. – 1983.
3. Журавлев, А. К., Лукошкин, А. П., Поддубный, С. С. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках / А. К. Журавлев, А. П. Лукошкин, С. С. Поддубный // Л.: ЛГУ. – 1982.
4. Родимов, А. П., Поповских, В. В. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех / А. П. Родимов, В. В. Поповских // М.: Радио и связь. – 1984.
5. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / под ред. Л. Т. Тучкова // М.: Радио и связь. – 1985.
6. Фалькови, С. Е., Хомяков, Э. Н. Статистическая теория измерительных радиосистем / С. Е. Фалькови, Э. Н. Хомяков // М.: Сов. Радио. – 1981.
7. Артюшенко, В. М. Исследование и разработка радиолокационного измерителя параметров движения протяженных объектов / В. М. Артюшенко // М.: ФГБОУ ВПО ФТА. – 2013.
8. Воловач, В. И. Методы и алгоритмы анализа радиотехнических устройств ближнего действия / В. И. Воловач // М.: Радио и связь. – 2013.
9. Ван Трис, Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции Т.1. / Г. Ван Трис // М.: Сов. Радио. – 1972.
10. Островитянов, Р. В., Басалов, Ф. А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р. В. Островитянов, Ф. А. Басалов // М.: Радио и связь. – 1982.
11. Фельдман, Ю. И., Мандуровский И. А. Теория флуктуаций локационных сигналов отраженных распределенными целями / Ю. И. Фельдман, И. А. Мандуровский // М.: Радио и связь. – 1983.
12. Тихонов, В. И. Оптимальный прием сигналов / В. И. Тихонов // М.: Радио и связь. – 1983.
13. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Т.3. / Б. Р. Левин // М.: Сов. Радио. – 1975.

- 
14. Новоселов, О. Н., Фомин, А. Ф. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем: 2-е изд., перераб. и доп. / О. Н. Новоселов, А. Ф. Фомин // М.: Машиностроение. – 1991.
  15. Тузов, Г. И. Выделение и обработка информации в доплеровских системах / Г. И. Тузов // М.: Сов. Радио. – 1967.
  16. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника: 2-е изд. перераб. и доп. / В. И. Тихонов // М.: Сов. Радио. – 1982.
  17. Валеев, В. Г. Помехоустойчивость радиотехнических измерительных систем / В. Г. Валеев // Свердловск: Изд-во УПИ. – 1987.
  18. Артюшенко, В. М. Обработка информационных параметров сигнала в условиях аддитивно-мультипликативных негауссовских помех / В. М. Артюшенко // Королев МО: Изд-во «Канцлер». – 2013.
  19. Валеев, В. Т., Сосулин, Ю. Г. Обнаружение слабых когерентных сигналов в коррелированных негауссовских помехах / В. Т. Валеев, Ю. Г. Сосулин // Радиотехника и электроника. – 1969. – т. 14. – № 2. – С. 230–238.
  20. Валеев, В. Г. Оптимальная оценка параметров сигнала при наличии негауссовских помех / В. Г. Валеев // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1974. – №2. – С. 135–146.
  21. Вайштейн, Л. А., Зубаков, В. Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех / Л. А. Вайштейн, В. Д. Зубаков // М.: Сов. Радио. – 1960.

## **Вопросы повышения эффективности алгоритмов для вычислений ударного спектра**

**И.А. Давыдов**, заместитель главного конструктора, акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники», г. Королев, Московская область

*В работе рассматриваются вопросы повышения оперативности расчета параметров ударного спектра для бортовых вычислительных средств. Представлен сравнительный анализ алгоритмов вычисления параметров ударного спектра с помощью метода цифровой фильтрации. Представлены различные методы расчета коэффициентов цифровых фильтров для получения оценки ударного спектра. Проанализировано влияние на точность оценки результатов через параметры передаточной характеристики цифрового фильтра.*

Цифровая обработка сигналов, ударный спектр, алгоритмы вычислений ударного спектра.

## **Improving the efficiency of shock spectrum computing algorithms**

**I.A. Davidov**, Public Joint –Stock Company «Scientific, Research & Production of Measuring Equipment», Korolev, Moscov region

*The research deals with issues of improving the efficiency of calculation of shock spectrum characteristic for onboard computing facilities. The work represents a comparative analysis of algorithms for calculating parameters of the shock spectrum by the method of digital filtering. The work represents various methods for calculating the coefficients of digital filters for evaluating shock spectrum. The work analyses influence on the accuracy of the evaluation by means of the parameters of the transfer characteristic of the digital filter.*

Digital signal processing, shock spectrum, algorithms for calculating the shock spectrum.

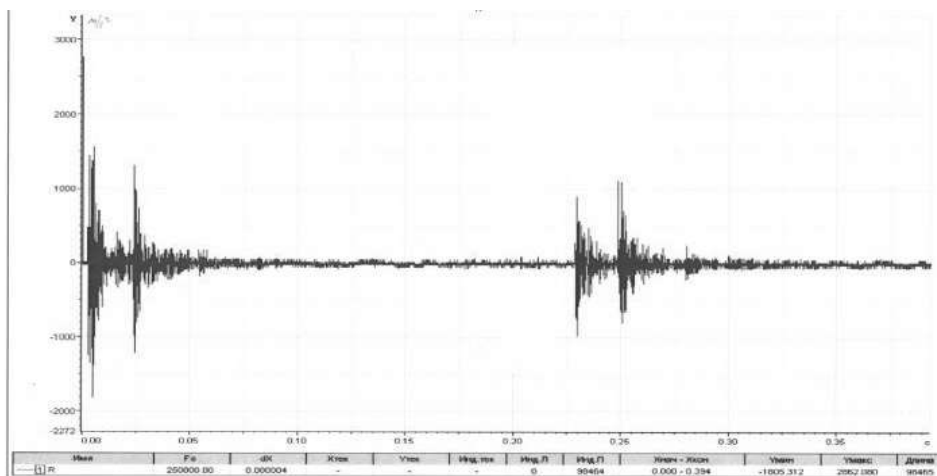
Возрастающая сложность задач при проектировании средств выведения изделий ракетно-космической техники (РКТ) тесно увязана с необходимостью получения большого объема информации о состоянии элементов конструкции (уровень вибраций, удары, запас прочности и т.д.) при проведении летно-конструкторских испытаний (ЛКИ). В общем числе показателей механических нагружений особое место занимают измерения на виброударные воздействия, которые могут привести к фатальному результату миссии при выполнении задач по доставке полезной нагрузки.

Широкое использование пиротехнических средств в качестве активных элементов для систем разделения ступеней, отделения РБ, орбитальных или исследовательских аппаратов, приводит к необходимости осуществления досто-

верного и оперативного контроля за этими процессами. Особенностью этих процессов, создающие виброударные нагрузки, в отличие, например, от нагрузок при стыковке или посадке элементов КА практически не приводят к изменению скорости центра масс объекта, подверженного воздействию [1]. Тем не менее, опасность воздействия на полезную нагрузку в процессе срабатывания пиротехнических средств обусловлена характером распространения виброударных нагрузений от места их срабатывания и созданием условий для выхода из строя высокотехнологического оборудования из состава полезной нагрузки (аппараты связи и телекоммуникации, ретрансляции и т.п.).

Несмотря на достаточный объем наземной отработки на ударное воздействие макета полезной нагрузки (моделирования и экспериментальных данных, полученных на испытательном стенде) стоит отметить наличие расхождений с данными, полученными во время проведения летного эксперимента.

На рисунке 1 представлена диаграмма ударных процессов при срабатывании пиропатронов, измеренная с помощью пьезоакселерометра 2221F (f.ENDAVCO) и устройства УСО-БМП. У (разработки ОАО «НПО ИТ») на адаптере фирмы SAAB, в радиальном направлении при испытании РН «Зенит- SLB» 05.10.2011 г. Данные получены во время отделения среднего переходника от РБ ДМ SLB.



**Рисунок 1 – Диаграмма четырех ударных процессов**

Вопросы получения достоверных данных о БМП на этапе работы ступеней РКН средствами телеметрии решаются в реальном времени путем непосредственной передачи данных через радиоканал бортовой системы телеизмерений РН. Однако, передача данных о БМП затруднена на этапе работы РБ или орбитальных блоков и связана со снижением пропускной способности канала передачи данных с борта.

Путей решений проблемы может быть несколько:

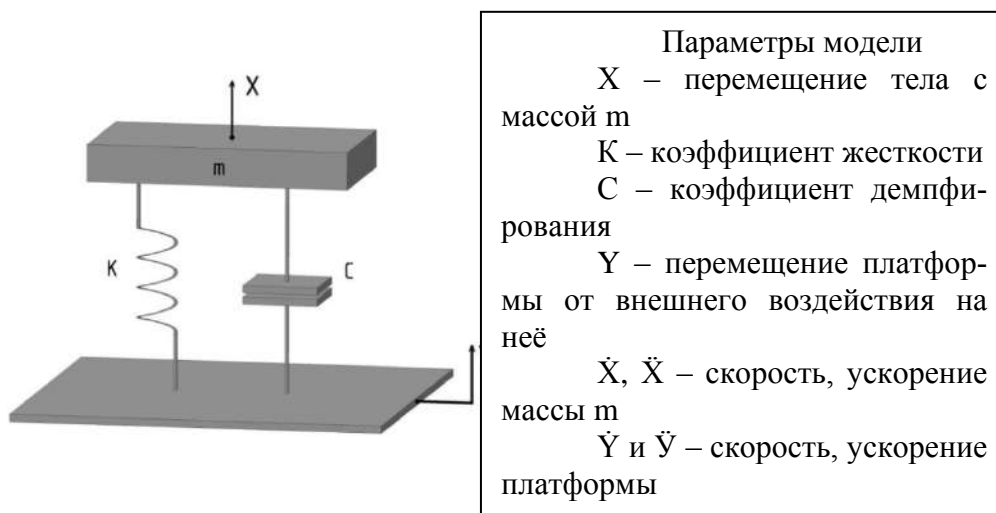
1. передача только наиболее существенных параметров на данном участке работы РБ,

2. передача данных об активных участках измерения существенных параметров в течение длительного времени,
3. решение вопросов введения бортовой обработки данных о БМП с выдачей результатов обработки,
4. применение алгоритмов обратимого и необратимого сжатия,
5. применение адаптивных методов обратимого сжатия данных

ТМИ, разработанных с учётом структуры, а так же с учётом вычисляемых в реальном времени статистических характеристик кодируемого потока данных.

Предлагаемый метод базируется на алгоритмерасчета ударного спектра с помощью минимизации вычислительных затрат при использовании цифровой фильтрации.

Согласно определению, ударный спектр представляет зависимость пиковых откликов ряда резонаторов, возбуждаемых рассматриваемым ударным воздействием, от собственных частот резонаторов [2]. Методика расчета ударного спектра предполагает разработку модели, включающую набор осцилляторов с одной степенью свободы и параметрами собственной частоты и добротности. В качестве одиночной модели на рисунке 2 представлена простая система, обладающая одной степенью свободы. Итоговая модель объединяет на единой платформе ряд осцилляторов ссосредоточенными параметрами.



**Рисунок 2 – Простая система (осциллятор) для моделирования ударных воздействий с одной степенью свободы (вертикальная ось)**

Расчетные значения собственных частот  $\omega_i$  и добротностей  $Q_i$  (коэффициентов затухания –  $\xi$ ) для каждого из осцилляторов связаны с параметрами модели следующими соотношениями:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{и} \quad Q_i = \frac{\sqrt{km}}{c} = \frac{1}{2\xi} \quad (1)$$



Выражение для описания поведения осциллятора, представленного на рисунке 2 с учетом равенства нулю итоговой суммы сил, действующих в системе, можно записать в форме следующего выражения:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{y} + ky \quad (2)$$

Для определения комплексного коэффициента передачи системы, воспользовавшись преобразованием Лапласа при нулевых начальных условиях, получаем следующее выражение:

$$K(s) = \frac{cs+k}{ms^2+cs+k} \quad (3)$$

Для расчета относительного перемещения допустима замена переменных:  $z = x - y$

В этом случае выражение (3) записывают:

$$K(s) = \frac{1}{ms^2+cs+k} \quad (3A)$$

Аналогом дифференциального уравнения второго порядка (2) является следующее уравнение в конечных разностях для дискретных систем:

$$x(kT) = \beta_0 y(kT) + \beta_1 y(kT-T) + \beta_2 y(kT-2T) - \alpha_1 x(kT-T) - \alpha_2 x(kT-2T) \quad (4)$$

Передаточная характеристика цифрового фильтра для уравнения в конечных разностях (4) имеет вид:

$$H(z) = \frac{\beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \beta_2 z^{-2}}{1 + \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2}} \quad (5)$$

где  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты фильтра,  $z^{-i}$  – оператор задержки.

Для расчета коэффициентов цифрового фильтра применяется метод, использующий принцип инвариантности импульсных характеристик для аналогового и цифрового фильтров. В источниках [4] и [5] при расчетах используются методы прямого и обратного преобразований Лапласа и z-преобразование. Опустив подробные выкладки и преобразования окончательно выражения для коэффициентов цифрового фильтра записывают в следующем виде [4]:

в соответствии с [4]:

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= 1 - \exp(-A) \sin(B) / B, \\ \beta_1 &= 2\exp(-A) [\sin(B)/B - \cos(B)], \\ \beta_2 &= \exp(-2A) - \exp(-A) \sin(B)/B, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -2\exp(-A) \cos(B), \\ \alpha_2 &= \exp(-2A), \\ \text{где } A &= \omega_n T / (2Q), \quad B = \omega_n T [1 - 1/(4Q^2)]^{0.5} \end{aligned} \quad (7)$$

Или в соответствии с [5]

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= 2 \exp(-\xi \omega_n T) \cos(\omega_d T), \\ \beta_1 &= -\exp(-2\xi \omega_n T), \\ \beta_2 &= \beta T, \\ \alpha_1 &= T \exp(-\xi \omega_n T) \{ \alpha \sin(\omega_d T) - \beta \cos(\omega_d T) \}, \\ \alpha_2 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $\alpha = (\omega_d^2 - \omega_n^2 T) / \omega_d$  и  $\beta = (2\xi \omega_d \omega_n) / \omega_d$

Для предлагаемого к рассмотрению варианта расчета коэффициентов применим метод инвариантного преобразования используя замену:

$$\frac{1}{s-s_i} \longrightarrow \frac{T}{1-e^{s_i T} z^{-1}} \quad (9)$$

где  $s_i$  – полюса частотной характеристики аналогового фильтра.

После преобразований (3) получаем частотную характеристику цифрового фильтра

$$H(z) = \frac{T e^{-\xi \omega_n T} \sin(\omega_s T) z^{-1}}{\omega_s [1 - 2e^{-\xi \omega_n T} \cos(\omega_s T) z^{-1} + e^{-2\xi \omega_n T} z^{-2}]} \quad (10)$$

при  $\omega_s = \omega_n (1 - \xi^2)^{0.5}$

Коэффициенты цифрового фильтра в (10)  $\beta_2$  и  $\beta_0$  равны нулю.

$$\begin{aligned} \beta_1 &= T e^{-\xi \omega_n T} \sin(\omega_s T), \\ \alpha_1 &= 1 - 2e^{-\xi \omega_n T} \cos(\omega_s T), \\ \alpha_2 &= e^{-2\xi \omega_n T} \quad (11) \end{aligned}$$

Обобщенные сведения для расчетов коэффициентов цифровых фильтров по рассмотренным методам представлены в таблице 1.

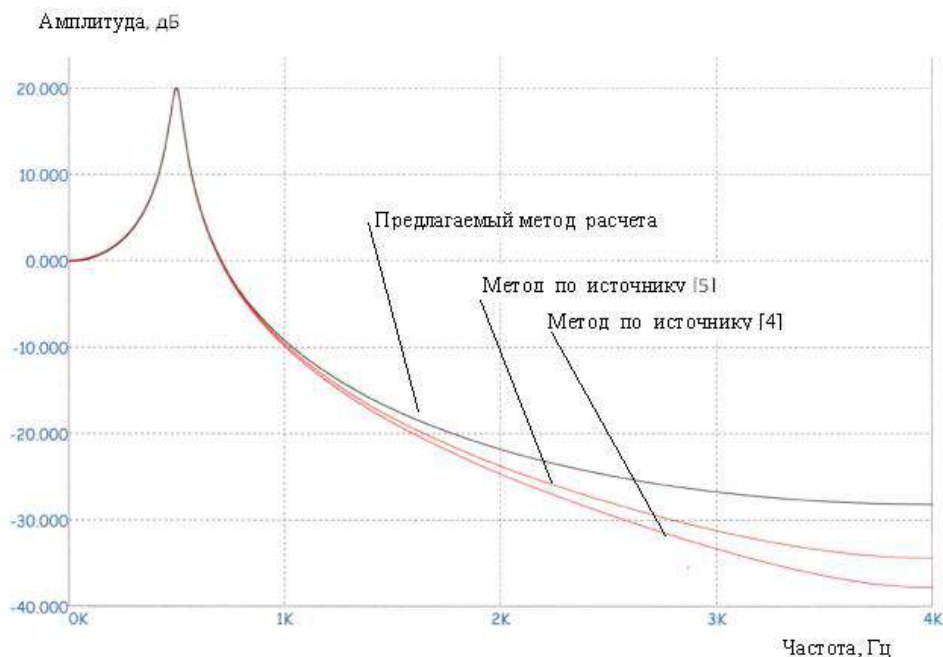
Таблица 1

## Значения коэффициентов для цифрового фильтра звена второго порядка (колебательный контур) по методам расчета

№	Коэф- фициент	ISO 18431-4 (интеграл свертки)	Инвариантное преобразование импульсной характеристики	By Tom Irvine
1	$\beta_0$	$1 - \exp(-A) \sin(B)/B$	0	$2A$
2	$\beta_1$	$2 \exp(-A) (\sin(B)/B - \cos(B))$	$B \exp(-A) \sin(B) / (\omega_s)^2$	$A \exp(-A) [(\omega_n/\omega_s) (1 - 2 \xi^2) \sin(B) - 2 \xi \cos(B)] / \xi$
3	$\beta_2$	$\exp(-2A) - \exp(-A) \sin(B)/B$	0	0
4	$\alpha_1$	$-2 \exp(-A) \cos(B)$	$-2 \exp(-A) \cos(B)$	$-2 \exp(-A) \cos(B)$
5	$\alpha_2$	$\exp(-2A)$	$\exp(-2A)$	$\exp(-2A)$
6	Примечание	$A = \omega_n T_s / (2Q) = \omega_n T_s \xi$ $B = \omega_n T_s \sqrt{1 - 1/(4Q^2)} = \omega_s T_s$	$\omega_s = \omega_n (1 - \xi^2)^{0,5}$ $\xi = (2Q)^{0,5}$	$\xi$ -коэффициент демпфирования, Q-добротность

Частотные характеристики для трех рассмотренных вариантов цифровых фильтров, рассчитанных для частоты дискретизации  $f_a = 8 \text{ кГц}$ , собственной частоты

ты осциллятора  $f_n=500$  Гц и добротности  $Q=10$ , представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Частотные характеристики для различных вариантов**

Как видно из представленных характеристик отличия в полосе резонанса у всех трех фильтров незначительны. Расхождения начинаются за пределами значений удвоенной собственной частоты.

Выводы: для достижения большей результативности (быстродействия) работы бортовых вычислительных ресурсов (в программной части) или меньших аппаратных затрат (при реализации в программируемой логике) наиболее целесообразным является применение цифрового фильтра с наименьшим количеством коэффициентов отличных от нуля.

#### *Литература*

1. Комаров, И. С. Наземная экспериментальная обработка изделий ракетно-космической техники на ударное воздействие от пиротехнических средств разделения / И. С. Комаров // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 71.
2. ГОСТ 8.127-74 ГСОЕИ. Измерения параметров ударного движения. Термины и определения.
3. Tuma, J., Babiuch, M., Koci, P. Calculation of shock response spectra. ActamontanisticaSlovaca.R.16 (2011). – с.1, 66-73.
4. ISO 18431-4, 2007, Mechanical vibration and shock – Signal processing – Part 4: shock response spectrum analysis.
5. T. Irvine. An introduction to the shock response spectrum. Revision S. July 2012.

## **Живучесть и устойчивость информационных систем предприятий сложной структуры**

**Д.М. Двоглазов**, аспирант,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Исследованы вопросы живучести и устойчивой работы организаций сложной структуры в условиях воздействия внешних рисков, рассмотрены алгоритмы управления и модели адаптации рисков. Определены основные характеристики живучести: характеристика безотказности, вероятность гибели компонента системы, интенсивность гибели компонентов, частота гибели систем  $\alpha$ , среднее время сохранности (целостности) компонента системы. Рассмотрены внешние риски работы предприятий сложной структуры.*

*Определена качественная оценка устойчивости и непрерывности системы в условиях внешних рисков. В статье раскрыты следующие алгоритмы управления рисками: традиционный алгоритм управления рисками, алгоритм принятия решений при системном управлении, алгоритм принятия решений при социально-этическом управлении, алгоритм принятия решений при стабилизационном управлении. Рассмотрены модели адаптации предприятий сложной структуры к внешним рискам. Предложена модель асимптотической устойчивости организаций сложной структуры при воздействии внешних рисков.*

Живучесть организаций, устойчивость информационных систем, обработка информации, внешние риски, принятие решений, организации сложной структуры, время сохранности, характеристика безотказности, вероятность гибели.

### **The persistence and stability of the information system in complex structure organization**

**D.M. Dvoeglazov**, graduate student of Financial-Technology Academy,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*The issues of survivability and stable operation of the complex structure of the organizations under the impact of external risks are considered control algorithms and model adaptation risks. The main characteristics of vitality: the characteristic of reliability, the probability of a system component death, the intensity of the components death, the frequency of systems loss, the average time of preservation (integrity) of the component system. Considered external risks of the complex structure organization.*

*Defined qualitative evaluation of stability and continuity of the system in terms of external risks. In the article the following algorithms of risk management :*

---

*the traditional algorithm of risk management, decision making algorithm for the management of the system , the algorithm of decision-making in social and ethical governance, decision-making algorithm for the stabilization control. The models of the complex structure of enterprises to adapt to external risks . A model of the asymptotic stability of the complex structure of the organizations under the influence of external risks.*

The survival of the organizations, the sustainability of information systems, information processing, external risks, decision making, organization of complex structures, preservation, characterization, reliability, probability of death.

Оценивать надежность при условии воздействия внешних рисков становится актуальным для относительно сложных информационных систем, в которых предельные воздействия губительны, если при проектировании не предусматривать элементную избыточность и резервирование. Живучесть является той категорией надежности, которая позволяет определять жизнестойкость информационных систем на уровне их структуры как на этапе проектирования, на этапе разработки, так и в конце срока службы.

Формирование сферы, условий применения живучести, как еще одной из категорий надежности, критериев ее оценок становится все чаще востребованным не только в технических, но и в информационно-технологических, коммуникационных системах, где необходимо разрабатывать критерии оценки живучести [3].

Решению данной задачи будет способствовать систематизация условий применения и критериев оценок живучести в информационных системах.

Расширение сферы применения оценок живучести, происходящее в последние годы, объясняется рядом объективных последствий жизнедеятельности человека и вытекающих из них внешних рисков, к важнейшим из которых относятся:

- ухудшение экологической обстановки на макро- и микро-уровнях;
- усиление экстремистских тенденций (этнических, социальных и других конфликтов);
- потепление климата, приводящее к природным катаклизмам;
- проявление рядом стран экономического авантюризма, диктата (глобализм, антиглобализм и т.д.) в отношениях с остальным миром.

Избежать воздействий такого рода, равно как ударов судьбы, невозможно. Первым шагом к их адаптации является оценка жизнестойкости объекта, живучести систем в условиях, по возможности близких к экстремальным, с тем, чтобы далее выработать рекомендации для повышения их живучести.

Определение. Живучесть – способность комплекса, системы продолжать выполнение хотя бы части своих функций после воздействия на целостность системы внешних рисков (неблагоприятных факторов) [5].

В отличие от других категорий надежности, в живучести определяющим понятием является функционирование – полное или частичное (ограни-

---

ченное, ущемленное). Ограничение функций происходит либо вследствие внешних воздействий на структуру (потери части структуры), либо из-за отказов компонентов системы.

Рассмотренная в статье модель асимптотической устойчивости предприятий сложной структуры при воздействии внешних рисков нацелена на функционирование предприятий в следующих условиях преднамеренных и случайных воздействий внешних рисков: от конкурентов, при возникновении чрезвычайных ситуаций, климатических регулярных воздействий.

Замкнутые системы, описываемые линейными функциями строго, либо с некоторым допущением нелинейности, могут оказываться в тех или иных проявлениях неустойчивости чаще всего вследствие не внешних воздействий, а из-за изменений параметров, внутренних связей, т.е. вследствие внутренних причин.

Всякие проявления неустойчивости снижают работоспособность сложной системы управления.

**Определение характеристик живучести.** Живучесть, оценивающая критические возможности технических, информационно-технологических систем, заимствует из теории надежности характеристики безотказности невосстанавливаемых изделий или оборудования разового применения, с уточнением смыслового содержания характеристик, исходя из нового определения живучести применительно к сложным системам.

Характеристику безотказности  $P(t)$  – вероятность безотказности за интервал  $(0 - t)$  от начала функционирования – в живучести следует интерпретировать как *вероятность целостности*, сохранности компонента системы (не смешивая с понятием сохраняемости, характеризующим одноименную категорию надежности).  $P(t)$  – убывающая функция от значений, близких к 1 (для высоконадежных изделий) к концу периода приработки. Далее она плавно уменьшается до 0 к моменту гибели компонента системы. Однако с момента приработки функция  $P(t)$  локально возрастает до отмеченного значения по мере «выгорания» ненадежных компонентов.

Статистически  $P(t)$  определяется по формуле

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (1)$$

где  $N_0$  – число изделий, поставленных на испытания;  $n(t)$  – число изделий, отказавших за время испытаний  $t$ .

Вероятности отказа  $Q(t)$  в живучести соответствует *вероятность гибели* компонента системы.

Для систем с избыточностью или резервированием компонентов вероятность целостности превышает вероятность безотказности системы.

Нормируемым характеристикам – интенсивности отказов  $\lambda(t), 1/i$ , устанавливаемой для элементов радиоэлектроники и других невосстанавливаемых изделий автоматики, а также частоте отказов  $a(t)$ , определяемой для оборудования разового применения, – в живучести соответствуют *интенсивность гибели* компонентов  $\lambda(t)$  и *частота гибели* систем  $a(t)$ . Эти характеристики определяются к моменту  $t$  числом отказавших за интервал  $\Delta t$  изделий  $n(t)$ , деленных на произведение среднего числа исправных на этом интервале изделий  $N^*(t)$  и

---

длительности интервала  $\Delta t$ , ч.:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N^*(t)\Delta t}. \quad (2)$$

Здесь  $N^*(t)$  исчисляется, как среднее на интервале  $\Delta t$ , слева и справа относительно  $t$ , которое расположено в центре интервала.

Среднему времени безотказности  $T$  в живучести соответствует *среднее время сохранности* (целостности) компонентов систем.

Статистически  $T$  определяется отношением суммы времен сохранностей  $\sum T_i$   $i$  –  $x$  однотипных компонентов (систем) в процессе испытаний, отсчитанных от начала испытаний до моментов их отказов, к числу  $n$  – отказавших компонентов (систем):

$$T = \frac{\sum T_i}{n}. \quad (3)$$

**Внешние риски работы предприятий сложной структуры.** В системах автоматического управления понятие «устойчивость» адекватно понятию работоспособности, т.е. обеспечению работоспособности сложной системы, функционирующей при воздействии внешних рисков, к которым можно отнести условия преднамеренного воздействия всех средств конкурента в направлении нанесения ущерба, поражения, приведения объекта управления в нерабочее состояние, например банкротства и т.п.; условия чрезвычайных ситуаций, вызванных как природными явлениями, экономическими изменениями среды, так и провокационными действиями конкурента на рынке; а также при климатических и других регулярных воздействиях, снижающих надежность оборудования (технических средств) и ухудшающих его эксплуатационные характеристики.

Таким образом, для организаций сложной структуры, работающих в конкурентной среде, под *устойчивостью* понимается комплексное свойство системы (объекта управления (ОУ) и его системы управления (СУ)), характеризующееся следующими показателями:

*живучестью* – способностью системы выполнять задачи в условиях преднамеренного воздействия всех средств поражения от конкурентов;

*стабильностью* – способностью системы выполнять задачи в условиях (в обстановке) чрезвычайных ситуаций;

*надежностью* – способностью системы выполнять задачи, поддерживая работоспособность и качество функционирования в течение заданного времени (в течение наработки).

Рассмотрим еще одно свойства сформулированной задачи – *непрерывность* (повторяемость). Часто непрерывность относят к способности системы управлять объектом, т.е. к характеристике управления. Относя непрерывность к свойству всей системы, представляется очевидным рассматривать непрерывность как повторяемость по циклам функционирования. Непрерывность в таком толковании хорошо согласуется с комплексным свойством устойчивости.

В самом деле, устойчивая система (т.е. жизнестойкая к преднамеренным воздействиям на поражение, стабильная в условиях чрезвычайных ситуаций и не утратившая первоначальные качества в процессе эксплуатации), чтобы оста-



---

ваться устойчивой далее, должна быть готова противостоять неблагоприятному набору воздействий повторно, в третий, четвертый до своего предельного состояния (физического, морального и т.п.). Именно благодаря свойству непрерывности система после цикла испытаний возвращается в исходное состояние, оказываясь готовой к новым испытаниям [4].

В автоматических системах непрерывность обеспечивается замыканием системы с выхода на вход петель обратной связи.

**Качественная оценка устойчивости и непрерывности системы в условиях внешних рисков.** Рассматривая устойчивость системы как реакцию ее на внешние риски, следует вначале сравнить между собой последствия этих рисков на систему качественно.

По своему характеру внешние риски, такие как преднамеренные воздействия на систему со стороны конкурентов, оказываются, как правило, нетривиальными (нетипичными), так как конкурент здесь проявляет изобретательность, чтобы малыми средствами и внезапно нанести уничтожающее поражение объекту системы. Преднамеренные воздействия обычно не самые сильные среди других воздействий, но самые опасные, поскольку, когда покушаются на живучесть системы, то воздействуют на наиболее чувствительные связующие звенья сложной структуры. Последствия этих воздействий следует оценивать показателями живучести сложной системы.

Воздействия на систему в условиях чрезвычайных ситуаций относятся по своему характеру к сильным и разрушительным, подобно стихийным бедствиям, которые тоже относятся к ЧС, подвергают испытанию жизнестойкость, выживаемость системы. Поэтому последствия от ЧС-воздействий и защиту от них сложной системы следует определять на основе показателей живучести.

Внешние систематические воздействия на эксплуатируемые технические средства, оборудование, а также целая система мероприятий по предупреждению и защите объектов от этих воздействий исследованы и разработаны теорией надежности [2]. Математический аппарат этой теории достаточно развит, и только на основе данного аппарата в настоящее время оказывается возможным разрабатывать модели устойчивых сложных, а также непрерывных, т.е. долговременно функционирующих систем в среде с повышенной опасностью.

Как известно, общей теории живучести пока не существует, до сих пор в этом не было крайней необходимости, поскольку многие выводы и рекомендации о повышении живучести технических систем можно выполнить на основе теории надежности.

Что касается стабильности (свойство, противостоящее чрезвычайным ситуациям), здесь многое приходится исследовать, что-то заимствовать из новых теорий, например, из теории бифуркаций или теории катастроф, которые усиленно развиваются в последние годы вследствие повышенного запроса. Однако следует заметить, что трудно ожидать появления в ближайшие годы общей теории катастроф, так как эта теория должна описывать очень широкий спектр приложений. Сейчас известно, что многие явления чрезвычайных ситуаций поддаются моделированию с помощью разрывных функций, изучаемых в специальных разделах математики [1].

---

**Алгоритмы управления рисками.** Разработка специальных алгоритмов по управлению внешними рисками в организациях сложной структуры обеспечит необходимый уровень качества принятых решений, снизит роль субъективных факторов.

Для каждой из типичных ситуаций по воздействию внешних рисков разрабатывается конкретный алгоритм принятия решений.

Рассмотрим алгоритмы различных типов управления внешними рисками [2].

Традиционный алгоритм управления рисками будет включать в себя следующие операции:

- обнаружение риск – проблемы;
- сбор информации об источниках, особенностях вредных факторов, уязвимости объекта риска, порожденных воздействием вредных факторах последствиях и ущербах;
- отображение этой информации в удобном для анализа виде;
- анализ этой информации о рисках, уязвимости объекта, возможной тяжести ущерба, определение целей управления рисками.

Алгоритм принятия решений при системном управлении может включать следующие операции:

- контроль и обнаружение риск-проблемы;
- сбор информации;
- отображение информации в удобном для анализа виде;
- анализ информации о рисках в организации;
- исследование соотношений рисков отдельных элементов системы;
- исследование соотношений рисков различной физической природы;
- исследование соотношений частоты и тяжести рисков от дельных элементов;
- генерация перечня возможных управляющих воздействий по отношению к каждому из рисков каждого элемента системы и прогноз эффективности этих воздействий для более высокого иерархического уровня – уровня системы;
- оценка и верификация вариантов решений;
- принятие, оформление и доведение до исполнителей, исполнение, контроль выполнения решений.

Алгоритм принятия решений при ситуационном управлении может включать следующие операции:

- обнаружение (контроль) риск-проблемы;
- сбор информации о рисках, вредных факторах, уязвимости в конкретной ситуации;
- отображение информации в удобном для анализа виде;
- анализ информации о рисках ситуации (источники, объекты риска; возможные управляющие воздействия; прогноз их эффективности);
- диагностика проблемы и ранжирование рисков ситуации;
- определение целей управления риском в конкретной ситуации с учетом располагаемых ресурсов;

- 
- разработка критерия оценки эффективности управления рисками в конкретной ситуации;
  - верификация и оценка вариантов риск-решений;
  - принятие, оформление, доведение до исполнителей, исполнение, контроль выполнения решений.

Алгоритм принятия решений при социально-этическом управлении. Суть этого типа управления в недопущении катастрофического воздействия на организацию.

Один из возможных вариантов такого специального алгоритма принятия риск-решений включает:

- сбор информации относительно: источников риска, их физической природы, частоты, состояния и уязвимости объекта управления, располагаемых управляющих воздействий, пара метров недопустимых состояний объекта управления;
- анализ этой информации;
- диагностика риск-проблемы;
- определение целей управления при решении проблемы;
- разработка критерия оценки катастрофического (недопустимого) состояния;
- разработка критерия оценки эффективности управления рисками;
- генерация перечня возможных управляющих риском воздействий;
- прогноз последствий каждого из управляющих риском воздействий;
- оценка того, являются ли допустимыми последствия при каждом из располагаемых воздействий;
- если последствия управляющего риском воздействия не являются допустимыми, то такое воздействие исключается из множества рассматриваемых;
- если последствия управляющего риском воздействия признаны допустимыми, то оно относится к множеству рассматриваемых управляющих воздействий;
- разрабатывается критерий оптимальности принимаемого решения по управлению риском;
- верификация и оценка вариантов решений;
- из множества рассматриваемых решений выбирают наилучшее в соответствии с принятым критерием оптимальности;
- оформляют принятое решение;
- доводят принятое решение до исполнителей или соответствующих органов управления;
- исполняют решение;
- контролируют, изменяются ли, и если изменяются, то насколько критически, параметры недопустимых состояний объекта управления;
- если имеет место критическое изменение параметров недопустимых состояний объекта, то возвращаются к реализации п.1 настоящего алгоритма.

Алгоритм принятия решений при стабилизационном управлении может включать следующие операции:

- обнаружение риск-проблемы;
- сбор информации об изменении параметров риска;

- исследование динамики изменения состава и величин параметров риска объекта управления;
- оценка времени, имеющегося в распоряжении, на выполнение операций управления риском (то есть времени, в течении которого объект управления еще будет находиться в управляемом состоянии с вероятностью не менее заданной);
- распределение времени на операции подготовки, принятия и исполнение решений с целью обеспечения риска объекта управления на приемлемом уровне с вероятностью не менее заданной;
- системный анализ информации о рисках;
- диагностика риск-проблемы;
- определение целей управления риском при решении;
- проблемы;
- генерация перечня возможных управляющих риском воздействий;
- прогноз последствий (ухудшение или улучшение риск-ситуации) при их применения;
- определение рациональной интенсивности управляющих риском воздействий, обеспечивающих нужную тенденцию изменения риска;
- принятие, оформление, доведение до исполнителей, контроль выполнения и времени выполнения решений.

Рассмотренные алгоритмы могут изменяться в соответствии со спецификой конкретной ситуации, для решения конкретных задач с использованием того или иного типа управления [2].

**Модели адаптации предприятий сложной структуры к внешним рискам.** Обращаясь непосредственно к выбору и обоснованию количественной оценки устойчивости и непрерывности сложной информационной системы, в качестве предварительной оценки используем статистический обобщенный показатель – коэффициент исправной работы  $K_{и}$  (в теории надежности ему адекватен коэффициент готовности  $K_{г}$ ) – вероятность того, что система будет функционировать (выполнять задачи) в любой произвольно выбранный момент времени  $t$ .

Если  $t_i$  – интервал исправной работы системы между  $(i - 1)$ -м и  $i$ -м вынужденными простоями, то статистически  $K_{и}$  вычисляется по формуле

$$K_{и} = \frac{\sum t_i}{t_3}, \quad (6)$$

где  $t_3$  – общая продолжительность эксплуатации системы (календарное время эксплуатации).

Дополнительно к коэффициенту  $K_{и}$  рассчитывается коэффициент вынужденного простоя системы (с учетом обозначенных ранее условий)  $K_{п}$ :

$$K_{п} = 1 - K_{и}. \quad (7)$$

Далее следует найти формулу расчета коэффициента устойчивости и непрерывности работы сложной системы.

Известно, что в технической управляемой системе, содержащей ОУ и СУ в своей структуре, коэффициент передачи  $K$  уменьшается в  $(1+K)$  раз вследствие замыкания системы петлей обратной связи для обеспечения автоматиче-

---

ского режима работы по сравнению с коэффициентом передачи  $K$  в разомкнутой неавтоматической системе.

Ранее утверждалось, что непрерывность как повторяемость обеспечивается в системе замыканием петель обратной связи с ее выхода на вход. Естественно поэтому ожидать, что коэффициент исправной и непрерывной работы управляемой сложной системы  $K_{и.п}$  после ее замыкания петель обратной связи, т.е. образования защищенной замкнутой системы с СУ-подсистемой управления в своем составе станет меньше в  $(1+K_пK_и)$  раз по сравнению с коэффициентом  $K_и$  для устойчивой, но разомкнутой системы. Таким образом, имеем

$$K_{и.п} = K_и / (1 + K_п K_и). \quad (8)$$

Здесь роль коэффициента передачи  $K$  выполняет коэффициент устойчивости – по определению.

Однако в знаменателе выражения (8) для  $K_{и.п}$ , в отличие от эквивалентной формулы для коэффициента передачи автоматической технической системы, в замкнутой производственно-технической системе роль этого коэффициента выполняет величина  $K_п(1-K_п)$ , отражающая собой все дестабилизирующие систему факторы, которые СУ своим управлением (способами, техническими средствами) должна компенсировать, защитив тем самым от них всю систему.

**Модель асимптотической устойчивости предприятий сложной структуры при воздействии внешних рисков.** Далее рассмотрим модель управления предприятием сложной структуры, которая нацелена на функционирование в следующих условиях преднамеренных и случайных воздействий внешних рисков: от конкурентов, при возникновении чрезвычайных ситуаций, климатических регулярных воздействий.

Замкнутые системы, описываемые линейными функциями строго, либо с некоторым допущением нелинейности, могут оказываться в тех или иных проявлениях неустойчивости чаще всего вследствие не внешних воздействий, а из-за изменений параметров, внутренних связей, т.е. вследствие внутренних причин.

Всякие проявления неустойчивости снижают работоспособность сложной системы управления. В таких системах внешние риски, сколь бы сильными они ни оказывались (например, воздействия ЧС), вызывают лишь пропорциональные отклонения управляемой величины от устойчивого значения, не нарушая устойчивость системы в целом по окончании воздействия.

Зато даже малые изменения чувствительных параметров, внутренних связей между звеньями могут лавинообразно нарушить устойчивость системы, привести к потере работоспособности. Возникает задача по исследованию асимптотической устойчивости СУ при изменении чувствительного параметра функции управления [5].

Функции управления объектом имеют вид

$$K_{и.п}(t) = \frac{K_и}{1 + K_п K_и} \text{ (для общего случая СУ с ОС),}$$

$$K_{и.п}(t) = \frac{(K_и - K_п^2)}{(1 + K_п K_и - K_п^3)} \text{ (для конкретной СУ, изображенной на рисунке).}$$

В этих выражениях имеются два параметра, связанные между собой за-

$$\begin{aligned} K_{и} &= 1 - K_{п}, \\ 0 < K_{и} &\leq 1, \\ 0 \leq K_{п} < K_{и} &\leq 1. \end{aligned}$$

Параметр  $K_{и}$  определяет качество функционирования СУ (в дальнейшем независимая переменная  $x$ ).

Поскольку  $K_{п}$  отражает отрицательные свойства управления предприятием, необходимо исследовать динамику функции  $K_{и,п}(t)$  при изменении параметра  $K_{и}$ , т.е.  $\frac{dK_{и,п}}{dK_{и}}$ .

Для этого нужно исследовать пробную функцию  $y = -\ln\left(\frac{x}{1+ax}\right)$ .

Возьмем производную  $y'$  по  $x$ :

$$\begin{aligned} \left(-\ln\left(\frac{x}{1+ax}\right)\right)' &= -(\ln x - \ln(1+ax))' = \\ &= -\left(\frac{1}{x} - \left(\frac{a}{1+ax}\right)\right) = -\frac{1+ax-ax}{x(1+ax)} = -\frac{1}{x(1+ax)}. \end{aligned}$$

Окончательно получим

$$\left(-\ln\left(\frac{x}{1+ax}\right)\right)' = -\frac{1}{x(1+ax)},$$

$$\text{иначе } \left(\ln\left(\frac{x}{1+ax}\right)^{-1}\right)' = (x(1+ax))^{-1}. \quad (9)$$

Учитывая области изменения  $a$ ,  $x$ , в частности, что  $x \neq 0$ , можно сделать следующее допущение:

$$\left(\ln\left(\frac{x}{1+ax}\right)^{-1}\right)' = \ln\left(\frac{x}{1+ax}\right).$$

Теперь уравнение (9) запишется в виде

$$\ln\left(\frac{x}{1+ax}\right) = (x(1+ax))^{-1}. \quad (9a)$$

По определению натурального логарифма (9a) можно записать выражение

$$x/(1+ax) = \exp(x(1+ax))^{-1}.$$

Окончательно получим

$$\frac{x}{(1+ax)} = \exp\left(\frac{x}{(1+ax)}\right). \quad (10)$$

В выражении (10) в динамике изменений  $x$  имеем справа асимптотическую экспоненту Ляпунова, в которой  $1/(1+ax)$  есть показатель Ляпунова, а  $(1+ax)$  определяет горизонт устойчивости по Ляпунову.

---

Опираясь на эргодическую теорему и распространяя исследование устойчивости СУ (функции, ее описывающей) при изменении параметра  $K_n$  (переменной  $x$ ) на получение ожидаемой устойчивости системы во времени, математически из последнего выражения (10) получается функция

$$y = e^{t/\tau}, \quad (11)$$

где  $\tau = (1+at)$  – время Ляпунова;  $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{1+at}$  – показатель Ляпунова, определяющий эволюцию функции СУ.

В общем случае, как и в исследуемом случае, функция (11) Ляпунова описывает асимптотическую устойчивость сложных систем (в том числе хаотических) во времени (в эволюции). В системах с положительным показателем Ляпунова, как в данном случае  $\frac{1}{(1+ax)} > 0$ , может образоваться странный аттрактор, т.е. сложиться при стечении неблагоприятных обстоятельств механизм, выводящий систему из равновесия.

Время Ляпунова  $\tau = 1+at$  определяет горизонт, до которого хаотическая система еще управляема, ее параметры прогнозируемы, чего нельзя гарантировать по прошествии  $\tau$ . Поэтому в системах внутренне деструктивных, подверженных хаосу, время Ляпунова определяет быстродействие управления для предупреждения хаоса.

### **Заключение.**

Для организаций сложной структуры, работающих в конкурентной среде, под *устойчивостью* следует понимать комплексное свойство системы (объекта управления (ОУ) и его системы управления (СУ)), характеризуемое следующими показателями:

*живучестью* – способностью системы выполнять задачи в условиях преднамеренного воздействия всех средств поражения от конкурентов;

*стабильностью* – способностью системы выполнять задачи в условиях (в обстановке) чрезвычайных ситуаций;

*надежностью* – способностью системы выполнять задачи, поддерживая работоспособность и качество функционирования в течение заданного времени (в течение наработки).

Живучесть, оценивающая критические возможности информационно-технологических систем, заимствует из теории надежности характеристики безотказности невосстанавливаемых изделий или оборудования разового применения, с уточнением смыслового содержания характеристик, исходя из данного определения живучести применительно к сложным системам.

Устойчивая информационная система (т.е. жизнестойкая к преднамеренным воздействиям на поражение, стабильная в условиях чрезвычайных ситуаций и не утратившая первоначальные качества в процессе эксплуатации), чтобы оставаться устойчивой далее, должна быть готова противостоять неблагоприятному набору воздействий повторно, в третий, четвертый до своего предельного состояния (физического, морального и т.п.). Именно благодаря свойству непрерывности система после цикла испытаний возвращается в исходное состояние, оказываясь готовой к новым испытаниям.

---

Всякие проявления неустойчивости снижают работоспособность сложной системы управления. В таких системах внешние риски, сколь бы сильными они ни оказывались (например, воздействия ЧС), вызывают лишь пропорциональные отклонения управляемой величины от устойчивого значения, не нарушая устойчивость системы в целом по окончании воздействия.

Рассмотренная модель асимптотической устойчивости предприятий сложной структуры при воздействии внешних рисков нацелена на функционирование предприятий и их информационных систем в следующих условиях преднамеренных и случайных воздействий внешних рисков: злонамеренные действия конкурентов, действия нарушителей (злоумышленников), возникновение чрезвычайных ситуаций, климатических (регулярных) воздействий.

В общем случае, как и в исследуемом случае, функция Ляпунова описывает асимптотическую устойчивость сложных информационных систем во времени (в эволюции). В системах с положительным показателем Ляпунова, как в данном случае  $\frac{1}{(1+ax)} > 0$ , может образоваться странный аттрактор, т.е. сложиться при стечении неблагоприятных обстоятельств механизм, выводящий систему из равновесия.

Время Ляпунова  $\tau = 1+at$  определяет горизонт, до которого хаотическая система еще управляема, ее параметры прогнозируемы, чего нельзя гарантировать по прошествии  $\tau$ . Поэтому в системах внутренне деструктивных, подверженных хаосу, время Ляпунова определяет быстроедействие управления для предупреждения хаоса.

В частности, для расчета  $\tau = 1+at$  следует задаться значением интервала  $t$ , определяющим здесь период появления бифуркаций – чрезвычайных событий, выводящих СУ из равновесия.

Внутрипроизводственными причинами, приводящими к неритмичности, снижению показателей качества на предприятии, могут оказаться, в частности, ограбление кассы, снижение доходов (банкротство) на рынке услуг, конфликты в коллективе и другие негативные явления, обусловленные психологией взаимоотношения людей.

#### *Литература*

1. Анфилатов, В. С., Емельянов, А. А., Кукушкин, А. А. Системный анализ в управлении / В. С. Анфилатов, А. А. Емельянов, А. А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика. – 2002.
2. Бляхман, Л. С. Основы функционального и антикризисного менеджмента / Л. С. Бляхман // СПб., – 1999 г.
3. Князютенков, В. А. Оценка надежности ЭВМ в процессе эксплуатации / В. А. Князютенков // Механизация и автоматизация производства. – 1971. – №12. – с. 39 – 41.
4. Князютенков, В. А. Обеспечение устойчивой долговременной работы предприятия связи / В. А. Князютенков // М.: РИО МТУСИ. – издательство «Информсвязь». – 2006.
5. Словарь по кибернетике / Под ред. В. М.Глушкова // Киев: Гл., ред. Укр. сов. Энциклопедии. – 1979.



- 
6. Горшков, В. В. Логико-вероятностный метод расчета живучести сложных систем / В. В. Горшков // Кибернетика АН УССР. – 1982. – № 1. – С. 104-107.
  7. Волик, Б. Г., Рябинин, Й. А. Эффективность, надежность и живучесть управляющих систем / Б. Г. Волик, Й. А. Рябинин // Автоматика и телемеханика. – 1984. – № 12.
  8. Надежность в технических системах. Справочник / Под ред. И. Н. Ушакова // М.: Радио и связь. – 1985. – 606 с.
  9. Рябинин, И. А., Парфенов, Ю. Н. Надежность и эффективность структуры сложных технических систем // И. А. Рябинин, Ю. Н. Парфенов / Основные вопросы теории и практики надежности / Минск: Наука и техника. – 1982. – с. 25-40.
  10. Астров В. В., Симаков И. П., Черкесов Г. Н. Применение методов вероятностной логики и исследования операций к анализу живучести пространственно-распределенных энергетических систем / Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики // Иркутск. – 1980. – с. 32-42.
  11. Надежность систем энергетики / Б. Н. Руденко, И. Н. Ушаков // М.: Наука. – 1986. – 252 с.

**Экспериментальные исследования многослойной упругой оболочки соединительной муфты силовых приводов**

**А.П. Евдокимов**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А. А. Благодного Российской академии наук  
(ИМАШ РАН)

*В статье приведены результаты экспериментальных исследований резинокордной оболочки под действием крутильных колебаний в нелинейной постановке задачи. Объектом испытаний являлся маневровый тепловоз. Получены зависимости возникающих усилий в оболочке от условий нагружения. Показано, что комплексное действие динамических нагрузок значительно снижают показатели ресурса и надёжности привода с упругой муфтой.*

Резинокордная оболочка, упругая муфта, динамический крутящий момент, привод, пластические деформации, удельное трение.

**Experimental researches of a multilayered elastic environment connecting counting power drives**

**A.P. Evdokimov**, Dr.Sci.Tech., Conducting scientific employee,  
Federal state budgetary establishment of a science Institute theoretical engineering  
him. A.A. Blagonravova,  
the Russian academy of sciences (IMASH the Russian Academy of Science)

*In clause results of experimental researches rubber-cord casing environments under action fluctuations in nonlinear statement of a problem are given. Object of tests was the shunting diesel locomotive. Dependences of arising efforts in an environment from conditions loading are received. It is shown, that complex action of dynamic loadings is reduced considerably with parameters of a resource and reliability of a drive with elastic connection sleeve.*

Rubber-cord casing, elastic loading, the dynamic twisting moment, a drive, plastic deformations, specific friction.

Элементы приводов силовых установок маневровых тепловозов с упругими соединительными муфтами подвержены действию значительных динамических нагрузок, обусловленных рабочими процессами приводных и исполнительных механизмов. Такие процессы являются источником возникновения крутильных колебаний в элементах привода.

Основная особенность динамики подобного рода заключается в том, что, вследствие неравномерного вращения вала механизма возникают два вида реакций: момент сил инерции маховых масс и момент сил упругости участков соединительного устройства [1, 2, 3, 8]. Первая реакция создаётся каждой массой при

---

её неравномерном вращении, направлена в сторону, противоположную ускорению этого вращения, и равна

$$J_p = \theta \ddot{\varphi}, \quad (1)$$

где  $\theta$  – момент инерции массы,  $\ddot{\varphi}$  – ускорение вращения массы.

Вторая реакция возникает на валах механизмов привода вследствие неодинаковой мгновенной величины деформации кручения этих валов. Если вал приводного механизма отклонится на угол  $\varphi_1$ , а вал исполнительного механизма в то же мгновение отклонится на какой-то другой угол  $\varphi_2$ , то на валу возникает реакция в виде момента сил упругости (динамического крутящего момента или эластического момента). Динамический крутящий момент направлен в сторону, противоположную закручиванию данного участка, и пропорционален величине последнего, т.е.

$$U = \varphi/e,$$

где  $e$  – податливость участка вала.

На основании изложенного, актуальной ставится задача экспериментального исследования деформированного состояния резинокордных оболочек в режиме динамического нагружения

### *1. Исследование приведенной податливости резинокордных оболочек*

Приведенная податливость представляет собой отношение угла закручивания  $\varphi$  участка привода к величине эластического момента

$$e = \varphi/U. \quad (2)$$

Силовой привод, в котором используется упругая муфта с резинокордной оболочкой, рассматривается как нелинейное соединение. При исследовании колебаний систем с нелинейным соединением принято различать два условия работы соединения. В первом случае соединение имеет симметричную характеристику зависимости эластического момента от угла закручивания и не передаёт средний крутящий момент. Во втором случае соединение передаёт средний крутящий момент или имеет несимметричную характеристику. При этом удобнее представлять приведенную податливость в зависимости от амплитуды приведенного эластического момента  $F_{k,k+1}^*$  и среднего крутящего момента  $M_{k,k+1}^{cp}$

$$e_{k,k+1}^* = \frac{B_{k,k+1}^*}{F_{k,k+1}^*} = \dots = f \left( F_{k,k+1}^*, M_{k,k+1}^{cp} \right), \quad (3)$$

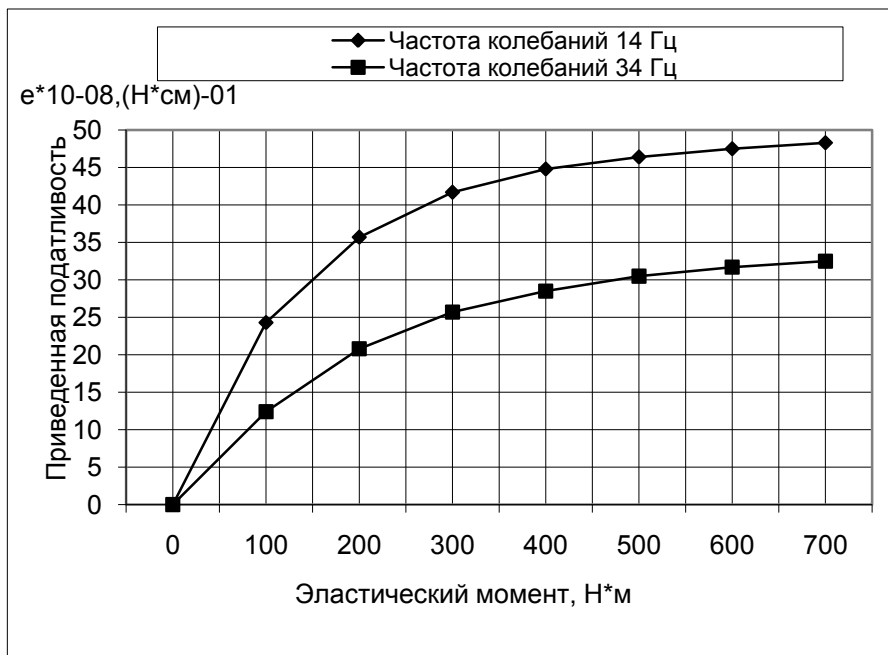
где  $B_{k,k+1}^*$  – амплитуда приведенной деформации кручения.

#### **1.1 Зависимости приведенной податливости от эластического момента**

Экспериментальные исследования проводились при температуре резинокордной оболочки +20 °С. Нагружение осуществлялось при отсутствии среднего крутящего момента, номинальное и максимальное значения эластического момента составляло соответственно 80 и 250 Н·м, при частотах колебаний 14 и 34 Гц.

Результаты экспериментальных исследований показали следующее. По

мере возрастания эластического момента приведенная податливость резинокордной оболочки увеличивалась (рис. 1). Наибольшее её значение наблюдалось при отсутствии среднего крутящего момента и номинального значения частоты колебаний. С увеличением частоты колебаний податливость снижалась.



**Рисунок 1 – Зависимость приведенной податливости резинокордной оболочки от эластического момента**

В первом случае кривые графиков имели ярко выраженный нелинейный характер. При номинальном и максимальном значениях крутящего момента, кривые приближались к линейной зависимости. Существенной разницы полученных значений приведенной податливости при различных величинах среднего крутящего момента не наблюдалось.

Характер амплитудной зависимости приведенной податливости резинокордной оболочки сходен с характером зависимости динамического модуля наполненных резин от амплитуды деформаций. При таком характере нелинейности вынужденным колебаниям свойственны скелетные кривые с «мягкой» характеристикой.

### **1.2. Зависимости приведенной податливости от частоты колебаний**

Нагружение резинокордных оболочек осуществлялось при её температуре  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , отсутствии среднего крутящего момента и значениях эластического момента 200, 400, 600 и 800 Н·м. Снижение величины приведенной податливости происходило с увеличением значения частоты колебаний (рис. 2). Максимальная величина податливости соответствовала максимальному значению эластического момента.

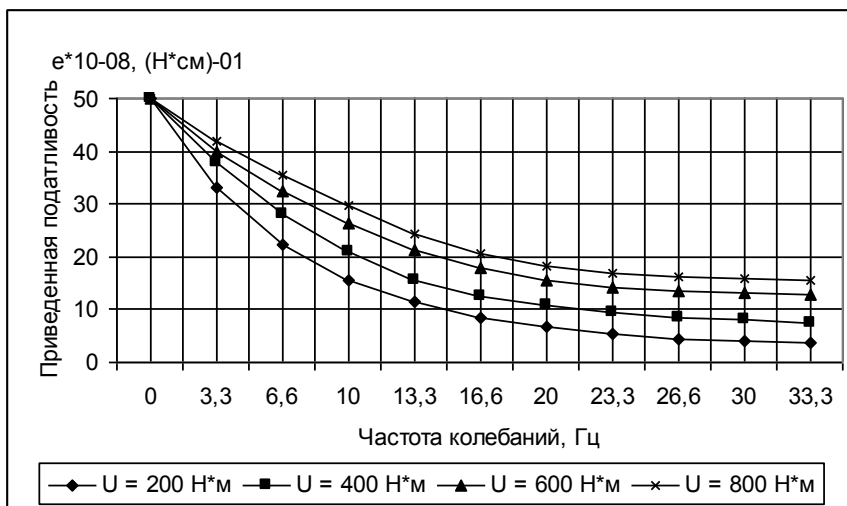


Рисунок 2 – Зависимость приведенной податливости резинокордной оболочки от частоты колебаний

Кривые графиков на всех диапазонах нагрузок оставались почти параллельными друг другу и имели линейный характер при значении частоты колебаний выше 26,6 Гц.

### 1.3. Зависимости приведенной податливости от температуры

С ростом температуры значение приведенной податливости увеличивалось (рис. 3). Как и в предыдущем случае, возрастание податливости наблюдалось при увеличении значения эластического момента.

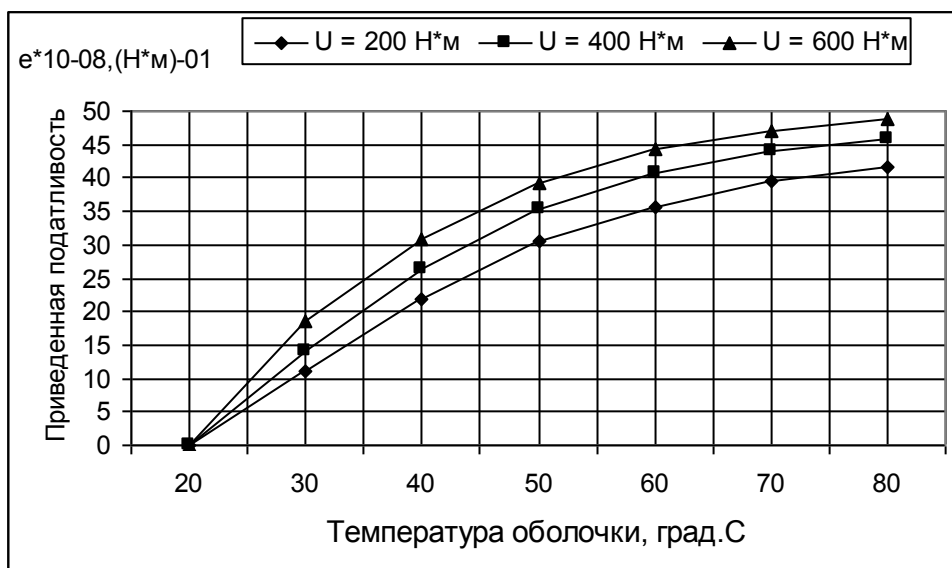


Рисунок 3 – Зависимость приведенной податливости резинокордной оболочки от температуры

Таким образом, различные виды нагрузки вызывают неоднозначное поведение резинокордной оболочки. Так, увеличение приведенной податливости наблюдалось при повышении эластического момента и температуры. В этом случае осуществлялся переход оболочки от высокоэластичного состояния к вязкотекучему состоянию и уменьшался модуль упругости. В вязкотекучем состоянии для оболочки характерны необратимые пластические деформации, при наличии которых резко сокращается срок службы упругого элемента.

При возрастании частоты колебаний приведенная податливость снижалась вследствие того, что происходил переход от высокоэластичного состояния к состоянию стеклования. При этом происходило снижение упруго - демпфирующих свойств резинокордной оболочки, что также являлось одной из основных причин снижения долговечности элементов привода.

## 2. Исследование осевых усилий резинокордных оболочек

Повышенная частота вращения (более 2000 об/мин) является причиной появления значительных осевых сил в резинокордных оболочках упругих соединительных муфт механизмов привода.

При вращении муфты на резинокордную оболочку также действуют и центробежные силы, стремящиеся увеличить диаметр оболочки и «вырвать» её из узла крепления к металлическим фланцам. Вследствие того, что центробежные силы совпадают с направлением усилий в узле крепления, а профиль оболочки достаточно легко изменяется под действием этих сил, то возникающие при этом осевые усилия стремятся сблизить металлические фланцы упругой муфты.

Сила, вызывающая осевое смещение оболочек, определяется формулой

$$P = WDEB_w, \quad (4)$$

$$W = \frac{Q_w r}{E \delta \alpha_1} \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{g_{1r} \cos \theta}{1 + \alpha_1 \sin \theta} d\theta,$$

$$B_w = \pi (1 - \alpha) 1/b_w,$$

$$\alpha_1 = r/R,$$

где  $W$  – осевое смещение оболочки,  $E$  – модуль упругости,  $D$  – наружный диаметр оболочки,  $Q_w$  – нагрузка, приходящаяся на единицу длины окружности оси тора,  $R$  – радиус круговой оси тора,  $r$  – радиус образующей окружности тора,  $\delta$  – толщина оболочки,  $\theta$  – угол, характеризующий положение расчётного сечения оболочки,  $g_{1r}$  – вещественная часть комплексной разрешающей функции [6].

Зависимости осевой силы оболочки от частоты вращения

В процессе испытаний оболочка устанавливалась в следующие положения: нормальное (без деформации растяжения-сжатия), сжатие на величину 4 мм, растяжение на величину 6 мм. Полученные результаты экспериментов показали следующее.

С увеличением частоты вращения муфты величина осевой силы возрастала (рис. 4), наиболее интенсивно в диапазоне средней и максимальной частоты

вращения. Наибольшее значение осевой силы было зафиксировано при растяжении оболочки. Сравнительно небольшое расхождение в полученных результатах отмечено при отсутствии деформации оболочки и при её сжатии.

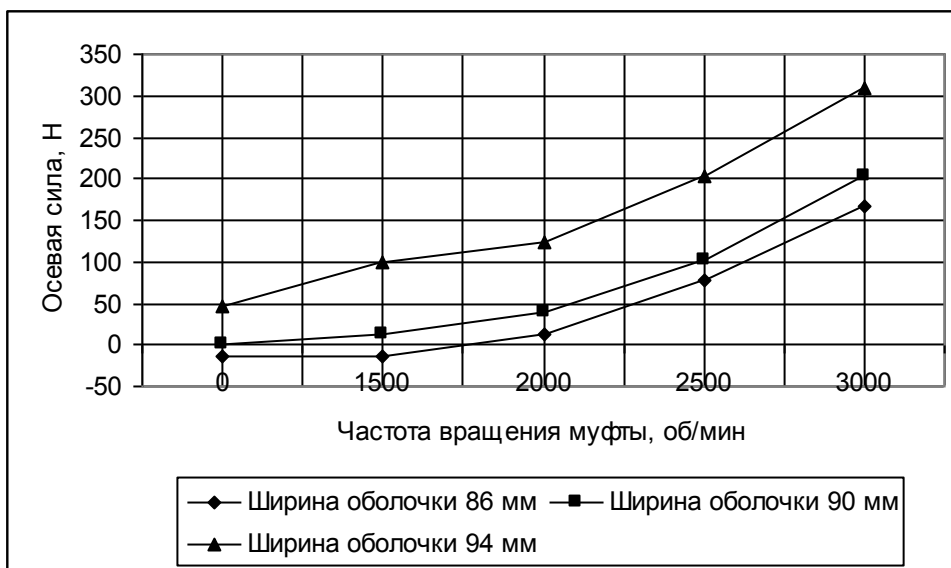


Рисунок 4 – Зависимость осевой силы оболочки от частоты вращения

При действии центробежных сил увеличивался наружный диаметр (до 10 мм) и изменялась кривизна участков профиля оболочки. При повышенной частоте вращения профиль становился конусообразной формы с закруглённой вершиной, диаметр здесь становился равным 16 мм. С увеличением частоты вращения повышался уровень осевых сил от наклоненных к осевой оси бортовых частей оболочки, так как направление центробежных сил не совпадает с направлением реакций в узле крепления.

### 3. Исследование реактивных усилий резинокордных оболочек

Резинокордные оболочки испытывают действие реактивных усилий, обусловленные радиальным смещением осей валов механизмов привода. При напряжениях, превышающих предельно допустимые значения, происходит образование трещин на короне оболочки с последующим её разрушением.

При радиальном смещении осей валов нормальные напряжения на наружной ( $\sigma_{1H}$ ,  $\sigma_{2H}$ ) и внутренней ( $\sigma_{1B}$ ,  $\sigma_{2B}$ ) поверхностях оболочки можно определить по следующим зависимостям:

$$\sigma_{1H} = \frac{u}{DEC_{1H}}; \sigma_{1B} = \frac{u}{DEC_{1B}}; \sigma_{2H} = \frac{u}{DEC_{2H}}; \sigma_{2B} = \frac{u}{DEC_{2B}}.$$

$$\tau = \frac{u}{DEC_{\tau}}, \quad 5)$$

где  $u$  – радиальное смещение осей валов механизмов,  $D$  – наружный диаметр оболочки,  $E$  – модуль упругости,  $C_{1H}$ ,  $C_{1B}$ ,  $C_{2H}$ ,  $C_{2B}$ ,  $C_{\tau}$ ,  $D_{1H}$ ,  $D_{1B}$ ,  $D_{2H}$ ,  $D_{2B}$ ,  $D_{\tau}$  – безразмерные коэффициенты [6].

Нагрузки, действующие на валы механизмов привода, определяются по формулам:

$$P_u = uDEA_u; M_u = uD^2EB_u, \quad (6)$$

где  $A_u, B_u$ , – безразмерные коэффициенты [6].

Зависимости реактивных сил оболочки от частоты вращения

В процессе испытаний определялись зависимости реактивных сил при радиальных смещениях осей валов механизмов привода 1,5; 3,0; 4,5 мм. Нагружение осуществлялось на рабочем диапазоне частоты вращения двигателя, не превышая допустимый уровень для резинокордных оболочек  $1800 \text{ мин}^{-1}$ .

Полученные результаты экспериментальных исследований показали следующее. Увеличение значения радиального смещения и частоты вращения вызывает возрастание реактивных сил (рис. 5). При минимальном радиальном смещении осей валов равном 1,5 мм кривая графика имела линейный характер, затем (с увеличением значения радиального смещения) начинала проявляться нелинейность.

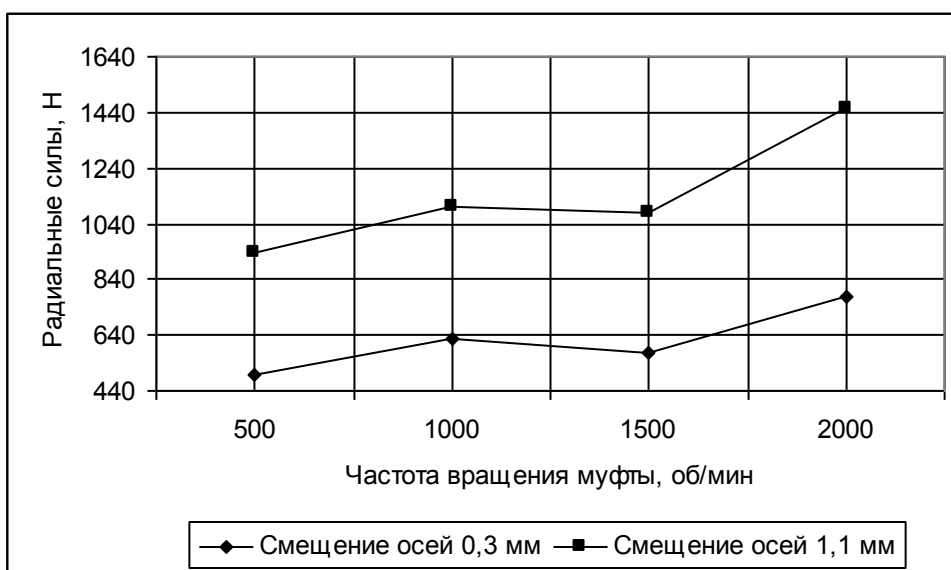


Рисунок 5 – Зависимость реактивных сил оболочки от частоты вращения

Незавершённость релаксационных процессов с ростом скорости деформирования приводит к росту модулей упругости резины и радиальной жёсткости оболочки. Другой причиной роста жёсткости является увеличение центробежных сил. С возрастанием величины радиального смещения радиальная жёсткость уменьшается.

#### 4. Исследование удельного трения резинокордных оболочек



В процессе колебаний в элементах узлов возникают силы трения [1, 2, 3, 5]. Эти силы в резинокордных оболочках реализуются в результате взаимного перемещения частиц материала при деформации упругого элемента. В упругих оболочках силы трения имеют нелинейный характер, их демпфирующие моменты имеют сложную зависимость от частоты колебаний.

Силы трения поглощают энергию колебаний, превращая её в тепло, которое рассеивается в окружающую среду. Незначительные силы трения являются положительным фактором с точки зрения борьбы с большими амплитудами колебаний, так как с уменьшением энергии колебаний уменьшается и амплитуда колебаний, а с нею и максимальные напряжения в опасных сечениях привода. Однако если данные силы достаточно большие, то они определённым образом изменяют соотношение между инерционными и эластическими моментами в различных местах. Это влияние в некоторых случаях может привести и к усилению колебаний.

Силы трения, небольшие по величине, играют положительную роль, так как уменьшают энергию колебаний. При этом уменьшается амплитуда колебаний, а с нею - максимальные напряжения в опасных сечениях привода.

При приближённом расчёте колебаний систем с нелинейным трением, действительное трение выражают трением, приведенным к косинусоидальному закону, т. е. имеющим, в основном, аналогичные изменения во времени, с линейным. Приведенные демпфирующие моменты в этом случае будут также изменяться по косинусоидальному закону, амплитуда приведенного демпфирующего момента определится из условия равенства работ действительного и приведенного трения за одно колебание.

Для массы с трением

$$\varphi_a = f_1(\omega t) \approx \varphi_a^* = \varphi_a^{cp} + A_a^* \sin(\omega t + \xi_a) = \Omega t + A_a^* \sin(\omega t + \xi_a), \quad (7)$$

и для соединения с трением

$$\varphi_{b,b+1} = f_2(\omega t) \approx \varphi_{b,b+1}^* = \varphi_{b,b+1}^{cp} + B_{b,b+1}^* \sin(\omega t + \xi_{b,b+1}), \quad (8)$$

где  $\omega$  – частота колебаний,  $t$  – время,  $\xi_a$  – фаза колебаний,  $B^*$  – амплитуда приведенной деформации,  $\varphi_{cp} = \Omega t$  – равномерная составляющая движения массы,  $A_a^*$ ,  $B_{b,b+1}^*$  – амплитуды синусоидальных составляющих движения массы и деформации соединения с частотой колебаний,  $\Omega$  – угловая скорость вала механизма.

Тогда приведенные демпфирующие моменты в соответствующих местах вала определяются по следующим формулам:

$$V_a = f_3(\omega t) \approx V_a^* = -G_a^* \cos(\omega t + \xi_a) = -G_a^* \sqrt{1 - \left(\frac{\varphi_a^* - \varphi_a^{cp}}{A_a^*}\right)^2}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 V_{b,b+1} &= f_4(\omega t) \approx V_{b,b+1} = -G_{b,b+1}^* \cos(\omega t + \xi_{b,b+1}) = \\
 &= -G_{b,b+1}^* \sqrt{1 - \left( \frac{\varphi_{b,b+1}^* - \varphi_{b,b+1}^{cp}}{B_{b,b+1}^*} \right)^2}, \quad (10)
 \end{aligned}$$

где  $V$  – демпфирующий момент,  $G_{b,b+1}^*$  – геометрическая сумма амплитуд приведенного демпфирующего момента.

Амплитуда приведенного демпфирующего момента определяется из условия равенства работ действительного и приведенного моментов трения за одно колебание:

$$W_{mp} = - \int_{\omega t=0}^{2\pi} V d\varphi = W_{mp}^* = - \int_{\omega t=0}^{2\pi} V^* d\varphi^* = \pi G_a^* A_a^* = \pi G_{b,b+1}^* B_{b,b+1}^*, \quad (11)$$

$$G_a^* = \frac{W_{mp a}}{\pi A_a^*} = \frac{W_{mp a}^*}{\pi A_a^*}; \quad (12)$$

$$G_{b,b+1}^* = \frac{W_{mp b,b+1}}{\pi B_{b,b+1}^*} = \frac{W_{mp b,b+1}^*}{\pi B_{b,b+1}^*}. \quad (13)$$

Отношение амплитуды приведенного демпфирующего момента к амплитуде приведенного инерционного момента массы или эластического момента в соединении является удельным трением:

$$\mu_a^* = \frac{G_a^*}{\theta_a \omega A_a^*}; \quad (14)$$

$$\mu_{b,b+1}^* = \frac{G_{b,b+1}^*}{F_{b,b+1}^*}, \quad (15)$$

где  $F_{b,b+1}^*$  – геометрическая сумма амплитуд приведенного эластического момента.

С учётом соотношений (12) и (13) удельное трение, численно уменьшенному в  $2\pi$  раз отношению работы трения за одно колебание к максимальной кинетической энергии колебания массы или соответственно потенциальной энергии деформации соединения:

$$\mu_a^* = \frac{W_{mp a}^*}{\pi A_a^2 \theta_a \omega^2 A_a^*} = \dots = \frac{W_{mp a}^*}{2\pi \frac{\theta_a \omega^2}{2} (A_a^*)^2}; \quad (16)$$

$$\mu_{b,b+1}^* = \frac{W_{mp\ b,b+1}^*}{2\pi \frac{B_{b,b+1}^* F_{b,b+1}^*}{2}} = \frac{W_{mp\ b,b+1}^*}{\pi e_{b,b+1} (F_{b,b+1}^*)^2} = \frac{W_{mp\ b,b+1}^* e_{b,b+1}}{\pi (B_{b,b+1}^*)^2}. \quad (17)$$

Удельное трение является одной из важных характеристик упруго- демпфирующих свойств резинокордных оболочек. Недостаточность экспериментальных исследований создаёт определённые трудности в прогнозировании надёжности и долговечности элементов привода. Поэтому исследование влияния различных факторов на упруго-демпфирующие свойства резинокордных оболочек, в частности на удельное трение, является также актуальной задачей.

#### 4.1. Зависимости удельного трения от амплитуды эластических моментов

Исследовали зависимости удельного трения  $\mu$  от амплитуды эластических моментов  $U$  при следующих режимах нагружения: средний крутящий момент равен нулю, температура оболочки  $T = +20$  °С, частота колебаний  $f = 3,3; 10,0; 16,6; 23,3; 26,6; 30$  Гц. С увеличением значений амплитуды эластического момента удельное трение возрастает (рис. 6).

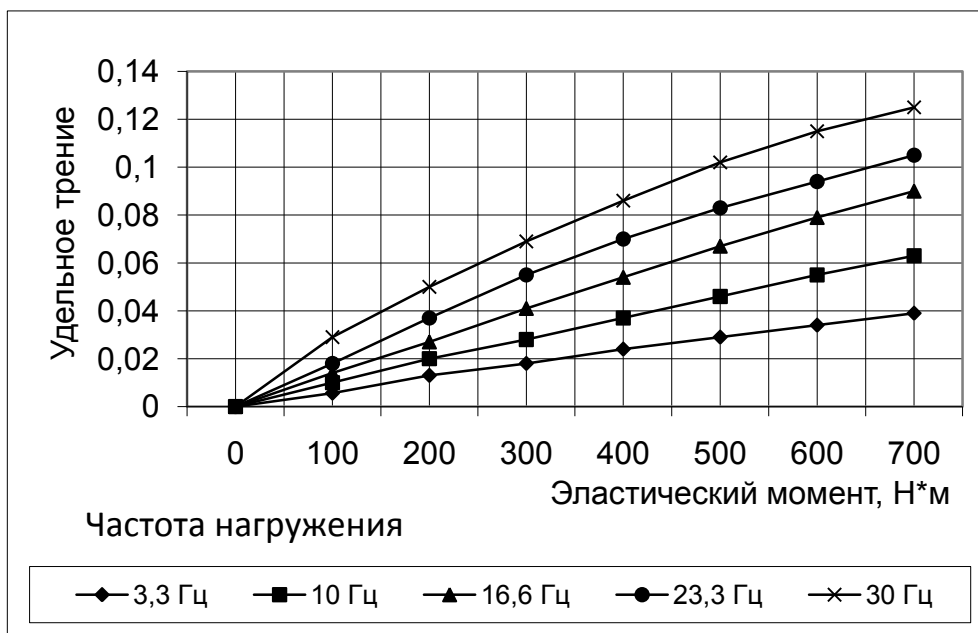


Рисунок 6 – Зависимость удельного трения от амплитуды эластических моментов

Кривые графиков имели практически линейный характер. Зависимость удельного трения от частоты колебаний имеет обратно пропорциональный характер. При меньших значениях частоты колебаний удельное трение имеет большее значение.

#### 4.2. Зависимости удельного трения от частоты колебаний

Экспериментальное исследование зависимости удельного трения от частоты колебаний проводили при следующих режимах: отсутствие среднего крутящего момента, температуре оболочки +20°C и эластические моменты 200, 400, 600 и 800 Н·м. Повышение частоты колебаний приводит к снижению удельного трения (рис. 7). Причём с повышением амплитуды эластических моментов  $U \geq 600$  Н·м интенсивность снижения удельного трения резко возрастает.

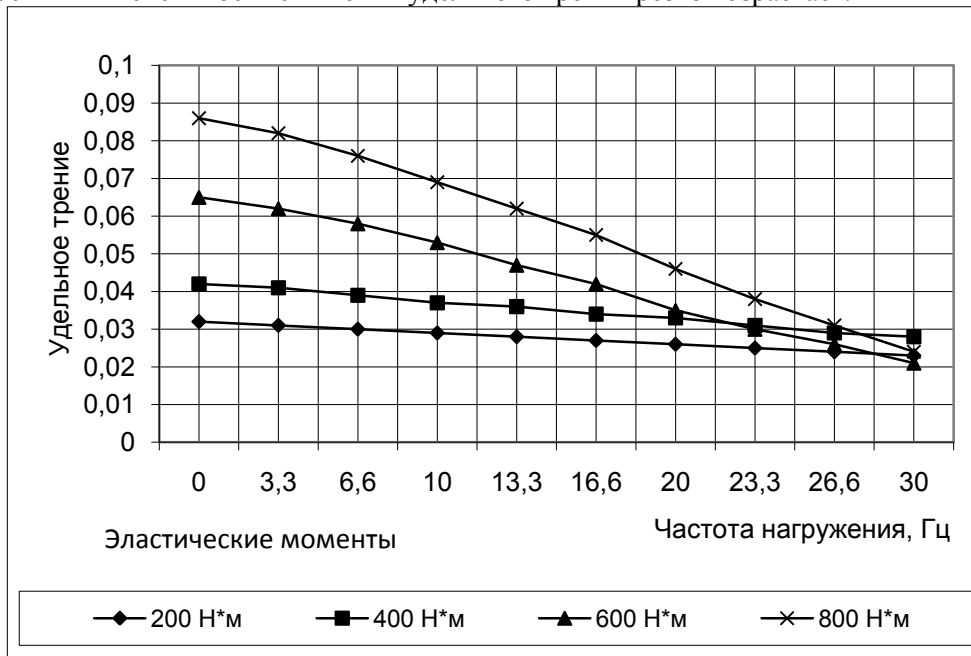


Рисунок 7 – Зависимость удельного трения от частоты колебаний

Повышение частоты колебаний превосходит к снижению удельного трения. По мере приближения к максимальной частоте колебаний значения  $\mu$  практически не зависят от амплитуды эластических моментов.

#### 4.3. Зависимости удельного трения от температуры оболочки

При определении зависимости удельного трения от температуры диапазон температур измерялся от +20 до +80°C. Диапазон температур от -15 до +40°C соответствует процессу перехода материала оболочки от каучукообразного состояния (> +40°C) материала оболочки к состоянию стеклования, который наступает при температуре оболочки < -15°C. Значения эластических и крутящих моментов принимались равными значениям предыдущих серий испытаний. Величина удельного трения снижалась с увеличением температуры резинордной оболочки и эластических моментов (рис. 8). Здесь также имели место пересечения кривых графиков.

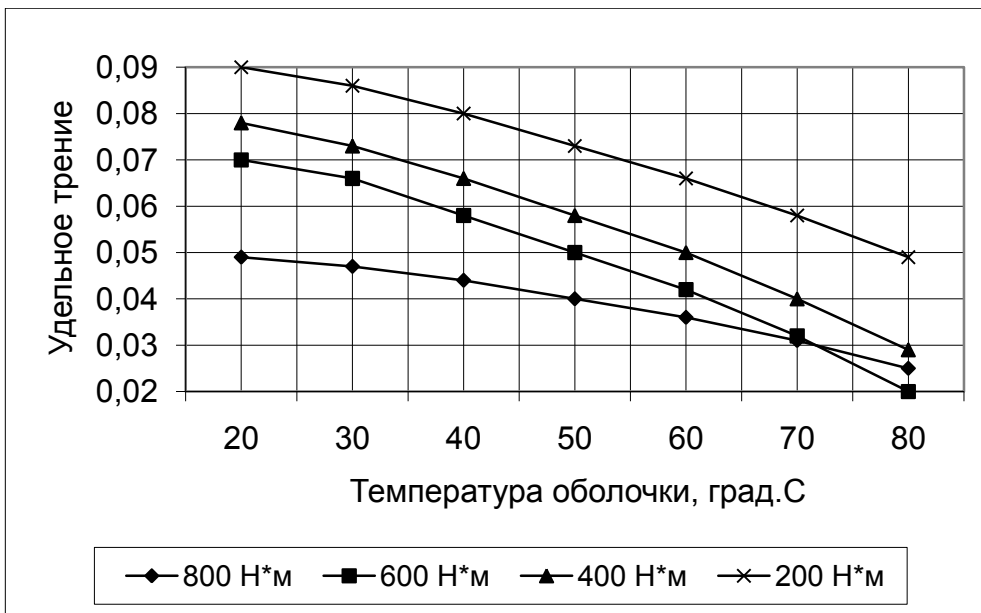


Рисунок 8 – Зависимость удельного трения от температуры

## Выводы

1. Различные виды нагрузки вызывают неоднозначное поведение резинокордной оболочки. Так, увеличение удельного трения наблюдалось при повышении эластического момента и амплитуды деформации кручения.

2. При возрастании частоты колебаний и температуры оболочки удельное трение снижалось, т.е. происходил переход материала оболочки от высокоэластичного состояния к состоянию стеклования. При этом имеет место снижение упруго демпфирующих свойств резинокордной оболочки, что также являлось одной из основных причин снижения долговечности элементов привода.

3. По мере увеличения динамической нагруженности основное значение будут иметь деформационные и энергетические критерии. При этом, и характеристики сопротивления деформациям, и характеристики сопротивления разрушениям будут зависеть от времени, числа циклов и температур, что является предметом дальнейших исследований.

## Литература

1. Вейц, В. Л. Колебания системы машинных агрегатов / В. Л. Вейц // Л.: Машиностроение. – 1979. – 256 с.
2. Истомин, П. А. Крутильные колебания в судовых ДВС / П. А. Истомин // Л.: Судостроение. – 1968. – 300 с.
3. Кожевников, С. Н. Динамика машин с упругими звеньями / С. Н. Кожевников // Киев: Изд-во АН УССР. – 1961. – 160 с.
4. Михайлов, Ю. К., Иванов, Б. С. Муфты с неметаллическими упругими элементами / Ю. К. Михайлов, Иванов, Б. С. // Л.: Машиностроение. – 1987. – 145 с.

- 
5. Поляков, В. С., Барбаш, И. Д. Муфты / В. С. Поляков, И. Д. Барбаш // М.: Л.: Машиностроение. – 1973. – 336 с.
  6. Поляков, В. С., Барбаш, И. Д., Ряховский, О. А. Справочник по муфтам / В. С. Поляков, И. Д. Барбаш, О. А. Ряховский // Л.: Машиностроение. 1979. – 343 с.
  7. Потураев, В. Н., Дырда, В. И., Круш, И. И. Прикладная механика резины / В. Н. Потураев, В. И. Дырда, И. И. Круш // Киев.: Наукова думка. – 1980. – 260 с.
  8. Терских, В. П. Крутильные колебания валопровода силовых установок / В. П. Терских //Л.: Судостроение. – 1971. – 307 с.

**Нейросети – очередной этап развития  
информационных технологий**

**В.Н. Зиновьев**, д.т.н., профессор,  
**Е.С. Харламова**, старший преподаватель,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Рассмотрены архитектура обработки образов в нейросетях, области применения нейротехнологии.*

Искусственные нейронные сети, нейро-компьютеры.

**Neural networks – the next stage of development of  
information technologies**

**V.N. Zinoyjev**, Dr.Sci.Tech., Professor,  
**E.S. Kharlamova**, senior lecturer,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*The architecture of the image processing in neural networks, applications of neurotechnologies.*

Artificial neural networks, neuro-computers.

**Искусственные нейронные сети.** Искусственные нейронные сети (ИНС) – математические модели, а также их программные или аппаратные реализации, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма. Это понятие возникло при изучении процессов, протекающих в мозге, и при попытке смоделировать эти процессы. Первой такой попыткой были нейронные сети Маккалока и Питтса. Впоследствии, после разработки алгоритмов обучения, получаемые модели стали использовать в практических целях: в задачах прогнозирования, для распознавания образов; в задачах управления и др.

ИНС представляют собой систему соединённых и взаимодействующих между собой простых процессоров (искусственных нейронов). Такие процессоры обычно довольно просты, особенно в сравнении с процессорами, используемыми в персональных компьютерах. Каждый процессор подобной сети имеет дело только с сигналами, которые он периодически получает, и сигналами, которые он периодически посылает другим процессорам. И тем не менее, будучи соединёнными в достаточно большую сеть с управляемым взаимодействием, такие локально простые процессоры вместе способны выполнять довольно сложные задачи.

---

С точки зрения машинного обучения, нейронная сеть представляет собой частный случай методов распознавания образов, дискриминантного анализа, методов кластеризации и т. п. с математической точки зрения, обучение нейронных сетей – это многопараметрическая задача нелинейной оптимизации. С точки зрения кибернетики, нейронная сеть используется в задачах адаптивного управления и как алгоритмы для робототехники. С точки зрения развития вычислительной техники и программирования, нейронная сеть – способ решения проблемы эффективного параллелизма. А с точки зрения искусственного интеллекта, ИНС является основой философского течения коннективизма и основным направлением в структурном подходе по изучению возможности построения (моделирования) естественного интеллекта с помощью компьютерных алгоритмов.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что, в случае успешного обучения, сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искаженных данных.

Искусственные нейросети, несмотря на часто употребляемый эпитет «ЭВМ 6-го поколения», еще на заре компьютерной эры рассматривались как альтернатива последовательной фон-неймановской архитектуре. Ключевая работа Мак Каллока и Питтса, по нейро-вычислениям появилась в 1943 году, на два года раньше знаменитой докладной записки фон Неймана о принципах организации вычислений в последовательных универсальных ЭВМ. Однако, дальнейшая судьба двух вычислительных парадигм существенно отличается. Развитие вычислительной техники шло по пути развития последовательных ЭВМ, а сетевые принципы обработки информации исследовались отдельными немногочисленными группами энтузиастов.

Однако, с начала 80-х годов отмечается резкое возрастание интереса к искусственным нейросетям. Ежегодно в мире проводятся десятки конференций, посвященных нейро-вычислениям, журналы по этой тематике отличаются самыми высокими индексами цитируемости, в развитых странах существуют государственные программы исследований в этой области.

Нейросети – не очередной всплеск компьютерной моды, а действительно новая технология в мире ЭВМ, выяснить их перспективную «экологическую нишу» в этом мире. Это поможет понять масштаб начинающейся экспансии нейрокомпьютеров и вызванной их появлением возможной структурной перестройки промышленности электронной обработки данных.

Эта перестройка связана, по нашему мнению, с освоением нового вида обрабатываемой информации - образной информации.

**Ступени развития ЭВМ: цифры – символы – образы.** Первый этап развития ЭВМ был связан, в основном, с вычислениями (что и отразилось в их названии). Однако, своему широкому распространению в современном обществе компьютеры обязаны, в основном, способности манипулировать любой сим-



---

волбной информацией. Вычисления – лишь частный случай манипуляции символами. Работа с базами данных, форматирование текстов, протоколы передачи информации по каналам связи – этот далеко не полный список свидетельствует, насколько широко используется в современных ЭВМ обработка символьной информации.

Компьютеры являются неотъемлемой частью современного информационного общества. Объем перерабатываемой ими информации растет небывалыми темпами. При современных темпах развития, уже сегодня годовой прирост емкости компьютерной памяти равен общему числу нейронов всего населения земного шара. Можно с уверенностью констатировать, что третье тысячелетие развитые страны встречают со сложившейся человеко-машинной технологией обработки информации и организации производства.

Узким местом, снижающим эффективность такого симбиоза, является неспособность современных ЭВМ оперировать сенсорной или, более общо – образной информацией. Человек, мозг которого ориентирован именно на такого рода информацию, является сейчас единственным связующим звеном между миром абстрактных символов, перерабатываемых компьютерами, и внешним миром.

Неспособность компьютеров видеть, слышать и ощущать мешает им занять подобающее место на производстве, освободив людей от их теперешних обязанностей «универсальных манипуляторов» и контролеров при машинном производстве. Отсутствие сенсорного восприятия мира компьютерами ставит непреодолимые преграды и в человеко-машинном общении, в становлении искусственного интеллекта.

Таким образом, возможности современной электронной индустрии по наращиванию парка и мощности ЭВМ наталкиваются на ограниченные возможности современных компьютеров, резко сужающих возможные области их применения и, соответственно, – емкость потенциального рынка. Искусственные нейросети призваны «расшить» это узкое место, обеспечив компьютерам способность оперировать образной информацией.

**Отличительные черты образной информации.** Рассмотрим вкратце отличительные черты образной информации, которые делают последовательные ЭВМ столь неэффективным инструментом для ее обработки.

**Широкополосность.** Главное отличительное свойство образов – большая информационная насыщенность, или, выражаясь языком электротехники, широкополосность информации. Иными словами, образ характеризуется числом бит на порядки превосходящим информационную размерность символа. Сравните 32-64-разрядные машинные слова современных ЭВМ и графические образы, характеризующиеся мегабайтами информации. При этом, образ является единым информационным объектом. Многие его атрибуты (например связность областей) являются глобальными – их нельзя вычленивать, обрабатывая отдельные части образа независимо.

**Сложность вычислений.** Непосредственным следствием широкополосности образной информации является вычислительная сложность ее обработки. Согласно эмпирическому закону Рента, число элементов современных электронных схем, оперирующих  $n$ -разрядной информацией растет как  $n^{4.8}$ . Очевидно,

---

что эта тенденция, распространенная на размерность  $n > 100$ , приводит к нереалистичным размерам электронных схем. Следовательно, образная информация либо должна обрабатываться последовательно небольшими кусочками, что приводит к недопустимому увеличению времени обработки, либо схемотехническая концепция процессоров образной информации должна коренным образом измениться – в сторону специализации алгоритмов обработки, чтобы размер процессора не разрастался сверх меры.

**Специализация алгоритмов.** Специализация алгоритмов, таким образом, является естественным следствием «проклятия размерности» образной информации. Процессор обработки образов должен быть в максимальной степени специализирован, настроен на заданный набор преобразований данных. Иными словами, алгоритм обработки должен диктоваться конкретной задачей и конкретным видом данных. В идеале, алгоритм должен порождаться данными.

**Нейросети – естественная архитектура обработки образов.** То, что нейросетевая архитектура наилучшим способом приспособлена к обработке образной информации, недвусмысленно демонстрируют успехи естественных нейросетей. Перечисленные ниже отличительные черты нейросетевой архитектуры свидетельствуют о ее специализации именно к обработке образной информации.

**Коннекционизм.** Отличительной чертой нейросетей является глобальность связей. Базовые элементы – нейроны – изначально нацелены на работу с широкополосной информацией. Каждый входной нейрон нейросети, как правило, связан со всеми ее рецепторами. Напротив, базовые элементы современных последовательных ЭВМ – логические вентили – имеют лишь два входа.

**Локальность и параллелизм вычислений.** Массовый параллелизм нейро-вычислений, необходимый для эффективной обработки образов, обеспечивается локальностью обработки информации в нейросетях. Каждый нейрон реагирует лишь на локальную информацию, поступающую ему в данный момент от связанных с ним таких же нейронов, без апелляции к общему плану вычислений, обычной для универсальных ЭВМ. Таким образом, нейросетевые алгоритмы локальны, и нейроны способны функционировать параллельно.

**Программирование: обучение, основанное на данных.** Отсутствие глобального плана вычислений в нейросетях предполагает и особый характер их программирования. Оно также носит локальный характер: каждый нейрон изменяет свои «подгоночные параметры» – синапсы – в соответствии с поступающей к нему локальной информацией об эффективности работы сети. Режим распространения такой информации по сети и соответствующей ей адаптации нейронов носит характер обучения. Такой способ программирования в максимальной степени отражает специфику требуемого от сети способа обработки данных, ибо алгоритм не задается заранее, а порождается самими данными – примерами, на которых сеть обучается. Именно таким образом в процессе самообучения биологические нейросети выработали столь эффективные алгоритмы обработки сенсорной информации.

Существенной особенностью нейросетей является их способность к обобщению, позволяющая обучать сеть на ничтожной доле всех возможных ситуаций, с которыми ей, может быть, придется столкнуться в процессе функционирования. В этом их разительное отличие от обычных ЭВМ, программа кото-

---

рых должна заранее предусматривать их поведение во всех возможных ситуациях.

**Нейросетевая обработка образов.** В зависимости от типа выходной информации нейросеть может выполнять различные операции с образами. Если выход сети – такой же размерности, как и вход, то сеть осуществляет преобразование образов. Обычно для этой цели используются сети с обратными связями. Если же размерность выхода много меньше размерности входа – сеть осуществляет сжатие информации или перевод образной информации в символьную. Такие сети, как правило, имеют слоистую структуру с однонаправленной обработкой информации.

**Преобразование образов.** Типичным применением нейросетей является ассоциативная память, когда сеть восстанавливает один из записанных в ней информационных образов по частичной информации на входе. Если число записанных образов невелико, то даже относительно небольшой фрагмент исходного образа может служить ключом к такого рода ассоциативному воспроизведению хранящейся в памяти информации. В противоположном частном случае очень емкой памяти, сеть способна восстанавливать относительно небольшие искажения исходных образов, например при передаче их по зашумленному каналу связи, или повреждениях носителя информации. В отличие от традиционных баз данных, скорость выборки информации из ассоциативной памяти не зависит от объема хранящейся в ней информации. Поэтому организация ассоциативного поиска в базах данных является одной из перспективных сфер применения нейросетей.

Образы не обязательно должны соответствовать сенсорной информации. Состояние сети может отражать конфигурацию какой-то сложной системы. В последнем случае можно использовать сеть для оптимизации состояния этой системы. Для этого обычно используют сети с симметричными обратными связями, для которых можно определить понятие энергии, постоянно уменьшающейся при работе сети. Если эта энергия будет соответствовать целевой функции, динамика сети за несколько итераций определит одно из локально наилучших решений задачи оптимизации.

**Сжатие образов.** В общем виде отображение образной информации в символьную можно трактовать как распознавание образов. В зависимости от типа символов оно может принимать вид классификации образов, ранжирования (оценки) образов и даже предсказания поведения временных рядов. В последнем случае образом является отрезок временного ряда, а выходным значением – следующее по времени значение ряда. Если при обучении сети ей не указываются аргументы выходные значения, классификация превращается в **кластеризацию**, когда сеть сама распознает степень близости поступающих на вход образов и разбивает их на соответствующие кластеры.

Способность нейросетей к **сжатию** информации можно использовать для хранения и передачи образов с высокой степенью избыточности, для выявления главных компонент и других способов статистической обработки информации. Отличие нейросетевых алгоритмов от традиционных – в их принципиальной параллельности.

**Области применения нейротехнологии.** Описав типичные приложения

нейросетей, остановимся более подробно на конкретных примерах их применения в различных областях. Рисунок 1 дает общее представление о сферах современных применений нейросетей. Более подробные сведения о применениях нейросетей в конкретных отраслях можно найти в обзорах: [1]. Много примеров приводится также в отличном вводном курсе [6].



Рисунок 1 – Сферы применения нейросетей

**Человеко-машинный интерфейс: чтение текста и распознавание речи.** Расширение возможностей человеко-машинного интерфейса с помощью искусственного зрения и распознавания речи является, пожалуй, наиболее сильным побудительным мотивом для развития нейросетей. Когда значительная часть населения (в развитых странах – большая его часть) сталкивается в своей повседневной деятельности с компьютерами, клавиатурный ввод информации, существенно ограничивающий возможности человеко-машинного общения, является фактором, снижающим эффективность общественного производства. Это ограничение настолько привычно, что часто даже не замечается. Представим, однако, во что превратилось бы общение между людьми, будь оно ограничено лишь строчками текста – без звуков и зрительных образов.

Первоочередной задачей искусственного зрения является проблема чтения. На распознавание букв были нацелены первые практические разработки в области нейросетей – перцептроны Розенблатта, эта тема была центральной и для последующих разработок. Не удивительно, что в этой области достигнуты значительные успехи, о чем свидетельствуют приведенные ниже примеры.

Распознавание рукописного текста с помощью нейросетей используется в персональных электронных органайзерах многих фирм, в частности в моделях ThinkPad (IBM) и Newton (Apple Computers). Использование нейросети в орга-

---

найзере ThinkPad уменьшило число ошибок на 40% по сравнению с прежней системой распознавания, а в последней версии Newton нейросетям удалось, по некоторым сведениям, достичь поистине впечатляющих результатов.

Многие банки разрабатывают системы считывания рукописных форм, таких, как банковские чеки. Подобная система Quick Strokes-IFPS фирмы Mitek Systems была установлена в 1993 году в Федеральном резервном банке Чикаго.

По заказу федеральной почтовой службы США была разработана нейросеть для распознавания почтовых индексов. После тренировки сети с использованием около 10,000 цифр с реальных конвертов, достигнута вероятность ошибки около 1 % (в 9% случаев сеть отказывалась гарантировать точность распознавания).

Фирма Nestor Inc. разработала систему распознавания японских иероглифов Каньи. В первоначальной версии система могла распознавать около 2500 иероглифов с точностью 92%, что соответствует уровню грамотности рядового японца (от 1800 до 3000 иероглифов).

**Распознавание речи** также имеет большое практическое значение – в системах управления или в быту – когда человек управляет электронными приборами голосом, для ввода текстовой информации – вместо стенографисток, для систем искусственного перевода, например, в реальном масштабе времени при международных разговорах. Пока что успехи нейросетей в этой области ограничены, в основном, убедительными доказательствами их способности к распознаванию отдельных групп фонем, превосходящих остальные методы распознавания. Хороший обзор этого направления можно найти в работе [6].

**Искусственные органы чувств.** Кроме зрительной информации и слуха существуют и другие виды сенсорной информации. У человека их всего пять, однако, ничто не ограничивает число искусственных «органов чувств» у компьютеров. Любые приборы и датчики способны поставлять различного рода сенсорную информацию, расширяя окно общения компьютеров с внешним миром. В качестве примеров сенсорных образов могут служить тепловые и радиационные поля в ядерных реакторах, химический состав рабочей смеси в химических и биохимических реакторах, показания радаров, сонаров и сейсмо-датчиков и т.д. Несколько примеров применения нейросетей в этой области приведено ниже.

Нейросеть, разработанная для диспетчерских служб аэропортов, распознает и отслеживает объекты «существенно лучше, чем существующие системы, основанные на статистической обработке сигналов» (Deng & Haykin, Communications Research Laboratory, IJCNN, 1990).

Система распознавания подлодок по показаниям сонаров, разработанная фирмой Science Applications International Corporation, способна к постоянному дообучению в процессе эксплуатации.

Нейросети используются фирмой Амосо для выделения характерных пиков в показаниях сейсмических датчиков. Надежность распознавания пиков – 95% по каждой сейсмо-линии.

**Анализ ситуаций.** Нейросети способны распознавать информационные образы различной природы: не только идентифицировать объекты, как в случае радаров и сонаров, но и анализировать ситуации. Например, нейросеть – индикатор аварийной ситуации или индикатор инвестиционного риска. Приведем не-

---

сколько примеров использования нейросетей в этом качестве в бизнесе.

Ford Motors Company внедрила у себя нейро-систему для диагностики двигателей по показателям 31 датчика. «После полного цикла обучения качество диагностирования неисправностей сетью достигло уровня наших лучших экспертов и значительно превосходил о их в скорости» (Marko K, et al , Ford Motors Company, Automotive Control Systems Diagnostics., IJCNN 1989).

Один из известных банков США использовал статистические данные о собственных убытках для обучения нейросети. После обучения новая система, проанализировав 100 тысяч счетов, выявила более 90% потенциальных неплательщиков.

Исследовательская группа из Портсмута (UK) пришла к выводу, что обученная нейросеть дает оценки недвижимости близкие к экспертным заключениям специалистов. Фирма Richard Borst, торгующая недвижимостью, увеличила свой оборот в Нью-Йорке и Пенсильвании на 6%, внедрив нейро-пакет для уточнения оценки выставляемых на продажу домов и квартир.

Внедрение нейро-системы для анализа риска размещения банковских кредитов в одном случае дало компании прирост дохода более 7%, что в абсолютных цифрах «выражается семизначным числом, и вдобавок система обладает способностью постоянно переучиваться по вновь поступающей информации», (M. Smith, Adaptive Decision Systems, 1988).

Благодаря присущему им параллелизму, нейросети могут служить мощными информационными фильтрами, отбирающими из больших потоков информации интересную для данного пользователя. Причем, для этого не требуется формального определения степени «интересности» сообщений, если таковое вообще возможно. Подобные фильтры могут формироваться автоматически в процессе отбора интересной информацией самим пользователем. Такие электронные секретари, сортирующие громадные объемы информации, доступные сегодня через глобальные сети, видимо, станут неотъемлемым атрибутом по-настоящему персональных ЭВМ недалекого будущего. Пока же подобные информационные фильтры активно используются, в частности, в финансовой деятельности.

Chemical Bank использует нейро-систему фирмы Neugal Data для предварительной обработки транзакций на валютных биржах 23 стран, фильтруя «подозрительные» сделки.

Многие пенсионные фонды используют нейросети для оптимизации управления портфелями клиентов. Так, Fidelity of Boston использует нейросети при управлении портфелями с суммарным объемом \$3 миллиарда. Нейросети производят предварительное ранжирование ценных бумаг, просеивая огромные массивы биржевой информации. Полностью автоматизированные системы ведения портфелей с использованием нейросетей применяют, например, Deege & Co – на сумму \$100,000,000 и LBS Capitol- \$400,000,000. В последнем случае экспертная система объединяется с около 900 нейросетями.

**Робототехника.** До сих пор, движущей силой компьютерной революции была автоматизация труда «белых воротничков». Внедрение компьютерной техники на производстве идет гораздо медленнее, т.к. для замены человека здесь требуется умение оперировать не символьной, а сенсорной информацией. На современном производстве человек выполняет, в основном, роль контролера, рас-

---

познающего ситуации и принимающего соответствующие решения. Все формализованные операции уже автоматизированы либо в автоматических линиях, либо в станках с ЧПУ и первом поколении роботов-манипуляторов с жесткой программой действий. Осталось «немногое» – научить роботов видеть, ориентироваться в окружающей среде, принимать решения и осуществлять их. Именно нейронные сети должны стать основными компонентами роботов новых поколений, второго – оснащенного зрением, и третьего – принимающего решения самостоятельно. Нейросетевая парадигма позволит преодолеть два главных препятствия на пути робототехники – отсутствие сенсорных устройств и трудность программирования поведения во внештатных ситуациях.

В качестве стимулов к роботизации производства называются [5].

- Уменьшение затрат на постоянно дорожающую рабочую силу (на заводах General Motors увеличение зарплаты на 1 \$/час делает экономически выгодным внедрение 1000 роботов). Не случайно лидером робототехники является автомобильная промышленность, где зарплаты традиционно выше, чем в других отраслях.

- Уменьшение простоев оборудования за счет многосменной работы и отсутствия отпусков у роботов.

- Улучшение качества работы, т.к. роботы не утомляются. По признанию менеджеров автомобильной промышленности, для них это пока главный стимул внедрения роботов. Этим же объясняется лидерство Японии с относительно дешевой в недавнем прошлом рабочей силой в производстве и внедрении роботов.

- Гибкость производства, основанного на роботах, по сравнению с массовым производством. Например, в результате нефтяного кризиса 70-х годов «Большая тройка» автомобильной промышленности США вынуждена была перейти с 8-цилиндровых на 6- и 4-цилиндровые двигатели. В результате, почти весь станочный парк на соответствующих заводах был пущен на слом, и компании понесли серьезные убытки.

Роботизированное производство сочетает в себе преимущества массового производства (качество, дешевизна) и мелкосерийного производства (гибкость). Внедрение этой технологии способно коренным образом изменить нашу жизнь – как рынка товаров (ориентация на мелкосерийное и, в перспективе, индивидуальное производство по заказам пользователей), так и рынка труда (вытеснит людей из цехов, повысит общий уровень образования и т.д.). Уже роботы второго поколения, с искусственным зрением, способны, по оценкам, заменить около 40% рабочих в обрабатывающей промышленности [5].

### **Выводы.**

Возрастание интереса к нейросетям, отмечаемое в последнее десятилетие, – не дань моде, а устойчивая тенденция, что массовое внедрение нейросетей являются логическим продолжением компьютерной революции. Нейросети должны стать одной из массовых компонент компьютерной технологии XXI века. Этот факт, по-видимому, хорошо осознается в странах с развитой компьютерной индустрией, которые уже сейчас чувствуют ограниченность рынка ЭВМ без элементов искусственного интеллекта. К сожалению, в России, как это не раз случалось в прошлом, уже сейчас закладывается отставание в этой стратегически важной отрасли науки. Реализация государственной программы в области нейросе-

---

тей должна удалить отставание в этой стратегически важной области.

*Литература*

1. Чернавский, Д. С. Распознавание. Аутодиагностика. Мышление / Д. С. Чернавский // М.: «Радиотехника». – 2004.
2. Артюшенко, В. М. Организация информационного обмена между элементами наземного комплекса управления группировкой космических аппаратов / В. М. Артюшенко, Б. А. Кучеров // Прикладная информатика. – 2014. – №1(49). – С.33-43.
3. Артюшенко, В. М. Сервис информационных систем в электротехнических комплексах / В. М. Артюшенко, Т. С. Аббасова // Монография. – М., 2010 г.



## **Проектные решения для автоматизированной системы распределения средств управления космическими аппаратами**

**Б.А. Кучеров**, аспирант,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Рассматриваются вопросы, связанные с проектными решениями для автоматизированной системы распределения средств управления космическими аппаратами. Представлены проектные решения по информационному, программному и техническому обеспечению, а также по технологии сбора, передачи, обработки и выдачи информации. Отмечена важность подходящих проектных решений для соответствия создаваемой автоматизированной системы требованиям органа планирования.*

Космический аппарат, орган планирования, база данных, программное обеспечение, автоматизация.

## **Design solutions for automated system of allocation control facilities for spacecrafts**

**B.A. Kuchеров**, post-graduate student,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*Issues related to design solutions for automated system of allocation control facilities for spacecrafts are considered. Design solutions for information support, software, hardware and for technology of acquisition, transmission, processing and delivery of information are presented. The importance of appropriate design solutions to meet the requirements of planning authority to the automated system is noted.*

Spacecraft, planning authority, database, software, autumation.

### **Введение**

В настоящее время наблюдается прогрессирующий рост количества космических аппаратов (КА) в составе группировок. При этом используется мало-пунктная технология их управления. В связи с этим предъявляются совершенно новые требования к процессу управления группировкой КА в целом и к распределению средств управления КА в частности [1-6].

В складывающихся условиях возрастает нагрузка на специалистов органов управления, в частности органа планирования. Одними из важнейших требований являются требования по оперативности решения задач органом планирования. Соответствовать предъявляемым требованиям возможно за счёт использования автоматизированной системы (АС) распределения средств управления КА

---

[1, 3, 7, 8-11].

Одним из важных факторов, от которых зависит соответствие предъявляемых органом планирования требований к создаваемой АС распределения средств управления КА, является выбор подходящих проектных решения. Рассмотрим основные проектные решения по АС распределения средств управления КА.

### **Проектные решения по информационному обеспечению**

Информационное обеспечение автоматизированной системы – совокупность форм документов, классификаторов, нормативной базы и реализованных решений по объемам, размещению и формам существования информации, применяемой в автоматизированной системе при её функционировании [12].

Как известно, основными принципами построения информационного обеспечения являются [13]:

- принцип единой информационной базы данных;
- принцип одноразового ввода и накопления информации;
- принцип минимизации ввод и вывода;
- принцип централизации обработки информации;
- принцип гибкости информационной базы.

Обеспечение перечисленных выше принципов достигается за счёт использования базы данных.

Выделяют различные модели баз данных. Модель базы данных – это совокупность логических конструкций, используемых для представления структуры данных и отношений между ними внутри БД [14]. К моделям БД относятся: иерархическая, сетевая, реляционная, объектная, объектно-ориентированная и объектно-реляционная. В настоящее время реляционная модель БД (наряду с объектно-реляционной) является наиболее распространенной, вытеснив иерархическую и сетевую модели [15].

Достоинствами реляционного подхода принято считать следующие свойства [15]:

- реляционный подход основывается на небольшом числе интуитивно понятных абстракций, на основе которых возможно простое моделирование наиболее распространенных предметных областей; эти абстракции могут быть точно и формально определены;
- теоретическим базисом реляционного подхода к организации баз данных служит простой и мощный математически аппарат теории множеств и математической логики;
- реляционный подход обеспечивает возможность ненавигационного манипулирования данными без необходимости знания конкретной физической организации баз данных во внешней памяти.

В организации, эксплуатирующей орган планирования, накоплен большой опыт успешной эксплуатации системы управления базами данных (СУБД) Oracle. Данная СУБД успешно применяется в различных направлениях деятельности организации. Для тех направлений, где важны отказоустойчивость и масштабируемость, используются кластеры БД на основе Oracle Real Application Clusters (RAC). Имеется возможность привлечения квалифицированных специалистов организации для настройки и сопровождения кластера БД Oracle RAC. В

---

организации существует тенденция перехода к использованию, по возможности, только этой СУБД. Стоит отметить, что по СУБД Oracle доступна информативная и удобная в использовании документация.

Oracle Database – это производительная, масштабируемая, функциональная СУБД для решения широкого спектра задач, доступная под различные архитектуры процессоров и для различных операционных систем. В настоящее время предлагается несколько редакций Oracle Database, удовлетворяющих бизнес и информационным потребностям организаций различного уровня и бюджета. Все редакции основаны на единой архитектуре, полностью совместимы друг с другом и отличаются лицензионными ограничениями. Кроме того, существуют дополнительные программные продукты («опции» и «пакеты»), расширяющие возможности Oracle Database при решении конкретных прикладных задач [16].

Редакции Oracle Database [16]:

- Oracle Database Express Edition – бесплатная редакция, имеющая ряд ограничений (11 Гб пользовательских данных, 1 Гб оперативной памяти, 1 ядро процессора, средства обеспечения высокой доступности и т.д.).

- Oracle Database Personal Edition – редакция для монопольного использования одним пользователем. Она включает в себя все опции, кроме кластеризации, в качестве стандартной функции, без дополнительной платы.

- Oracle Database Standard Edition One – бюджетная редакция для серверов оснащенных не более чем 2 сокетами.

- Oracle Database Standard Edition – редакция для серверов или групп серверов, оснащенных не более чем 4 сокетами. Она включает в себя опцию кластеризации (Oracle Real Application Cluster) в качестве стандартной функции, без дополнительной платы.

- Oracle Database Enterprise Edition – редакция без ограничений на количество сокетов, включает ряд возможностей, не входящих в другие редакции. Только к ней можно приобретать опции и пакеты.

Проведем сравнение СУБД Oracle и СУБД Microsoft SQL Server, используемой в организации, эксплуатирующей орган планирования, в меньшей степени.

СУБД Oracle является кроссплатформенной, в то время как СУБД Microsoft SQL Server поддерживает только ОС Windows [16]. В организации, эксплуатирующей орган планирования, предпочтительной серверной ОС является Linux. Обе СУБД поддерживают кластерные технологии (СУБД Oracle – начиная с редакции Standard Edition), но кластерные технологии применительно к СУБД Microsoft SQL Server – это поддержка кластера Active-Passive, когда второй сервер находится в резерве [16]. СУБД Oracle обеспечивает одновременную работу всех узлов кластера, распределяя нагрузку между ними, что повышает отказоустойчивость системы в целом и доступность данных. Помимо этого, СУБД Oracle обладает более широкой поддержкой разнообразных триггеров (в СУБД Microsoft SQL Server не поддерживаются триггеры «до», «после», «вместо» выполнения) [16]. Это является плюсом при разработке приложений БД. Выше были перечислены достоинства СУБД Oracle по сравнению с СУБД Microsoft SQL Server. К недостаткам СУБД Oracle по сравнению с СУБД Microsoft SQL Server можно отнести более высокую стоимость лицензий.

---

Для создания кластера БД в СУБД Oracle должна присутствовать опция Real Application Clusters. Опция Real Application Clusters (RAC) позволяет строить отказоустойчивые и хорошо масштабируемые системы на основе объединения нескольких серверов. В архитектуре RAC экземпляры СУБД Oracle одновременно выполняются на нескольких объединенных в кластер системах, производя совместное управление общей базой данных. По существу, с точки зрения приложения – это единая СУБД. Такой подход позволяет достичь исключительно высокой готовности и масштабируемости любых приложений. Гибкость и эффективность планирования ресурсов позволяют наращивать мощности до любого уровня по требованию, по мере изменения потребностей бизнеса.

Решение Oracle Real Application Clusters (RAC) обеспечивает прозрачную для пользователя работу нескольких серверов с одной базой данных, обеспечивая устойчивую работу в случае сбоев оборудования или плановых отключений. Oracle RAC, работая на кластере, обеспечивает высочайшие уровни готовности, масштабируемости при низких затратах на вычислительные операции.

Учитывая вышесказанное, в качестве СУБД для разрабатываемой автоматизированной системы была выбрана СУБД Oracle Database 11g Release 1 Standard Edition с опцией Oracle RAC. Выбор редакции Standard Edition обусловлен высокими требованиями к требованиям по отказоустойчивости, доступности данных, предъявляемыми к разрабатываемой АС (т.к. редакцией Standard Edition является минимальной редакцией, поддерживающей опцию RAC).

### **Проектные решения по технологии сбора, передачи, обработки и выдачи информации**

Технологический процесс принято делить на первичный, подготовительный и основной этапы. На первичном этапе обеспечиваются сбор первичной информации, ее регистрация и передача на обработку. В разрабатываемой автоматизированной системе будут использоваться как автоматизированный, так и автоматический способы сбора и регистрации информации. Но превалировать будет автоматизированный способ.

Реализация основного этапа позволяет выполнять обработку информации и получать необходимые результаты. От полноты, достоверности и своевременности получаемой первичной информации зависит не только решение конкретной задачи, но и эффективность функционирования органа планирования в целом. Поэтому важнейшей задачей организации сбора и регистрации данных является наличие системы контроля для обеспечения полноты, правильности, комплектности и непротиворечивости данных. Системой сбора и регистрации информации должны быть охвачены все точки возникновения информации, а также должны быть обеспечены требуемые степень полноты и достоверности.

Автоматизированная передача информации в автоматизированную систему может осуществляться из входящего факса или документа на бумажном носителе полученным лично оператором.

Автоматическая передача информации в автоматизированную систему может осуществляться из xml-документа или из базы данных абонента органа планирования.

Обработка исходных данных осуществляется при выборе соответствующего пункта меню прикладной программы или автоматически при наступлении

определенного события (получения xml-файла, оповещение из БД абонента о необходимости получения информации).

Результатная информация выдается в виде отчетов.

Отчёты выдаются непосредственно при выборе соответствующего пункта меню программы на принтер или на экран, по желанию пользователя.

### Проектные решения по программному обеспечению

Программное обеспечение – это совокупность программ системы обработки информации и программных документов, необходимых для эксплуатации этих программ [17].

Как известно, программное обеспечение принято по назначению подразделять на системное (общее), прикладное и инструментальное [18].

Требования к общему программному обеспечению (ОПО) серверов составляются с учетом выбранной СУБД.

Так, ОС серверов должна быть сертифицирована корпорацией Oracle для построения кластера на основе СУБД Oracle Database 11g Release 1 с опцией Oracle RAC [19, 20].

Для работы Oracle RAC необходимо программное обеспечение (ПО) для объединения серверов в кластер. Таким ПО является Oracle Clusterware, включаемый в комплект дистрибутива СУБД Oracle начиная с версии 10g. Oracle Clusterware производит мониторинг и управления кластерными базами данных и другими программными компонентами, обеспечивающими их функционал [20, 21].

Oracle RAC строится на основе архитектуры с разделяемыми дисками, поэтому механизмы управления дисковым пространством и файловой системой в ОС на всех узлах должны поддерживать работу в кластере. Для работы с дисками рекомендуется использовать встроенную в СУБД систему автоматического управления дисковыми ресурсами для БД Oracle – Automatic Storage Management (ASM). ASM обеспечивает высокопроизводительные операции дискового ввода-вывода и простоту в управлении файловой системой и дисками. ASM автоматически производит оптимальное распределение данных между всеми дисковыми ресурсами для достижения наилучшей производительности, что исключает необходимость ручной настройки дискового ввода/вывода [20, 21].

На рисунке 1 [21] представлена схема кластера БД, построенного на основе Oracle RAC.

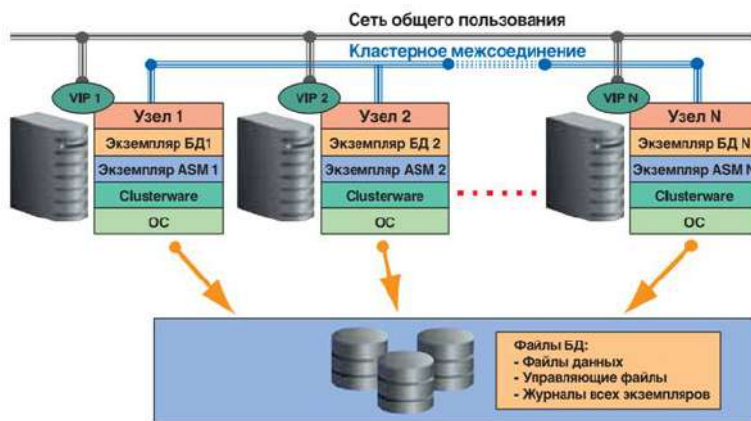


Рисунок 1 – Схема кластера БД, построенного на основе Oracle RAC

Учитывая вышесказанное, были сформулированы требования к программному обеспечению АС распределения средств управления КА.

Требования к общему программному обеспечению представлены в таблице 1, где ОС – операционная система, СУБД – система управления базами данных, ПО – программное обеспечение.

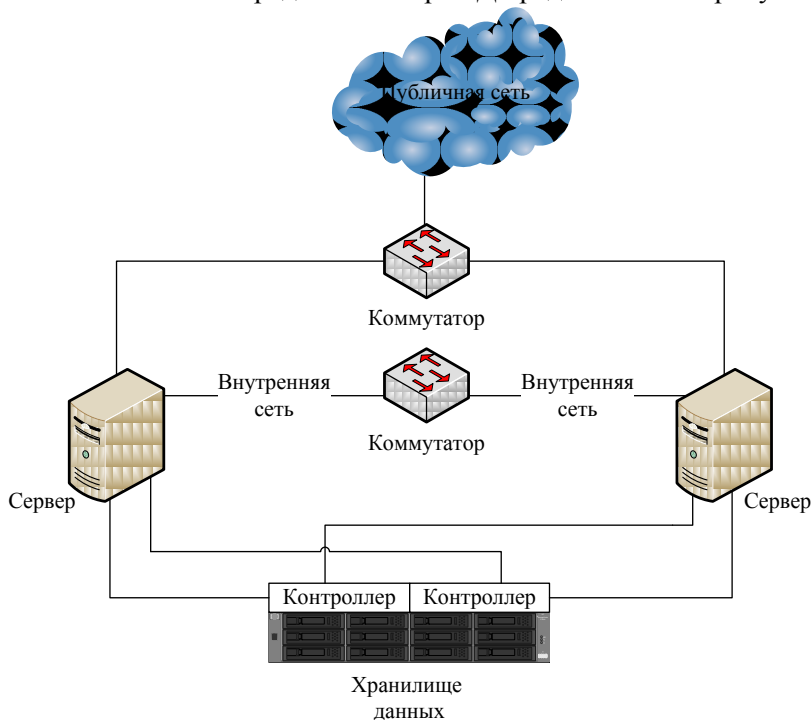
**Таблица 1 – Требования к общему программному обеспечению**

На серверах кластера БД:	
ОС	Oracle Enterprise Linux версии 5.5 или выше
СУБД	Oracle Database 11g Release 1 Standard Edition с опцией Real Application Cluster
Кластерное ПО	Oracle Clusterware
Прочее ПО	система автоматического управления дисковыми ресурсами Oracle Automatic Storage Management
На компьютерах специалистов органа планирования:	
ОС	Windows версии XP или 7
Офисное ПО	средства Microsoft Office 2007
Прочее ПО	Oracle Database Client 11g Release 1
Прочие требования	поддержка протокола TCP/IP

К преимуществам использования ОС Linux на серверах кластера БД можно отнести безопасность, стабильность работы, бесплатность [20].

**Проектные решения по техническому обеспечению**

Схема технических средств кластера БД представлена на рисунке 2 [20].



**Рисунок 2 – Схема технических средств кластера БД**

Для работы кластера необходимо две изолированных друг от друга сети [20, 21]:

- публичная сеть для связи между клиентами и серверами кластера. С использованием этой сети производится подключение клиентских сессий к базе данных, их балансировка между узлами и аварийное переключение в случае сбоя;

- приватная или внутренняя сеть, обычно называемая межсоединением (interconnect), необходимая для передачи сообщений между узлами. В RAC межсоединение используется для реализации технологии «слияния» кэш (Cache Fusion) различных узлов кластера. В большинстве случаев для обеспечения межсоединения в кластере вполне достаточно использование Gigabit Ethernet.

Учитывая вышесказанное, были сформулированы требования к техническому обеспечению АС РСУ КА (рис. 3, где БД – база данных, ПК – персональный компьютер, ЛВС – локальная вычислительная сеть, RAID – redundant array of independent disks, SATA – Serial Advanced Technology Attachment).

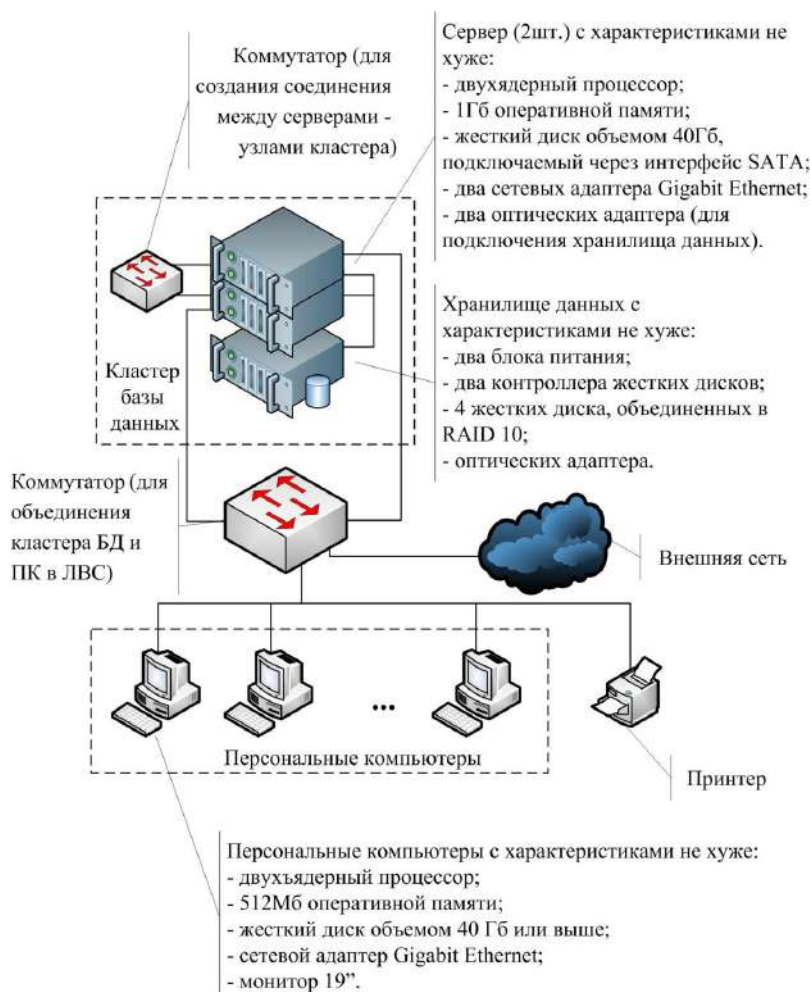


Рисунок 3 – Техническое обеспечение АС РСУ КА

---

Стоит отметить, что сервера кластера БД и персональные компьютеры специалистов органа планирования должны удовлетворять минимальным системным требованиям, предъявляемым системным программным обеспечением. Персональные компьютеры специалистов органа планирования должны обеспечивать эргономичное отображение информации. Для организации межсоединения между узлами кластера следует использовать коммутатор. Oracle рекомендует использовать отдельный коммутатор для этих целей. Организация межсоединения с помощью кросс-кабеля не сертифицировано компанией Oracle [22].

#### **Заключение.**

Таким образом, представлены основные проектные решения по автоматизированной системе распределения средств управления космическими аппаратами. Представленные проектные решения направлены на обеспечение удовлетворения требований к АС распределения средств управления КА, предъявляемых органов планирования, в частности требований по оперативности решения задач.

#### *Литература:*

1. Макаров, М. И. Анализ проблем создания перспективных технологий измерений и управления космическими средствами / М. И. Макаров, С. С. Кукушкин, В. Б. Рудков // Ракетно-космическая техника. Информационные системы и технологии. Научные труды. В 2-х т. Т. 1. М.: НИИ КС им.А.А. Максимова. – 2012. – С. 86-107.
2. Макатров, А. С. Технология глобального информационного обеспечения функционирования ракетно-космической техники / А. С. Макатров, В. Ф. Герастовский, В. П. Коновалов, В. С. Чаплинский, А. Т. Куцевалов // Ракетно-космическая техника. Информационные системы и технологии. Научные труды. В 2-х т. Т. 1. М.: НИИ КС им.А.А. Максимова. – 2012. – С. 177-190.
3. Артюшенко, В. М. Повышение оперативности бесконфликтного управления группировкой космических аппаратов в условиях ресурсных ограничений / В. М. Артюшенко, Б. А. Кучеров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. № 3. – С. 59–66.
4. Артюшенко, В. М. Информатизация управления группировкой космических аппаратов / В. М. Артюшенко, Б. А. Кучеров // Прикладная информатика. – 2013. – № 6 (48). – С. 6-14.
5. Артюшенко, В. М. Повышение эффективности систем спутниковой связи путем оптимизации параметров земных станций / В. М. Артюшенко, Т. С. Аббасова, Б. А. Кучеров // Радиотехника. – 2015. – № 2. – С. 76-82.
6. Schmidt, M. Ground Station Networks for Distributed Satellite Systems, in Distributed Space Missions for Earth System Monitoring / M. Schmidt, K. Schilling // M. D'Errico, Editor. 2013, Springer New York. p. 355-371.
7. Артюшенко, В. М. Роль информатизации в повышении оперативности распределения средств управления космическими аппаратами / В. М. Артюшенко, Б. А. Кучеров // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 4. – С. 67–72.
8. Artyushenko, V. M. Statistical Characteristics of Envelope Outliers Duration of non-Gaussian Information Processes / V. M. Artyushenko, V. I. Volovach // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). – Rostov-on-Don, Russia, September 27-30, 2013. – Khar-kov: KNURE. – 2013. –



---

pp. 137-140.

9. Артюшенко, В. М., Кучеров, Б. А. Организация информационного обмена между элементами наземного комплекса управления группировкой космических аппаратов // Прикладная информатика. – 2014. – №1 (49). – С. 33-43.
10. Артюшенко, В. М. Алгоритмы адаптации спутниковой связи по скорости передачи информации земных станций при работе в составе узловой сети / В. М. Артюшенко, Б. А. Кучеров // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7 (75). – С. 96–100.
11. Артюшенко, В. М. Оценка экономической эффективности использования автоматизированной системы распределения средств управления космическими аппаратами в условиях ресурсных ограничений / В. М. Артюшенко, Б. А. Кучеров // Вестник поволжского государственного университета сервиса. Серия «Экономика». – 2013. – № 5 (31). – С. 131–136.
12. Автоматизированные системы. Термины и определения: ГОСТ 34.003-90. Введ. 01.01.92. – М., 1990. – 14 с.
13. Артюшенко, В. М., Аббасова, Т. С., Кучеров, Б. А. Современные направления развития корпоративных сетей спутниковой связи // Двойные технологии. – 2014. – №3 (68). – С.67-72.
14. Роб, П., Корнел, К. Системы баз данных: проектирование, реализация и управление. – 5-е, перераб. и доп. изд. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2004. – 1040 с.
15. Кузнецов, С. Д. Основы баз данных: учебное пособие. 2-е, испр. изд. // М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2007. – 484 с.
16. Oracle Database производительная, масштабируемая, функциональная СУБД для среднего и малого бизнеса. OCS Distribution. [Электронный ресурс]. URL: <http://ocs.ru/OCS/media/Products/Oracle/Сравнение-СУБД-Oracle-и-Microsoft.pdf>. Дата обращения: 21.07.2015.
17. Обеспечение систем обработки информации программное. Термины и определения: ГОСТ 19781-90. Введ. 01.01.92. – М., 1990. – 15с.
18. Avritzer, A. Survivability Models for Global Software Engineering / A. Avritzer, S. Beecham, J. Kroll, M. Sadoc, J. Noll, M. Paasivaara // Proceedings of Global Software Engineering (ICGSE), 2014 IEEE 9th International Conference. –2014. – pp. 100-109.
19. Janet Stern, Mark Bauer, Vivian Schupmann, Douglas Williams. Oracle Database 2 Day + Real Application Clusters Guide 11g Release 1 (11.1). – Oracle, 2012. – 224 p.
20. Shaw, S., Bach, M. RAC Architecture, Pro Oracle Database 11g RAC on Linux. – Apress, 2010. – pp. 63-95.
21. Преимущества СУБД Oracle. [Электронный ресурс]. URL: <http://oracle.axoft.ru/fordev/advantagesOracle.php>. Дата обращения: 21.07.2015.
22. Douglas, W., Mark Bauer, Namrata Bhakthavatsalam, Jonathan Creighton, Barb Lundhild, Saar and M.M. Maoz, Hanlin Qian, Dipak Saggi, Ara Shakian, Oracle Clusterware Installation Guide, 11g Release 1 (11.1) for Linux. – Oracle, 2011. – 156 p.

## **К вопросу о межсимвольной интерференции в цифровом канале связи**

**А.И. Мамонтов**, аспирант, инженер 3-ей категории (измерительная техника),  
ОАО «НПО «Измерительной Техники», г. Королев, ЗАО «НПП «МЕРА»,  
г. Мытищи, Московская область

*Определено понятие межсимвольная интерференция (МСИ). Приведены утверждения об условиях, когда межсимвольная интерференция в линии связи равна нулю. Проведено моделирование глазковых диаграмм фильтров низкой частоты Баттерворда и Гаусса при разных соотношениях сигнал/шум в программе Vissim Comm 6. Дано несколько рекомендаций для уменьшения межсимвольной интерференции в канале связи.*

Межсимвольная интерференция (МСИ), искажения, шум, глазковая диаграмма.

### **To a question of an intersymbol interference in a digital link**

**A.I. Mamontov**, graduate student, 3-rd class engineer (electronics and measuring),  
OAO «NPO «IT», Korolev, ZAO «NPP «MERA», Mytishchi, Moskov region

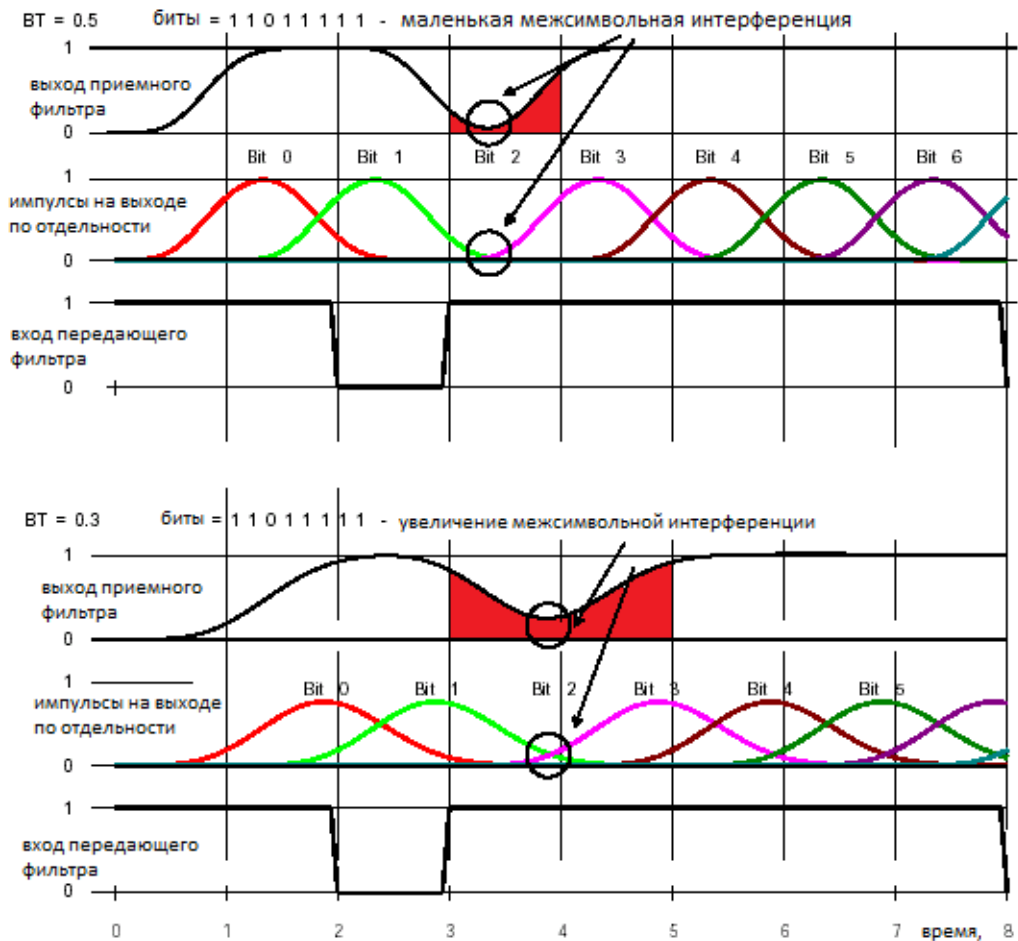
*The concept an intersymbol interference (MSI) is defined. Modern ideas of an intersymbol interference are described. Statements about conditions when the intersymbol interference in the communication line is equal to zero are provided. Modeling of eye diagrams of channel with low pass filters such as Butterworth and Gauss, at different signal to noise ratios, is carried out in program Vissim Comm 6. Some recommendations for reduction of an intersymbol interference in a communication channel are made.*

Intersymbol interference (MSI), distortion, noise, eye diagram.

Межсимвольная интерференция (МСИ) – это эффект перекрытия сглаженных откликов одного бита данных с другим из-за влияния фильтра низких частот. Когда этот эффект становится более выраженным принимающему устройству (компаратор, нуль-орган) может стать более сложно определить, что поступило из линии «1» или «0». На рис. 1 показан выход канала для последовательности цифровых данных «1 1 0 1 1 1 1» после приемного фильтра. При ВТ равном 0.5 и 0.3. Можно явно наблюдать увеличение влияния межсимвольной интерференции. Здесь В-полоса пропускания канала, Т-длительность бита.

Наиболее неприятным результатом искажений импульсов в каналах связи является то, что переходный процесс от одного импульса обычно не завершается к моменту прихода следующего. Импульсы на выходе канала связи накладываются друг на друга, искажаясь еще больше. Взаимные искажения, возникающие в результате наложения импульсов, называют межсимвольной интерференцией. Прямоугольный импульс, поданный на вход канала связи, в результате искажений, обусловленных ограниченностью полосы пропускания канала связи, и меж-

символьной интерференции может иметь на выходе максимальное значение, меньшее, чем у входного импульса, что уменьшает отсчетное значение, повышает чувствительность к шумам и помехам и увеличивает вероятность ошибки в определении отсчетного уровня.



**Рисунок 1 – Увеличение межсимвольной интерференции при уменьшении базы сигнала BT.**

Электрический сигнал может иметь задержку по времени, а также другой масштаб по амплитуде.

$$y_{\text{вых}}(t) = kx_{\text{вх}}(t - t_0) \quad (1)$$

где:

$y_{\text{вых}}(t)$  – выходной сигнал канала связи,

$x_{\text{вх}}(t)$  – входной сигнал канала связи,

$k$  – масштаб,

$t_0$  – запаздывание (или  $T_0$ ).

---

Выходной сигнал канала связи  $y(t)$  является сверткой входного сигнала  $x(t)$  с импульсной характеристикой канала связи  $h(t)$ .

$$y(t) = \int x(t)h(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

Применим к обеим частям формулы (2) преобразование Фурье:

$$y(f) = kx(f)e^{-j2\pi f T_0} \quad (3)$$

Поскольку свертка во временной области превращается в умножение в частотной области из уравнения (2) получим:

$$Y(f) = X(f)H(f) \quad (4)$$

где:

$Y(f)$  – спектр выходного сигнала,

$X(f)$  – спектр входного сигнала,

$H(f)$  – АЧХ канала связи.

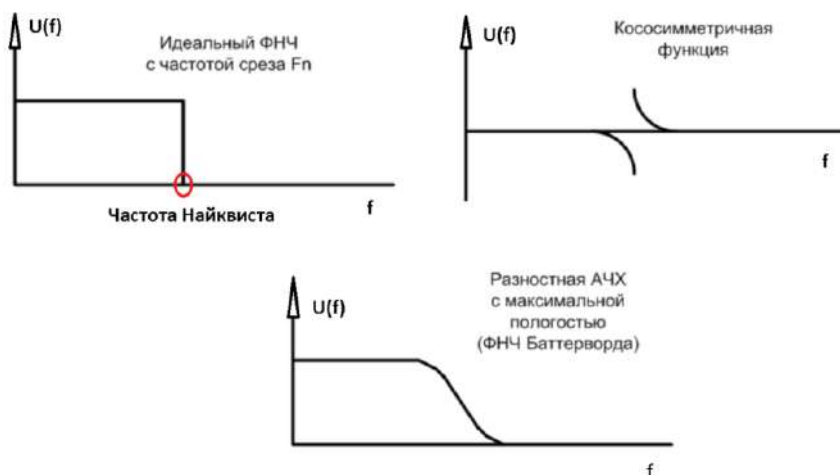
$$H(f) = Y(f)/X(f) \quad (5)$$

Подставим уравнение (1) в уравнение (5) видим, что АЧХ канала связи с нулевой МСИ имеет вид:

$$H(f) = ke^{-j2\pi f T_0} \quad (6)$$

Из уравнения (6) можно сформулировать следующие утверждение [3, стр.64]:

1. Для нулевой МСИ отклик канала связи (АЧХ) должен иметь постоянное абсолютное значение, а сдвиг фаз должен быть постоянным. Следует заметить, что такой вывод (утв. 1) сделан для канала связи в целом. Сам же канал связи состоит из фильтра, установленного в передатчике и фильтра, установленного в приемнике. Опираясь на источник [4, стр.109] можно сделать следующее утверждение,
2. При отсутствии искажений и межсимвольной интерференции, прием сигнала из канала связи после фильтра передатчика можно выполнить на согласованный с сигналом фильтр приемника. Причем, передаточная функция фильтра приемника должна быть комплексно сопряженной со спектром сигнала из канала связи, т.е. с сигналом, прошедшего фильтр передатчика.
3. Теорема Найквиста о минимальной полосе канала связи [2, стр.138] гласит: Если синхронные короткие импульсы с частотой следования  $F_s$  символов в секунду подаются в канал, имеющий идеальную прямоугольную АЧХ с частотой среза  $F_n=1/2F_s$  Гц, то отклик на эти импульсы можно наблюдать независимо, т.е. без межсимвольной интерференции.
4. Теорема Найквиста о частичной симметрии фильтра с приподнятым косинусом гласит [2,стр.140]: Суммирование действительной кососимметричной функции передачи с характеристикой идеального ФНЧ сохраняет моменты пересечения импульсной характеристики с нулевой осью. Это необходимое условия отсутствия межсимвольной интерференции. Свойство симметрии при этом рассматривается относительно частоты Найквиста  $F_n$ .



**Рисунок 2 – Идеальный фильтр Найквиста и фильтр Баттерворда**

Заметим, что указанная разность дает обычную АЧХ с максимальной пологостью, из всех известных типов фильтров, т.е. АЧХ фильтра Баттерворда. А ни какого иного фильтра. Упоминания о фильтре с приподнятым косинусом в первоисточнике нет. Этот фильтр присутствует только в названии теоремы о частичной симметрии.

Кроме того, канал связи (идеальный фильтр) с характеристикой по формуле (6) не реализуем в действительности, т.к. он нарушает принцип причинности и порядок фильтра ставит разработчиков в тупик при реализации в виде не рекурсивных фильтров из-за больших трудностей в технической реализации. Порядок фильтра от 150 и более требует больших вычислительных ресурсов, современные DSP процессоры, применяемые в цифровых каналах связи для фильтрации будут повышать цену конечного изделия, а также потреблять много энергии. Особенно это недопустимо для экономичных устройств с батарейным питанием.

Графически, теоремы Найквиста и её интерпретации разных авторов о межсимвольной интерференции в основной немодулированной полосе частот сводятся к следующему: частота среза фильтра должна быть равна частоте  $2F_n$  (частота Найквиста), групповое время запаздывания фильтра должно быть константой в полосе пропускания, а фаза линейно нарастающей (убывающей функцией) в полосе пропускания.

С помощью глазковой диаграммы возможна визуальная оценка уровня межсимвольной интерференции. По ширине «раскрытия» глазка можно судить об уровне межсимвольной интерференции.

Приведем пример – модель глазковой диаграммы в программе Vissim Com6, содержащей фильтр Баттерворда 8-го порядка рис. 4. Скорость передачи здесь будет 512 кбит/с. Отношение сигнал/шум – 100дБ. Частота среза 315кГц. «Раскрытие» глазка широкое, с запасом. Теперь приведем пример глазковой диаграммы с фильтром низкой частоты Гаусса на ту же скорость передачи бит в секунду рисунок 5. На этом графике «раскрытие» уже по вертикали, о чем

свидетельствует наличие МСИ.

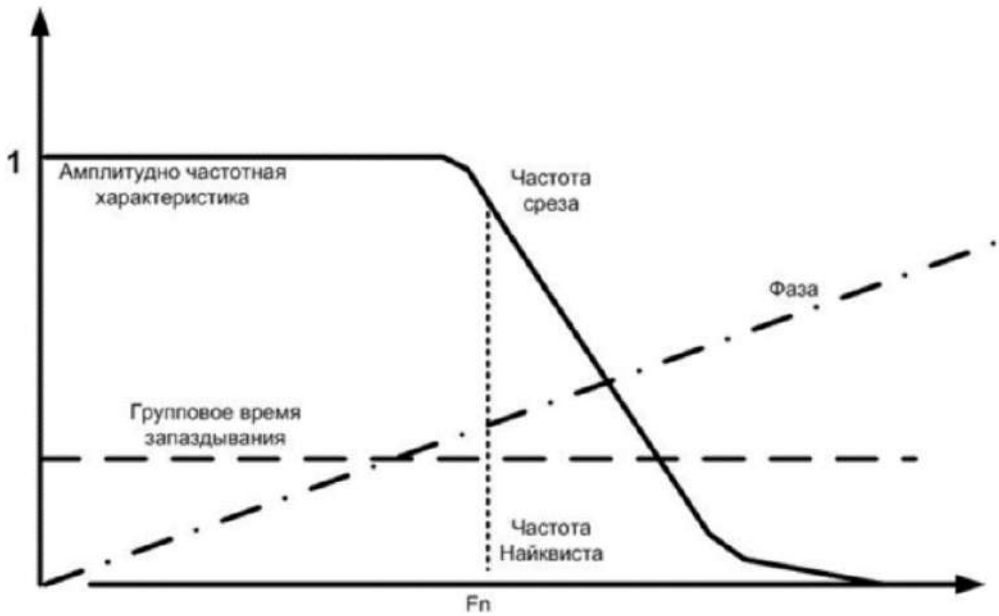


Рисунок 3 – Требование для достижения минимума межсимвольной интерференции.

Теперь рассмотрим временные диаграммы цифровых последовательностей, пропущенных через те же самые фильтры, рисунок 6.

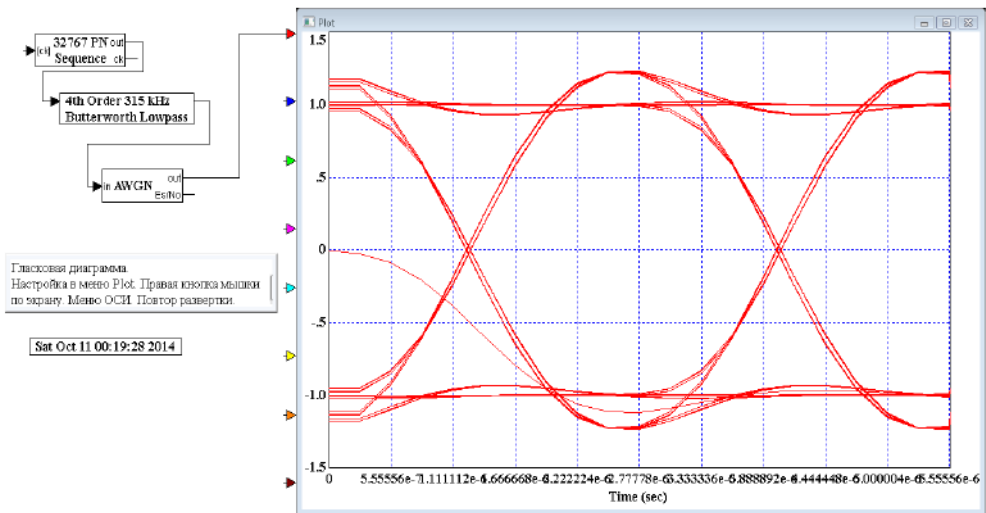


Рисунок 4 – Модель глазковой диаграммы для фильтра Баттерворда

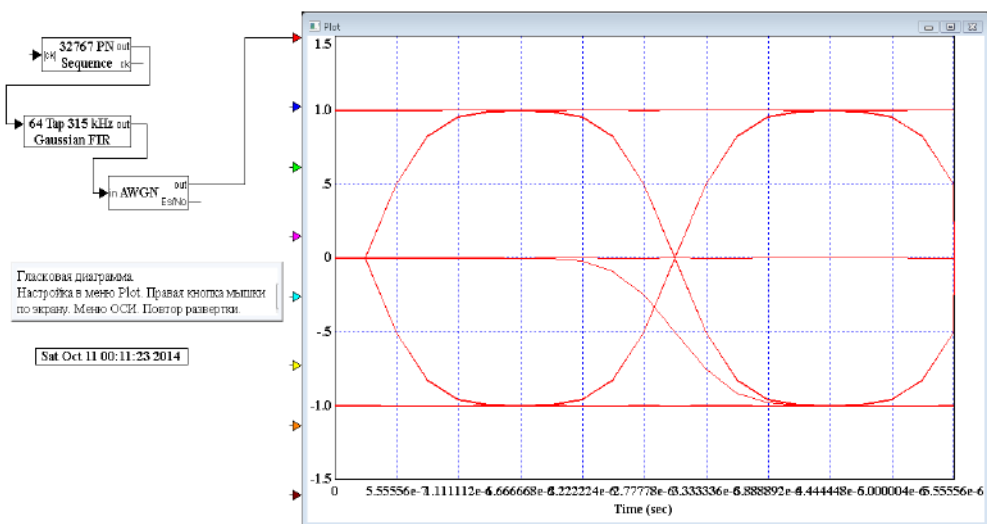


Рисунок 5 – Модель глазковой диаграммы для фильтра Гаусса

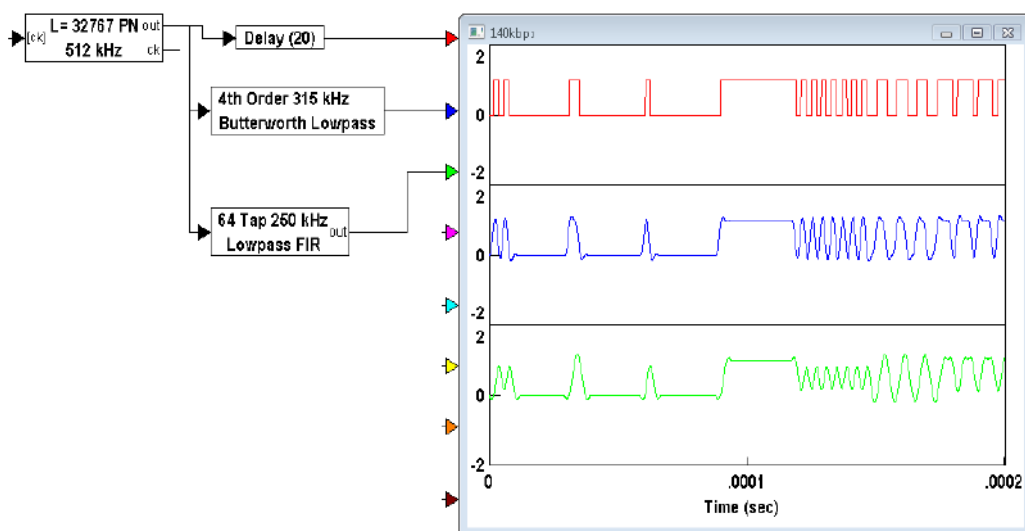


Рисунок 6 – Модель временных диаграмм цифровой последовательности, пропущенной через фильтры Баттерворда и Гаусса. Сигнал цифровой последовательности (красный), сигнал на выходе фильтра Баттерворда(синий), сигнал на выходе фильтра Гаусса(зеленый)

По рисунку можно видеть, что очень важную роль играет частота среза фильтра, от которой зависит амплитуда коротких импульсов. У фильтра Баттерворда частота среза выше (315кГц), у Гаусса ниже (250кГц), поэтому на выходе фильтра Баттерворда амплитуда коротких импульсов больше, чем у Гаусса. Это становится важным, когда в цифровом канале связи возникает шумовая помеха, которая «приближает» короткий импульс к нулевому уровню, тем самым увеличивается вероятность возникновения ошибочного бита.

В качестве подтверждения этим словам, приведем пример модели глазковой диаграммы для точно таких же фильтров рис.7,8. У фильтра Гаусса частота среза 250кГц, у фильтра Баттерворда 457кГц. То есть, коэффициент сглаживания у Баттерворда больше и его частота среза больше. Глазковые диаграммы фильтров Баттерворда и Гаусса при отношении сигнал/шум в 100дБ обе хорошо раскрыты. Но при добавлении шума в сигнал, пропущенный через фильтр, можно наблюдать следующую картину: «глазок» диаграммы у Гаусса раскрыт значительно меньше, чем у фильтра Баттерворда. Это означает, что канал связи с фильтром Баттерворда будет более устойчив к равномерной шумовой помехе (не имеются ввиду импульсные помехи), так как в этом канале связи МСИ значительно меньше, чем в канале с фильтром Гаусса.

Приведем еще один пример повышения МСИ в канале связи, касающийся применения фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ), таких как Гаусс. В цифровом КИХ фильтре его порядок задают ветвления (tap). Чем их больше, тем больше задержка сигнала, круче затухание и как показывает моделирование, выше уровень МСИ. Проведем моделирование и сравнение глазковых диаграмм. У первого фильтра Гаусса будет 512 ветвлений, у другого 64 ветвления. На рисунке видно, что «раскрытие» глазка диаграммы фильтра Гаусса с 512 ветвлениями на несколько процентов меньше, чем у фильтра Гаусса с 64 ветвлениями. Меньше как при соотношении сигнал/шум 100дБ, так и 25 дБ. При 20 дБ картина становится хуже – «раскрытие» глазка фильтра с 512 ветвлениями становится еще хуже, чем у фильтра с 64 ветвлениями.

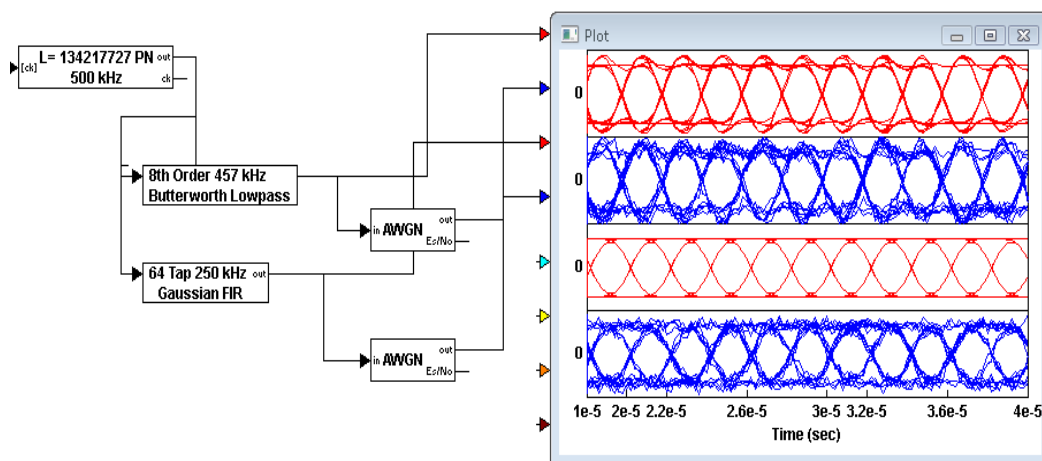
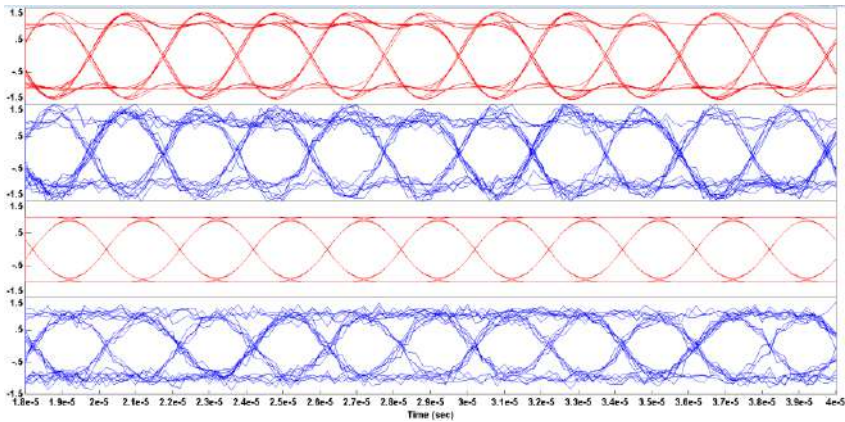


Рисунок 7 – Модель глазковой диаграммы для фильтров Баттерворда и Гаусса



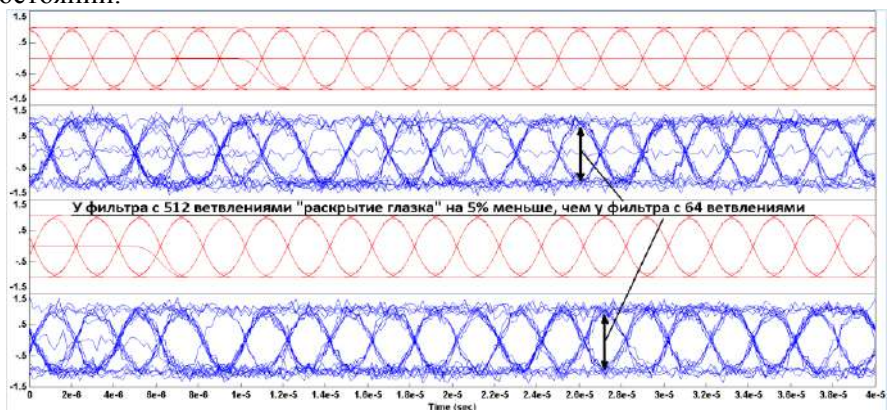


**Рисунок 8 – Глазковые диаграммы. Сверху вниз: после фильтра Баттерворда при 100дБ, после фильтра Баттерворда при 25дБ, после фильтра Гаусса при 100 дБ, после фильтра Гаусса при 25дБ**

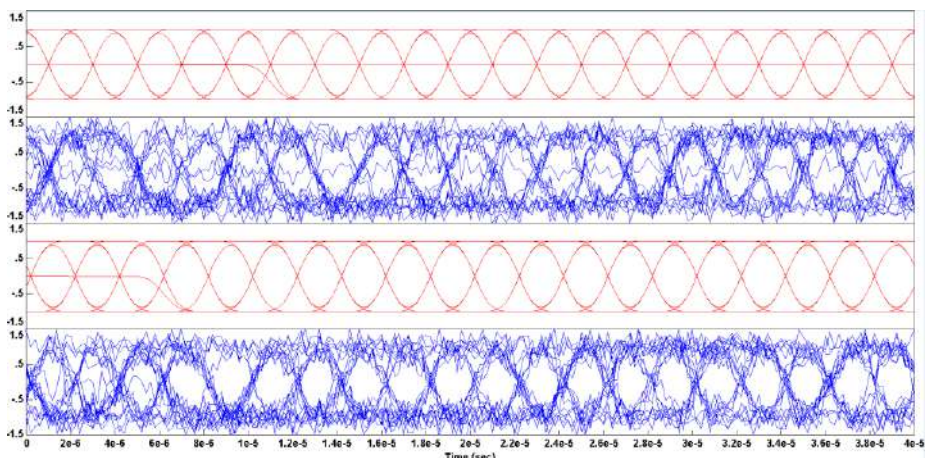
**Вывод:** Описаны современные представления о межсимвольной интерференции. Приведены утверждения об условиях, когда межсимвольная интерференция в линии связи равна нулю.

Согласно рисунку 1, при уменьшении частоты среза или значения ВТ, уровень межсимвольной интерференции возрастает. Выбирать ВТ нужно так, чтобы уровень МСИ был приемлемый и в то же время спектральная эффективность укладывалась в радиочастотную маску. При  $ВТ=1$ , например, уровень МСИ ниже, чем при 0.5, но идет проигрыш по спектральной эффективности.

Согласно рисунку 5 частота среза фильтра низкой частоты в цифровом канале связи должна быть подобрана таким образом, чтобы короткие импульсы сохраняли свое амплитудное значение на фоне матожидания (среднего значения) всей прочей амплитуды, иначе при появлении помехи в виде белого Гауссовского шума, вероятность появления ошибок возрастает. Так как шум «приближает» амплитуду коротких импульсов к пороговому уровню и приемное устройство, которое восстанавливает цифровой сигнал и находится при этом в неопределенном состоянии.



**Рисунок 9 – Сравнение глазковых диаграмм фильтров Гаусса 512 ветвлений и 64 ветвления при соотношении сигнал/шум 100дБ (1-ый, 3-ий сверху) и 25 дБ (2-ой, 4-ый сверху)**



**Рисунок 10 – Сравнение глазковых диаграмм фильтров Гаусса 512 ветвлений и 64 ветвления при соотношении сигнал/шум 100дБ (1-ый, 3-ий сверху) и 20 дБ (2-ой, 4-ый сверху)**

При применении КИХ фильтров высокий порядок приводит к появлению МСИ в канале связи рисунках 8, 9. При низких соотношениях сигнал/шум, вероятность появления ошибочных битов возрастает. Значение ветвлений не должно быть очень большим.

#### *Литература*

1. Бернард, Скляр. Цифровая связь / Скляр Бернард Альянс W, Москва, 2-е издание.: Пер. с англ. // М.: Издательский дом «Вильямс». – 2003. – 1104 с.
2. Феер, К. Беспроводная цифровая связь. Пер. с англ. / К. Феер // М.: Радио и связь. – 2000. ISBN 5-256-01444-7.
3. Прокис, Дж., Цифровая связь, Пер. с англ. /Под ред. Д.Д. Кловского // М.: Радио и связь. – 2000. – 800с. ISBN 5-256-01434-X, 007-051726-6.
4. Шувалов, В. П., Захарченко Н. В., Шварцман В. О. и др.; Под ред. В. П. Шувалова Передача дискретных сообщений. Учебник для вузов / В. П. Шувалов, Н. В. Захарченко В. О. Шварцман // М.: Радио и связь. 1990 – 464 с.

**Способ передачи телеметрической информации  
в ракетном радиоканале с мультиплексированием ортогональных не-  
сущих частот**

**А.П. Мороз**, д.т.н., с.н.с.,  
заместитель генерального директора по научной работе,  
**Д.Ю. Поленов**, аспирант, начальник группы отдела 0019,  
акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной  
техники», г. Королев, Московской области

*В статье описывается применение способа передачи телеметрической информации с борта РН с мультиплексированием ортогональных несущих частот. При этом в качестве модулированного колебания используется квадратурно-амплитудная модуляция, которая в свою очередь сравнивается с частотной модуляцией. Приводятся основные достоинства данного метода передачи, сделаны выводы, намечены пути развития данного вопроса.*

Радиоканал, передача информации, несущая частота, модуляция.

**A method for transmitting telemetry data to the missile RB multiplex of  
orthogonal carrier frequencies**

**A.P. Moroz**, Doctor of Technical Sciences,  
Deputy General Director for Research,  
**D.Y. Polenov**, PhD student, Department Head Group 0019,  
Stock company «Scientific-production Association measuring equipment», Korolev,  
Moscow region

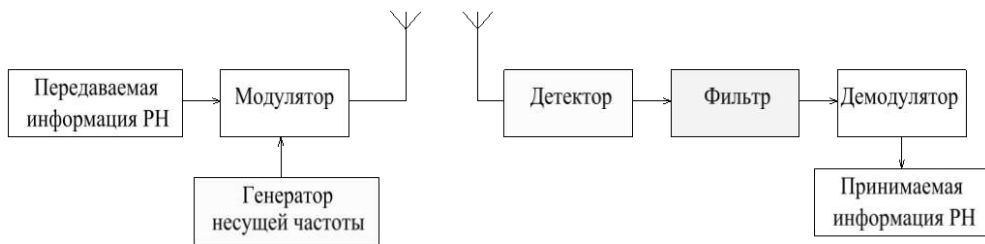
*The article describes the use of a method of transmitting telemetry data from board RN multiplex of orthogonal carrier frequencies. Thus as the oscillation modulated using quadrature amplitude modulation, which in turn is compared with frequency modulation. The basic advantages of this method of transmission, conclusions, outlines the development of this issue.*

Radio channel, information transfer, carrier frequency, modulation.

В настоящее время при передаче информации по ракетному радиоканалу (РРК) с изделий тяжелого класса (РН «Ангара», «Протон-М») применяются как цифровые, так и аналоговые методы. Из распространенных телеметрических систем (ТС), необходимых для сбора и передачи информации с подобных изделий, следует отметить ТС «Орбита-IV» и «Скут-40». Первая ТС является цифровой, вторая – налого-цифровой. У каждой из этих ТС имеются свои достоинства и недостатки. Например, ТС «Орбита-IV» имеет максимальную информативность 3,14 Мб/с. Для передачи информационного сигнала применяется ФМ-модуляция, при которой фазы несущей у двоичных сигналов «0» и «1» удалены

друг от друга на максимально возможное расстояние, что повышает помехоустойчивость ТС. Данная модуляция является эталонной по помехоустойчивости в условиях космической связи, когда «особые участки» отсутствуют. Однако передатчики с данным видом модуляции имеют более широкий спектр излучения, чем передатчики с другими видами (например, ЧМ). В свою очередь информативность системы «Скут-40» не превышает 640 тыс. изм./с. При работе на существующих устаревших приемных средствах, работающих как с аналоговым, так и с цифровым сигналом, небольшой сдвиг частоты несущего сигнала будет с искажением, но принят, в отличие от цифрового сигнала. В отличие от аналогового у цифрового сигнала при снижении отношения сигнал/шум ниже порогового резко возрастает вероятность ошибочного приема символов.

Общеизвестно, что передача сигнала по радиоканалу осуществляется с помощью модулированного колебания (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Обобщенная схема радиоканала «борт»-«Земля»**

К распространенным методам модуляции относятся вышеуказанные ЧМ и ФМ, а также АМ. Кроме того, известны их различные модификации.

В последнее время цифровые методы передачи информации постепенно вытесняют аналоговые. Это связано как с достоинствами цифровых методов, так и с быстрым развитием цифровой элементной базы, а также резким увеличением скорости обработки данных. Среди способов модуляции при передаче цифровых сигналов стоит остановиться на передаче с мультиплексированием ортогональных частот. Данный способ основан на одновременном использовании нескольких ортогональных несущих частот, кратных выбранной основной частоте [1, с. 256]:

$$U_n(t) = U_0 \cos \left[ 2\pi \left( f_0 + \frac{n}{T_s} \right) t \right], \quad (1)$$

где:  $f_0$  – основная несущая частота;

$n$  – номер несущей,  $n = \overline{1, N - 1}$ ,  $N$  – количество несущих;

$T_s$  – длительность передачи одного символа.

Способ передачи информации с мультиплексированием ортогональных частот применяется в цифровом телевидении:

1) формата DVB-S [4, с. 120], где для передачи каждой несущей используется четырехпозиционная фазовая модуляция;

2) формата DVB-S2, разработанным позднее и имеющим больше возможностей по сравнению с DVB-S. В качестве метода модуляции здесь применяется 16-ти или 64-х позиционная квадратурная амплитудная модуляция (КАМ).

Суть данного вида модуляции заключается в разбиении последовательно-

сти символов цифрового кода (информационный код –  $U_{\text{ин}}$ ) и передаче отдельного символа на своей несущей частоте ( $U_1, U_2, U_3$  и  $U_4$ ). Таким образом, получается параллельная передача символов [3, с. 78]. Чем больше несущих используется при радиопередаче, тем дольше длительность символа, передающегося соответствующей ему несущей.

Рассмотрим передачу информационного кода при разложении его по четырем несущим частотам (рисунок 2). По приходу на вход передатчика первого разряда информационного кода – «1» (интервал  $t_1 - t_2$ ) данный символ поступает на вход модулятора первой несущей. При появлении второго разряда информационного кода – «0» (интервал  $t_2 - t_3$ ) данный символ поступает на вход модулятора второй несущей. И так до появления четвертого разряда – «1» (интервал  $t_4 - t_5$ ). При поступлении на вход передатчика пятого разряда информационного кода – «1» (интервал  $t_5 - t_6$ ) передача первого символа на первой несущей заканчивается и начинается модулированное колебание первой несущей для передачи пятого разряда информационного кода. И так далее до конца сеанса радиосвязи.

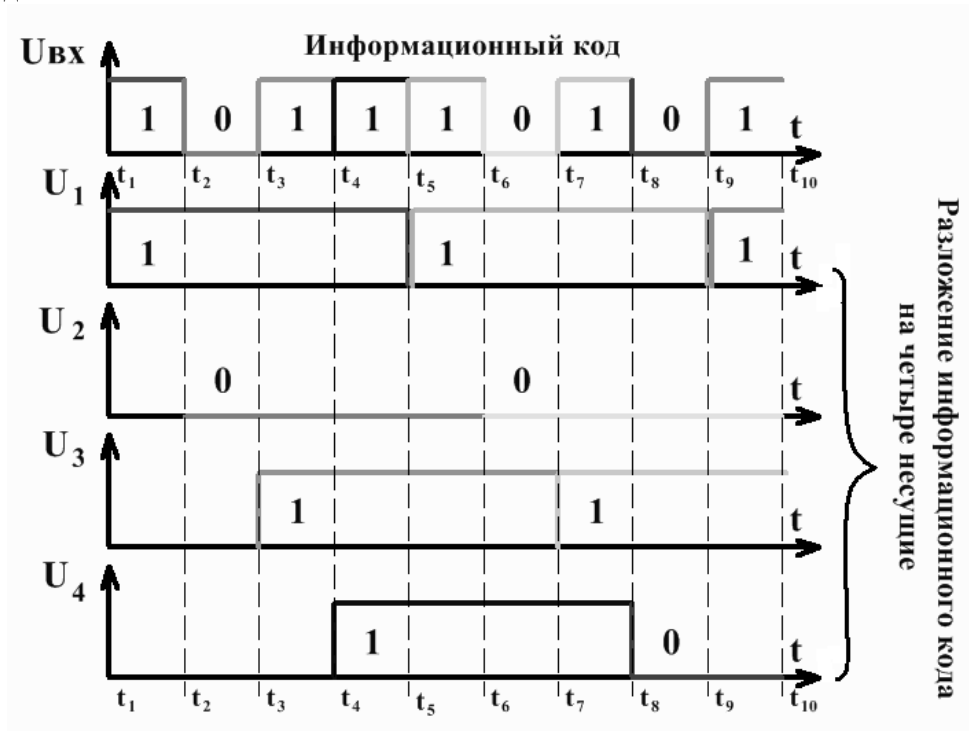


Рисунок 2 – Пример разложения цифрового сигнала

Для исключения взаимовлияния несущих частот друг на друга спектр каждой частоты должен иметь нули на расположении других несущих. При этом, несмотря на то, что боковые полосы разных несущих перекрываются, взаимные помехи будут равны нулю [1, с. 257]. Для верного расположения соседних несущих частот необходимо пользоваться следующим правилом:

$$f_n = f_0 + n \frac{1}{T_s}, \quad (2)$$

где  $f_n$  – значение частоты  $n$ -ой несущей.

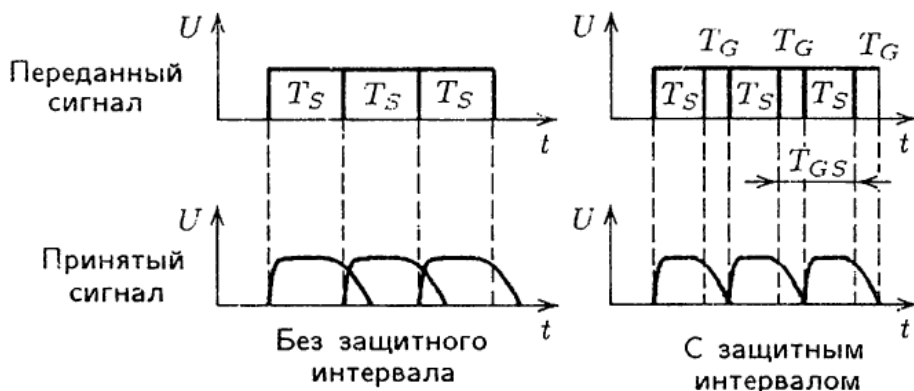
Так, в случае использования четырех несущих частот при  $f_0 = 320$  кГц, спектр будет равен 400 кГц.



**Рисунок 3 – Частотный спектр сигнала при мультиплексировании ортогональных частот**

Для исключения искажений между символами здесь применяется «защитный интервал», за длительность которого обычно берется  $\frac{1}{4}; \frac{1}{8}; \frac{1}{16}; \frac{1}{32}$  часть символьного интервала [1, с. 257]. Таким образом, длительность символа равна сумме длительности полезной информации ( $T_{inf}$ ) и защитного интервала ( $T_{def}$ ) [3, с. 77]:

$$T_s = T_{inf} + T_{def} \quad (3)$$



**Рисунок 4 – Передача символов с использованием защитного интервала и без него**

В качестве переносчика телеметрической информации сравним применение 2-, 4-, 16- и 64-КАМ с 2-, 4-, 16- и 64-ЧМ модуляций. Стоит отметить, что в КАМ при передаче цифрового сигнала изменяется как амплитуда, так и фаза несущей.

Рассмотрим использование данного вида радиопередачи на примере ТС «Скут-40». Параметры радиолинии:

- вид модуляции: ЧМ;
- кодирование информации: двух-, четырехпозиционный код (2ПК, 4ПК);
- допустимая вероятность битовой ошибки:  $P_b = 10^{-4} \dots 10^{-5}$ ;

- тактовая частота: 320 кГц;
- частота несущей: ~200 МГц.

Как известно, ортогональная M-арная передача, т.е. радиопередача с неизменной фазой и символами, состоящими из нескольких ( $k$ ) разрядов имеет алфавит:

$$M = 2^k, \quad (4)$$

где  $M$  – размер алфавита, соответствует частотной модуляции, используемой при передаче цифровой информации. При этом скорость передачи символов соответствует [2, с. 132]:

$$R_s = \frac{R}{\log_2 M}, \quad (5)$$

где  $R$  – скорость передачи битов.

Полоса пропускания ( $B$ ) равна произведению [2, с. 134]:

$$B_{\text{ЧМ}} = M \cdot R_s \quad (6)$$

В свою очередь, полоса пропускания при неортогональной передаче (изменении фазы сигнала) соответствует скорости передачи символов [2, с. 134]:

$$B_{\text{КАМ}} = R_s. \quad (7)$$

Полученные из формул (6) и (7) результаты расчетов представлены в таблице 1 и приведены на рисунке 5.

**Таблица 1 – Зависимость полосы пропускания от позиционности кода при ЧМ и КАМ**

Вид модуляции	Основание кода			
	2	4	16	64
ЧМ	640 кГц	640 кГц	1280 кГц	3400 кГц
КАМ	320 кГц	160 кГц	80 кГц	50 кГц

На основании данных таблицы 1 можно сделать вывод о значительном сужении ширины полосы частот в случае применения КАМ.

Но при этом повышается требуемое отношение энергии бита к мощности шума ( $\frac{E_b}{N_0}$ ), что приведено на рисунке 7.

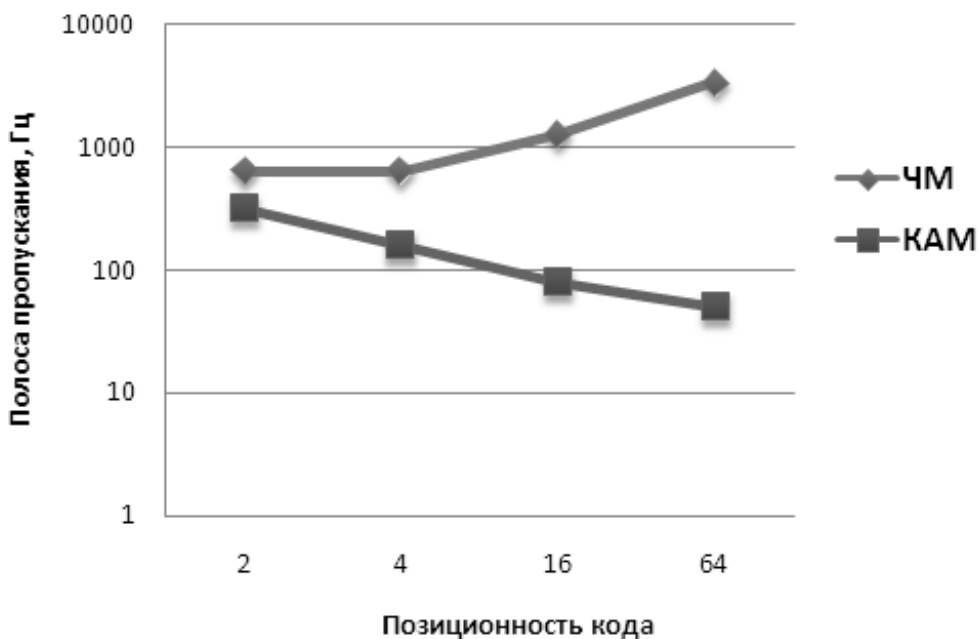
В случае использования ЧМ-модуляции вероятность ошибки равна [2, с. 139]:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (8)$$

В свою очередь для КАМ-модуляции вероятность ошибки равна [2]:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (9)$$

$Q(x)$  – гауссов интеграл ошибок.



**Рисунок 5 – Зависимость полосы пропускания от позиционности кода при ЧМ и КАМ**

Исходя из рассмотренных особенностей, можно сделать вывод об одинаковых значениях отношений  $\frac{E_b}{N_o}$  при работе в 2ПК ( $\frac{E_b}{N_o} = 10$  дБ) и небольшом отклонении (примерно 2дБ) при работе в 4ПК, что также подтверждает перспективность применения КАМ при больших основаниях кода.

При дальнейшем увеличении позиционности кода зависимость  $P_b$  от  $\frac{E_b}{N_o}$  растет в случае применения КАМ и падает, когда используется ЧМ.

При отсутствии жестких ограничений в мощности передатчика применение метода с ортогональными несущими и использование КАМ создает благоприятные условия для совершенствования ракетного радиоканала. Также существуют возможности применения 256- и 512-КАМ, но при этом увеличивается длительность каждого символа.

Для сравнения разных видов модуляций существует понятие «Эффективность использования полосы частот» [7, с. 509], равное отношению скорости передачи к минимальной полосе частот, вычисляемое по формуле:

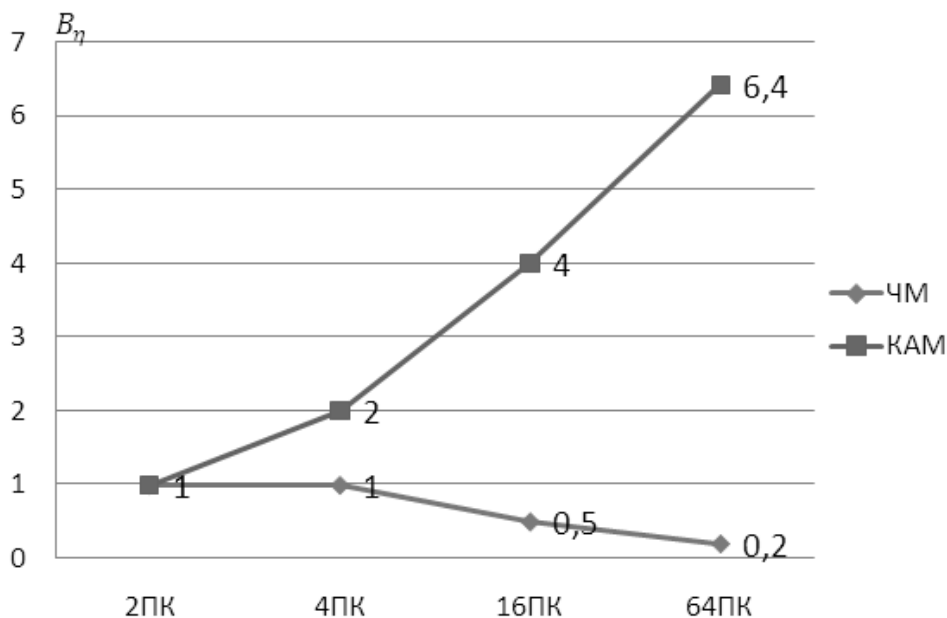
$$B_{\eta} = \frac{B}{f_N} \quad (10)$$

Сравним ранее рассмотренные методы модуляций по данному параметру. Данные, полученные из формул (6), (7) и (10), приведены в таблице 2 и соответствуют рисунку 6.



**Таблица 2 – Сравнение ЧМ и КАМ по эффективности использования полосы частот**

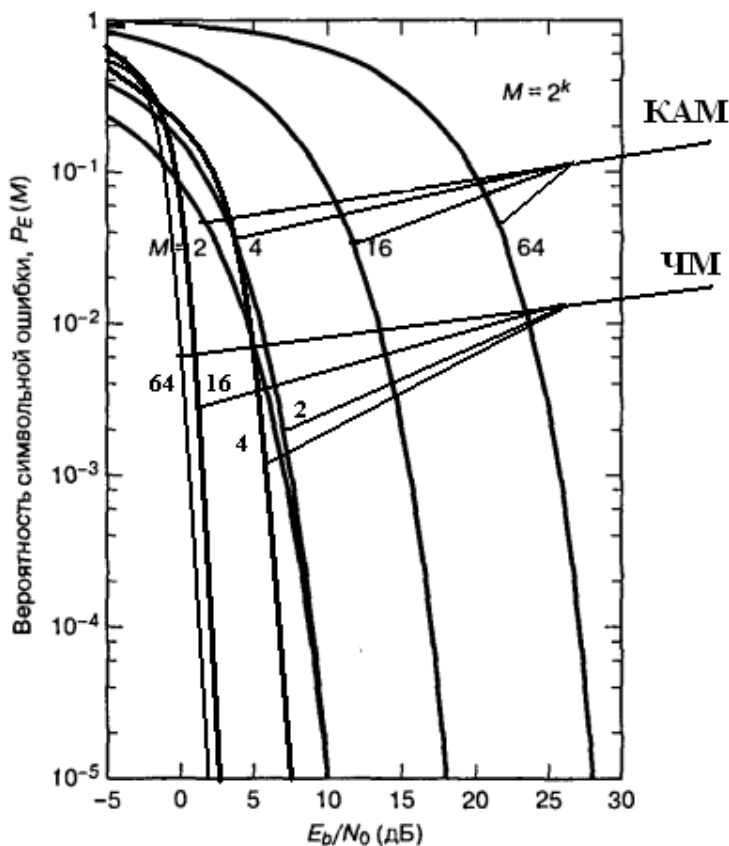
Основание кода	Вид модуляции	
	ЧМ	КАМ
2	1	1
4	1	2
16	0,5	4
64	0,2	6,4



**Рисунок 6 – Сравнение ЧМ и КАМ по эффективности использования полосы частот**

Таким образом, при использовании  $M$ -арной передачи символов и применении ЧМ эффективность использования полосы частот снижается при увеличении позиционности кода. В случае  $M = 2$  разница в применении ЧМ или КАМ отсутствует, но при постепенном увеличении  $M$  данный показатель увеличивается в КАМ и снижается в ЧМ соответственно.

Для упрощения решения схемотехнических вопросов создания передатчиков, связанных с большим количеством синтезаторов и модуляторов, можно применить обратное преобразование Фурье с внедрением алгоритмов по перемножению коэффициентов гармоник соседних несущих.



**Рисунок 7 – Отношение вероятности ошибки к мощности сигнала с шумом для ЧМ и КАМ**

В качестве перспектив дальнейших исследований предлагается рассмотреть:

- внедрение принципов помехоустойчивого кодирования передаваемой информации;
- применение адаптивного кодирования на «особых» участках следования РН (старт, разделение ступеней);
- изменение скорости кодирования [4, с. 312] в случае изменения качества связи (отношения сигнал/шум).

Однако применение в информационной послылке дополнительных служебных разрядов для кодирования информации сделает подобную систему несколько избыточной [6, с. 334.].

Основным достоинством способа передачи телеметрической информации в ракетном радиоканале с мультиплексированием ортогональных несущих частот является увеличение длительности передачи информационного символа, а также защита символов от интерференционных помех.

Выводы.

---

1. Применение описанного способа увеличивает время передачи каждого информационного символа (в предлагаемом случае в четыре раза).

2. Внедрение защитного интервала между символами длительностью  $\frac{1}{4}$ ;  $\frac{1}{8}$ ;  $\frac{1}{16}$ ;  $\frac{1}{32}$  части от символьного интервала обеспечивает защиту передаваемых символов от интерференционных помех

3. Использование в качестве модулированного колебания КАМ сужает полосу частот в сравнении с ЧМ в 2, 4, 16, 64 раза при рассмотрении соответствующей позиционности кода.

4. Для фиксированного значения вероятности битовой ошибки необходимое значение отношения сигнал/шум при увеличении позиционности кода для ЧМ оказывается меньше, чем для КАМ.

5. Для обеспечения фиксированной вероятности битовой ошибки при увеличении количества несущих частот необходимая мощность передатчика каждой из несущих частот снижается обратно пропорционально количеству несущих.

#### *Литература*

1. Мамчев, Г. В. Основы радиосвязи и телевидения Учебное пособие для вузов / Г. В. Мамчев // М: Горячая линия-Телеком. – 2007. – 416 с.
2. Скляр, Бернард Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание, пер. с англ. / Бернард Скляр // М.: Издательский дом «Вильямс». – 2003. – 1104 с.
3. Джакония, В. Е., Гоголь, А. А., Друзин, Я. В. и др. Телевидение: Учебник для вузов / В. Е. Джакония, А. А. Гоголь, Я. В. Друзин // М.: Радио и связь. – 2003. – 616 с.
4. Корякин-Черняк, С. Л. Энциклопедия спутникового телевидения / С. Л. Корякин-Черняк // СПб.: Наука и Техника. – 2010. – 416 с.
5. Харкевич, А. А. Основы радиотехники, 3-е изд., стер. / А. А. Харкевич // М: ФИЗМАТЛИТ. – 2007. – 512 с.
6. Цифровые системы передачи: Учебное пособие для вузов / В. В. Крухмалев, В.Н. Гордиенко, А. Д. Моченов // М.: Горячая линия – Телеком. – 2007. – 352 с.

## **Методика передачи данных, представленных остатками для двух модулей сравнения**

**Д.Н. Прасолов**, инженер АО «НПО ИТ», г. Королев, Московской области

*Рассмотрен принцип телеизмерений для класса телеметрических процессов, обладающих априорно известными свойствами непрерывности. Он заключается в передаче только одного остатка  $b_1(t)$  по модулю  $m_1$  параметра  $x(t)$ , который дублируется в двоичном слове данных. При этом в моменты его обнуления (ноль в 4-х младших разрядах) вместо дублирования к нему присоединяется результат сравнения параметра  $x(t)$   $b_2(t)$  по модулю  $m_2 = m_1 - 1$ , который образует 4 старших разряда двоичного слова. Шкала телеметрирования в этом случае окажется поделенной на множество шкал результатов телеизмерений, ограниченных модулем  $m_1$ . При этом подставленные значения результатов сравнения по модулю  $m_2$  будут маркерными значениями (маркерными словами), которые в двоичном коде определяют номер связанной с ними шкалы.*

Телеизмерения, непрерывность процессов, передача остатками.

## **Technique of the data transmission, presented by the rests for two modules of comparison**

**D.N. Prasolov**, the engineer of joint-stock company «Research and production association of measuring technics», Korolev, Moscov region

*The principle of telemeasurements for a class of the telemetering processes possessing a priori known properties of a continuity is considered. It consists in transfer only one rest  $b_1(t)$  on the module  $m_1$  parameter  $x(t)$  which is duplicated in a binary word of data.*

*Thus during the moments of its zeroing (the zero in 4 younger categories) instead of duplication to it joins result of comparison of parameter  $x(t)$   $b_2(t)$  on the module  $m_2 = m_1 - 1$  which forms 4 senior categories of a binary word. The scale of the telemeasurements in this case will appear divided on set of scales of results of the telemeasurements limited by the module  $m_1$ . Thus the substituted values of results of comparison on the module  $m_2$  will be marker values (marker words) which in a binary code define number of the scale connected with them.*

Telemeasurements, a continuity of processes, transfer by the rests.

Для класса телеметрических процессов, обладающих априорно известными свойствами непрерывности, возможен следующий принцип телеизмерений. Он заключается в передаче только одного остатка  $b_1(t)$  по модулю  $m_1$  параметра  $x(t)$ , который дублируется в двоичном слове данных. При этом в моменты его обнуления (ноль в 4-х младших разрядах) вместо дублирования к нему присоединяется результат сравнения параметра  $x(t)$   $b_2(t)$  по модулю  $m_2 = m_1 - 1$ , который образует 4 старших разряда двоичного слова. Шкала телеметрирования в

---

этом случае окажется поделенной на множество узких неперекрывающихся шкал результатов телеизмерений, ограниченных модулем  $m_1$ . При этом подставленные значения результатов сравнения по модулю  $m_2$  будут маркерными значениями (словом-маркером), которые в двоичном коде определяют номер связанной с ними узкой шкалы.

Указанные двоичные слова с дублированием остатков восстанавливаются при приеме по методике, по которой значения двоичных слов умножаются на коэффициент  $1/(2^4 + 1)$  [1].

В рассмотренной методике передачи данных маркерные значения для узких шкал должны передаваться в момент перехода в конкретную шкалу, т.е. когда точка опроса впервые попадает в конкретную шкалу. При этом сразу после передачи маркерного значения передаются собственно результаты измерения в данной узкой шкале, и так происходит до перехода к следующей узкой шкале. Таким образом, происходит «привязка» измеренных значений параметра к конкретной узкой шкале во всей шкале измерений.

При исследовании влияния помех рассматривается двухмодульное преобразование с использованием модулей сравнения  $m_1=16$ ,  $m_2=15$ . Исходные данные составляют диапазон значений от 0 до 255 (шкала измерений), который превосходит диапазон, образованный с помощью модулей сравнения ( $m_1 * m_2 = 240$ ), на 15 единиц (на 6% шкалы). Полученные в результате преобразования в системе остаточных классов (СОК) два полуслова-остатка можно рассматривать с точки зрения традиционного позиционного представления как одно восьмиразрядное двоичное слово [2].

При передаче по радиоканалу двоичных слов они подвергаются влиянию помех, приводящих, в основном, к искажению одиночных символов в двоичном слове. При этом представляет интерес сравнительное исследование влияния помех при традиционном представлении данных и представлении данных в СОК. При сравнительном исследовании применяется методика вычисления и сравнения погрешностей передачи данных, предусматривающая выполнение следующих операций:

1) определение погрешностей при переходе символов из логич. 1 в логич. 0 в каждом разряде двоичного слова при традиционном представлении данных и представлении данных в СОК.

2) определение погрешностей при переходе символов из логич. 0 в логич. 1 в каждом разряде двоичного слова при традиционном представлении данных и представлении данных в СОК.

3) вычисление квадратов полученных погрешностей в каждом разряде двоичных слов.

4) вычисление значений дисперсий погрешностей в каждом разряде путем деления сумм их квадратов на число двоичных слов исходных данных при традиционном представлении данных и представлении данных в СОК.

5) вычисление средних значений дисперсий погрешностей по всем разрядам двоичных слов исходных данных при традиционном представлении данных и представлении данных в СОК.

6) вычисление отношения средних значений дисперсий погрешностей по всем разрядам при традиционном представлении данных и представлении дан-

---

ных в СОК.

Полученные результаты вычислений погрешностей передачи информационных двоичных слов при традиционном представлении данных и представлении данных в СОК для модуля сравнения  $m_1=16$  приведены в таблице 1.

Выражение для вычисления значений дисперсии может быть определено исходя из того, что в шкале измерений имеется 15 узких шкал по 15 информационных двоичных слов, и еще 16 слов-маркеров, т. е. всего 241 двоичное слово. Используя общую формулу для дисперсии, получаем следующее выражение для вычисления значений дисперсий для 4-х старших разрядах двоичных слов в СОК:

$$D_n = (\Delta_n^2 * 225 + \Delta_{\text{пмар}}^2 * 16) / 241, \quad (1)$$

где  $\Delta_n$  – погрешность для n-го старшего разряда информационного двоичного слова,

$\Delta_{\text{пмар}}$  – погрешность для n-го старшего разряда слова-маркера.

Выражение для вычисления значений дисперсий для 4-х младших разрядов двоичных слов получаем исходя из приведенных выше соображений:

$$D_n = (\Delta_n^2 * 225 + \Delta_{\text{пмар}}^2 * 16) / 241, \quad (2)$$

где  $\Delta_n$  – погрешность для n-го младшего разряда двоичного слова,

$\Delta_{\text{пмар}}$  – погрешность для n-го младшего разряда слова-маркера.

Маркерные значения (маркерные слова) передаются двоичным  $4^x$ -значным кодом в 4-х старших разрядах слова данных, а в 4-х младших разрядах передаются нули. При передаче допускаются одиночные искажения бит в словах данных. При искажении бита в одном из младших бит, одноименных со старшим битом, в котором передается единица, возникает «неопределенное слово» при приеме. Его можно назвать так потому, что по нему нельзя однозначно утверждать, было ли передано маркерное слово, или информационное слово между маркерными словами. «Неопределенные слова» возникают при передаче маркерных слов с двумя единицами в 4-х старших разрядах. Для 3-х или 4-х единиц в 4-х старших разрядах такая неопределенность при одиночных искажениях бит возникнуть не может, так как в этом случае искажения в конкретных битах будут приводить к переходам в информационные слова между маркерными словами.

При одиночных искажениях бит в младших полусловах-остатках можно получить одинаковые со старшими полуслова-остатки. При приеме таких одинаковых полуслов-остатков их следует принимать за маркерные значения, так как при описанном способе передачи должна выполняться «привязка» к маркерным значениям.

При передаче данных с дублированием полуслов-остатков в слове данных в интервале от нуля до 15 между соседними маркерными значениями одиночные искажения бит приводят к принятым словам данных, представленных в таблице 2. Погрешность передачи при этом зависит от положения конкретного интервала данных на шкале телеизмерений.

С учетом приведенных рассуждений получаем в результате средние значения дисперсий погрешности в каждом разряде и по всем разрядам двоичных слов в шкале измерений при традиционном представлении данных и представлении данных в СОК. Полученные средние значения дисперсий приведены в таблице 3.

**Таблица 1 – Погрешность передачи информационных двоичных слов**

№ раз-ряда	$\Delta$ град	$\Delta$ сок	$\Delta 2$ град	$\Delta 2$ сок
1	1	0,059	1	0,003
2	2	0,118	4	0,014
3	4	0,235	16	0,055
4	8	0,471	64	0,222
5	16	0,941	256	0,885
7	64	3,765	4096	14,475
6	32	1,882	1024	3,542
8	128	7,529	16384	56,686

**Таблица 2 – Принятые слова данных**

Пере-дан-ное слово	Искаженный бит слова данных, принятое слово данных, погрешность передачи							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	16	3	5	9	-	32	80	144
	-	2	4	8	-	-	-	-
2	3	32	6	10	48	-	96	160
	1	-	4	8	-	-	-	-
3	48	48	7	11	2	1	7	11
	-	-	4	8	1	2	4	8
4	5	6	64	12	80	96	-	192
	1	2	-	8	-	-	-	-
5	80	7	1	13	4	112	1	13
	-	2	4	8	1	-	4	8
6	7	4	96	14	7	4	2	14
	1	2	-	8	1	2	4	8
7	6	5	3	15	6	5	3	15
	1	2	4	8	1	2	4	8
8	9	10	12	128	144	10	192	-
	1	2	4	-	-	2	-	-
9	144	11	13	144	8	11	13	1
	-	2	4	-	1	2	4	8
10	11	160	14	160	11	8	14	2
	1	-	4	-	1	2	4	8
11	10	9	15	3	10	9	15	3
	1	2	4	8	1	2	4	8
12	13	14	192	192	13	14	8	4
	1	2	-	-	1	2	4	8
13	12	15	13	5	12	15	9	5
	1	2	4	8	1	2	4	8
14	15	12	10	6	15	12	10	6
	1	2	4	8	1	2	4	8
15	14	13	11	7	14	13	11	7
	1	2	4	8	1	2	4	8

**Таблица 3 – Средние значения дисперсий погрешности в каждом разряде и по всем разрядам двоичных слов в шкале измерений**

Номер разряда, n	Дисперсия погрешности в СОК для нижней полушкалы	Дисперсия погрешности в СОК для верхней полушкалы	Дисперсия погрешности в СОК для шкалы измерений	Дисперсия погрешности в двоичном коде для шкалы измерений
1	962	3692	2183	1
2	980	2642	1690	4
3	1298	1508	1396	16
4	2539	644	1655	64
5	891	2181	1477	256
6	688	2312	1399	1032
7	1667	1472	1576	4096
8	3447	1347	2352	16384
Средняя дисперсия погрешности			1716	2730

Отношение средних значений дисперсий погрешности при традиционном представлении данных и представлении данных в СОК:

$$D_{\text{трад}} / D_{\text{сок}} = 2730 / 1716 = 1,59. \quad (3)$$

При передаче данных остатками по модулям сравнения 15 и 16 без дублирования остатков получают средние значения дисперсий в каждом разряде и по всем разрядам двоичных слов в шкале измерений, которые приведены в таблице 4.

**Таблица 4 – Средние значения дисперсий погрешности в каждом разряде и по всем разрядам двоичных слов в шкале измерений (без дублирования остатков в слове данных)**

№ разряда, n	Dn трад	Dn сок	Dcp.трад	Dcp.сок	Dcp.сок / Dcp.трад
1	1	225	2730	5110	1,872
2	4	900			
3	16	3600			
4	64	14400			
5	256	256			
6	1024	1024			
7	4096	4096			
8	16384	16384			

Отношение средних значений дисперсий погрешности при традиционном представлении данных и представлении данных в СОК:

$$D_{\text{сок}} / D_{\text{трад}} = 5110 / 2730 = 1,87. \quad (4)$$

Полученные результаты (см. таблицу 3) позволяют сделать вывод о том, что передача восьмиразрядных данных полусловами-остатками по модулю сравнения 16, которые дублируются в двоичном слове, несмотря на уменьшение



---

шкалы измерений примерно на 6 процентов, повышает достоверность передачи данных при одиночных искажениях бит данных. В случае передачи данных полусловами-остатками по модулям сравнения 15 и 16 в одном слове данных без дублирования остатков (см. таблицу 4) нет повышения достоверности передачи данных.

*Литература*

1. Кукушкин, С. С. Конечные поля и информатика: в 2 т. – т.1:Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках / С. С. Кукушкин // М: МО РФ. – 2003. – 284 с.
2. Макклеллан, Дж., Рейдер, Ч. Применение теории чисел в цифровой обработке сигналов. Пер. с англ. / Дж. Макклеллан, Ч. Рейдер // М.: Радио и связь. – 1983. – 376 с.

---

УДК 621.45:621.45.018:519.87

**Магнитное поле ионизированного газового потока как диагностический параметр при испытаниях и эксплуатации ЖРД**

**Н.М. Пушкин**, д.т.н., главный конструктор по направлению,

**С.В. Бацев**, к.т.н., начальник отдела,

**Т.В. Иванов**, инженер,

ОАО «Научно-производственное объединение измерительной техники» г. Королев, Московская область

*Рассмотрены основные вопросы применения магнитометрического метода контроля и диагностики ракетных двигателей, основанного на измерении параметров переменных магнитных полей ионизированных газовых потоков на внешней поверхности двигателя. Сообщается о разработке штатной двухканальной системы контроля переменных магнитных полей газовых трактов жидкостных реактивных двигателей (ЖРД).*

Контроль и диагностика ЖРД, магнитное поле, ионизированный газовый поток, система контроля магнитного поля.

**Magnetic field of the ionized gas stream as diagnostic parameter at tests and operation of LJE**

**N.M. Pushkin**, Dr. Sci. Tech., the chief designer in the direction,

**S.V. Batsev**, Cand. Tech. Sci., head of department,

**T.V. Ivanov**, engineer,

JSC «Scientific and Production Association measuring equipment», Korolev, Moscow region

*There are inspected the main question of the magnetometric method for monitoring and diagnostics of jet engines, based on measuring the parameters of alternating magnetic fields on the outer surface of the engine. There are reported about development of the standard two-channel system control of variation magnetic fields of gas paths of liquid jet engines (LJE).*

Monitoring and diagnostics of liquid jet engines, magnetic field, ionized gas stream, the magnetic field control system.

В настоящее время при отработке ракетных двигателей (ЖРД) различного назначения широко применяются датчики тепловых, вибрационных параметров и параметров давления.

Однако данные измерительные средства не всегда своевременно реагируют на развитие нештатных процессов в газовом тракте ЖРД. В ряде случаев, например, при контроле процессов разгара и горения, более полную информацию могут дать датчики контроля электрофизических параметров газового потока.

---

При возникновении нештатных процессов в газовом тракте ЖРД меняется ионизация газового потока и его электрофизические характеристики. Средствами контроля таких процессов могут быть измерители параметров электрических зарядов, потенциалов, электрических, магнитных или электромагнитных полей газовых потоков.

Системы контроля на основе измерения электрофизических параметров газовых потоков способны с высоким быстродействием реагировать на возникновение нештатных процессов и в том случае, когда источники возникновения таких процессов расположены на значительном удалении от места установки датчика.

Традиционным измерителем электрических параметров ионизированного газового потока является зондовый датчик, чувствительный элемент которого выполнен в виде металлического электрода. Такой датчик помещается непосредственно в газовый поток. Однако, применение датчиков, требующих нарушения целостности корпуса ЖРД, весьма нежелательно. Более приемлемы бесконтактные датчики – а именно, в данном случае датчики и системы измерения переменного магнитного поля токов электрических зарядов ионизированного газового потока.

На основе результатов предварительных исследований был разработан способ и устройство магнитометрического, бесконтактного контроля ЖРД на основе измерения параметров поверхностных магнитных полей. Способ контроля реактивного двигателя включает измерение и анализ параметров тока электрических зарядов реактивной струи двигателя и отличается тем, что с целью повышения надежности и быстродействия проводят измерения флуктуационной составляющей тока электрических зарядов реактивной струи двигателя на основе измерения параметров поверхностных магнитных полей, определяют спектральную характеристику флуктуационной составляющей, выделяют ее характерные частоты, детектируют сигналы на этих частотах и проводят сравнение полученных данных с эталонными [3].

Применение датчиков переменного магнитного поля для измерения токов и магнитного поля ионизированного газового потока через толщину корпуса двигателя основывается на том, что переменные магнитные поля в частотном диапазоне до 50-100 кГц практически мало ослабляются даже достаточно толстыми металлическими немагнитными оболочками [7].

Адекватность измерений, выполненных с помощью бесконтактного датчика магнитного поля, установленного на внешней поверхности двигателя, и измерений, выполненных с помощью зондового встраиваемого в двигатель датчика электрического потенциала ионизированного газового потока, была проверена при испытаниях камеры сгорания экспериментального двигателя [8]. Измерения были выполнены в диапазоне до 20 кГц при различных значениях соотношений горючего и окислителя. Полученные данные позволяют заключить, что на всех этапах работы двигателя – запуск, установившейся режим, выключение – показания зондового датчика (датчика электрического потенциала), аналогичны по спектральному составу, показаниям датчика магнитного поля тока газового потока.

При таких видах нештатных процессов как эрозия и разгар элементов га-

зового тракта ЖРД в газовом тракте появляются движущиеся заряженные, вследствие эмиссии с их поверхности, частицы или сгустки частиц. Скорость их движения ниже скорости газового потока. Пролет частиц мимо установленного на поверхности ЖРД датчика магнитного поля происходит за определенное время. В связи с этим, регистрацию движения частиц следует вести в определенном частотном диапазоне, в районе частоты, определяемой соотношением:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{t_{\text{пр.ч.}}}$$

где:  $t_{\text{пр.ч.}} = \frac{l_{\text{датч.}}}{v_{\text{ч}}}$ ,  $t_{\text{пр.ч.}}$  – время пролета частиц мимо датчика,

$l_{\text{датч.}}$  – размер датчика,

$v_{\text{ч}}$  – скорость движения частиц в газовом потоке.

Ожидаемая скорость перемещения твердых частиц и ожидаемые частоты сигналов датчика магнитного поля, обусловленные движением частиц, ниже, чем скорость перемещения и частоты сигналов датчика, обусловленные движением электронно-ионных образований газового потока [1, 5]. Естественно, что эти скорости различны для различных участков газового тракта ЖРД. Ориентировочно скорость движения частиц в газовом потоке определяется соотношением:

$$v_{\text{ч}} = (0,5-0,7) v_{\text{ин}}$$

где:  $v_{\text{ин}}$  – скорость газового потока в контролируемом сечении газового тракта ЖРД.

Для ранней диагностики процессов эрозии и разгара в газовом тракте ЖРД, как отмечалось, целесообразно использовать в качестве диагностического признака увеличение амплитуды сигналов на частотах, близких к частотам сигналов датчика, обусловленных движением заряженных частиц.

Вторичная обработка сигналов системы измерения параметров поверхностного магнитного поля должна включать, в первую очередь, спектральную обработку сигналов. Для этой цели используются, как правило, Фурье-преобразование. Однако, для выявления более полной картины изменения частоты анализируемых сигналов со временем, этот метод не всегда достаточен. Это обусловлено тем, что получаемый при Фурье-преобразовании спектр сигнала позволяет судить о том, какие частоты присутствовали в сигнале, но ничего не сообщает о временных интервалах, в которых они присутствовали в спектре.

Для разрешения этой проблемы необходимо анализировать сигнал на конечных временных интервалах. При этом, анализирующая функция должна обладать рядом свойств, позволяющих получить полную картину изменения сигнала со временем как на низких, так и на высоких частотах.

Этим требованиям отвечает вейвлет-преобразование сигнала, определяемое соотношением [11]:

$$S(T, t_0) = \frac{1}{\sqrt{T}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi} \left( \frac{t-t_0}{T} \right) dt,$$

где черта над функцией  $\psi$  означает комплексное сопряжение. Функция  $\psi$

---

называется «вейвлетом». Это аналог экспоненциальной функции для преобразования Фурье, т.е. функция, порождающая базис преобразования. Основное свойство вейвлета:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$$

Принципиальное отличие вейвлет-преобразования от оконного преобразования Фурье заключается в том, что оно позволяет более подробно и точно анализировать изменение амплитуды и частоты со временем.

Данный метод обработки был апробирован в одной из экспериментальных работ по исследованию магнитометрического метода контроля электрофизических процессов в газовом тракте ЖРД [12].

Для контроля электрофизических процессов в газовых трактах ЖРД в ОАО «НПО Измерительной техники» (г. Королев М.О.) разработана двухканальная магнитометрическая система «Зонд-РД» (рис. 5).

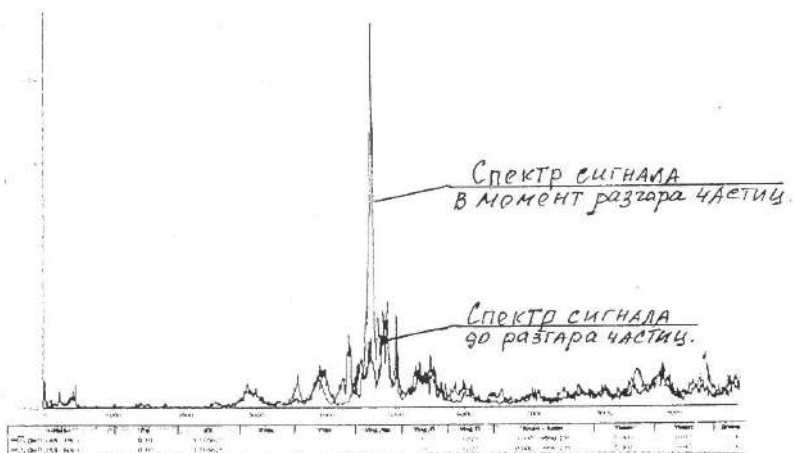
Система состоит из двух датчиков и преобразователя. Преобразователь осуществляет усиление сигналов датчиков в диапазоне до 50 кГц и выполняет сопряжение параметров выходных сигналов системы со шкалой регистрирующих телеметрических систем.

В настоящее время завершены межведомственные испытания системы «Зонд-РД» и она может изготавливаться и поставляться с литерой «О1». Для исследования эффективности применения системы «Зонд-РД» для целей диагностики и контроля ЖРД был проведен ряд испытаний системы при стендовых испытаниях двигателей и экспериментальных установок.

Так, совместно с НПО «Энергомаш» были проведены испытания магнитометрической системы «Зонд-РД» на модельной установке 11Д520.Э.722-4288 с вводом частиц алюминия АМ<sub>r</sub>-6 в высокотемпературный газовый поток для исследования процесса разгара моделей лопаток турбины ТНА двигателя РД 191.

Особенности установки и постановки измерений, обработки результатов описаны в сборнике № 25 трудов «Энергомаш» за 2007 год [12].

Основные результаты испытаний заключаются в следующем. При пролете горящих частиц в газовом потоке сигнал, регистрируемый датчиком магнитного поля и системой «Зонд-РД» в основном частотном диапазоне на частоте ~4600 Гц значительно возрастал и в одном из экспериментов увеличился более чем в 7 раз (рис.1).



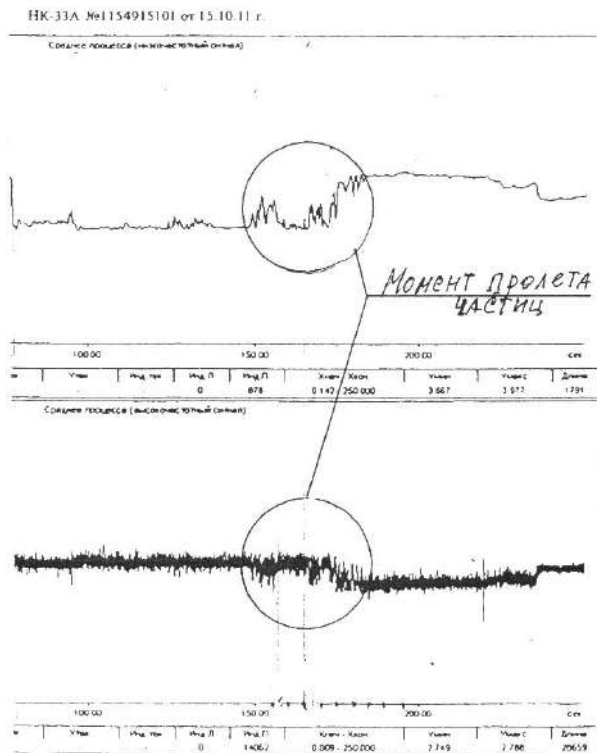
**Рисунок 1 – Сигнал, регистрируемый датчиком магнитного поля и системой «Зонд-РД» в основном частотном диапазоне**

Следует отметить, что в целом при регистрации процессов, связанных с движением металлических частиц в газовом тракте двигателя могут быть следующие варианты развития событий:

- металлические частицы пролетели, столкнулись с лопатками ТНА и не загорелись;
- металлические частицы столкнулись с лопатками, загорелись, но не вызвали разгара лопаток ТНА;
- металлические частицы столкнулись с лопатками ТНА, загорелись и вызвали разгар лопаток ТНА.

Естественно, сигнал с датчика магнитного поля будет максимальным в последнем случае. Кроме того, он будет зависеть и от количества металлических частиц в потоке.

В связи с этим, для конкретного двигателя целесообразно проведение предварительных испытаний на устойчивость к воздействию определенного количества металлических частиц. Примером таких работ является применение системы «Зонд-РД» при проведении огневых испытаний двигателя (ОСИ) НК-33А №5 ДИ с введением в газовый поток металлических частиц. Датчик системы, в этом случае, устанавливался на корпусе ТНА. Двигатель НК-33А успешно выдержал данные испытания. Система «Зонд-РД» при этом зафиксировала небольшое изменение регистрируемого сигнала в момент ввода металлических частиц в газовый поток (рис. 2).

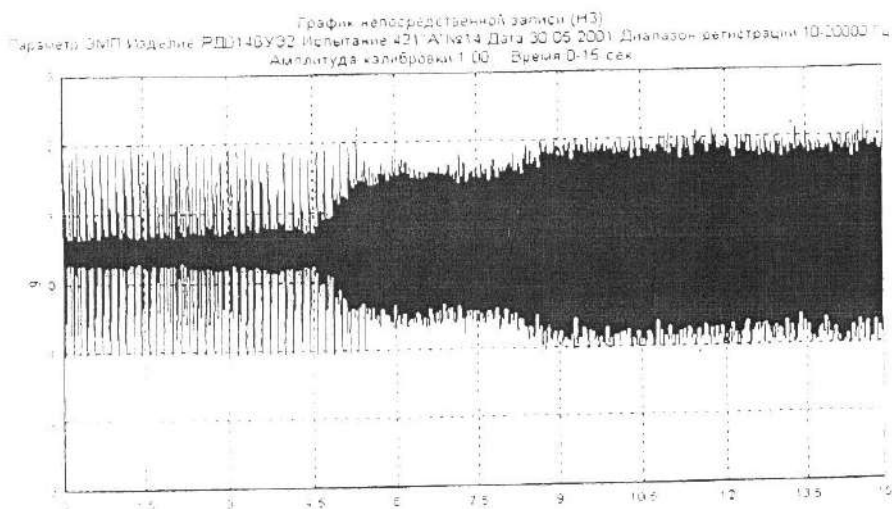


**Рисунок 2 – Изменение регистрируемого сигнала в момент ввода металлических частиц в газовый поток**

Еще одним направлением возможного применения магнитометрической системы «Зонд-РД» является ее использование при бесконтактном контроле процессов воспламенения топливной смеси в процессе запуска ЖРД. В частности, такая задача актуальна для кислородно-водородного двигателя РД-0146 в КБХА. При отработке системы запуска двигателя на экспериментальной установке РД-0146 УЭ применяется система «Зонд-РД». В процессе испытаний на установке РД-0146УЭ система «Зонд-РД» позволила регистрировать следующие процессы:

- искровые разряды свечи зажигания;
- запуск запального устройства;
- подачу газообразного водорода в камеру сгорания;
- запуск камеры сгорания;
- изменение режимов работы установки.

На рисунке 3 приведен пример одной из записей, полученных в процессе данных испытаний.



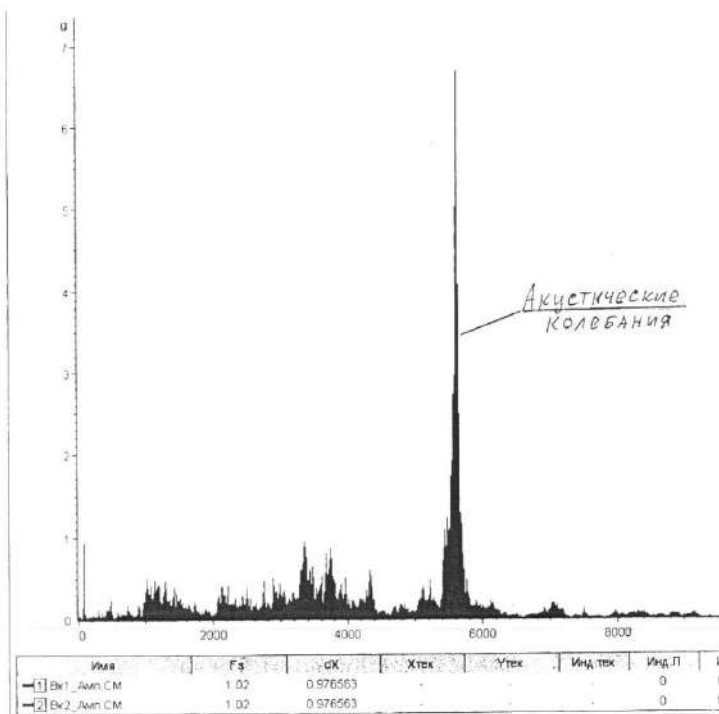
**Рисунок 3 – Пример записи, полученной в процессе испытаний на установке РД-0146УЭ**

Система «Зонд-РД» позволяет бесконтактно регистрировать и другие процессы при испытаниях двигательных установок. Так при использовании в КБ Химмаш доработанного двигателя С5–33 в качестве эжекторного на высотном стенде при проведении одного из испытаний в камере сгорания двигателя с помощью системы «Зонд-РД» были зафиксированы акустические колебания на частоте  $\sim 6$  кГц (рис. 4).

Проведенные испытания показали, что система «Зонд-РД» позволяет контролировать электрофизические процессы в газовых трактах двигателей. Местами установки датчиков магнитного поля являются турбонасосный агрегат, камера сгорания и другие элементы газового тракта двигателя.

Таким образом, подводя итог предварительным работам по применению системы «Зонд-РД», при проведении стендовых испытаний двигательных установок можно заключить, что магнитометрическая система является новым, дополнительным измерительным средством, позволяющим разработчикам ЖРД бесконтактным способом получить с большим быстродействием дополнительную информацию о процессах, протекающих в газовом тракте двигателя.





**Рисунок 4 – Акустические колебания, зафиксированные при испытании двигателя С5–33**



**Рисунок 5 – Система «ЗОНД-РД» для контроля переменных магнитных полей ионизированных газовых потоков двигателей**

На рисунке 5 приведен внешний вид системы «ЗОНД-РД» для контроля переменных магнитных полей ионизированных газовых потоков двигателей.

---

*Литература*

1. Электрогазодинамические течения / А. Б. Ватажин, В. И. Грабовский, Лихтер, В. А. и др. // М.: Наука. – 1983. – 344 с.
2. Пушкин, Н. М. Электрофизические методы контроля и диагностики, основанные на измерении параметров поверхностных и объемных электрических зарядов / Н. М. Пушкин // Приборы и системы управления. – 1993. – № 8. – с.17-20.
3. Пушкин, Н. М., Кочев, А. А., Гусельников, В. И. Способ диагностики неисправности ракетного двигателя / Н. М. Пушкин, А. А. Кочев, В. И. Гусельников // А.С. – 157538. –1980.
4. Гафуров, Р. А., Соловьев, В. В. Диагностика внутрикамерных процессов в энергетических установках / Р. А. Гафуров, В. В. Соловьев // М.: Машиностроение. – 1991. – 272 с.
5. Гречихин, Л. И., Пушкин, Н. М. Влияние сажевых частиц на термодинамическое состояние нагретых газов при различных температурах / Л. И. Гречихин, Н. М. Пушкин / Изв. ВУЗ(ов) сер. Авиационная техника. – 1983. – № 1. – с.85-88.
6. Богословский, В. П., Зайчиков, В. В., Самойлов, И. Б. О зондовых измерениях ионизации в пламени / В. П. Богословский, В. В. Зайчиков, И. Б. Самойлов // Физика горения и взрыва. – 1974. – т. 10. – №5. – с. 705-709.
7. Гроднев, И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот / И. И. Гроднев // М.: Связь. – 1972. –112 с.
8. Пушкин, Н. М., Якунин, В. И. Результаты стендовых исследований экспериментальной камеры КС-112. Тех. отчет НПО «Сатурн» / Н. М. Пушкин, В. И. Якунин // 1993. 34 с.
9. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер // М.: Наука. – 1987. – 511 с.
10. Пушкин, Н. М. Электрофизика ракетно-космического полета и ее основные аспекты / Н. М. Пушкин // Космонавтика и ракетостроение. – 1997. – № 8. – с. 131-135.
11. Дебеши, И. Десять лекций по вейвлетам / И. Дебеши // Москва-Ижевск: НИЦ. – Регулярная и хаотическая динамика. – 2004. – 464 с.
12. Ковалев, В. И., Кузнецов, С. В., Курина, В. В., Пушкин, Н. М. и др. Системы контроля и бесконтактной диагностики рабочих процессов при проведении огневых испытаний ЖРД / В. И. Ковалев, С. В. Кузнецов, В. В. Курина, Н. М. Пушкин // М.: Труды НПО «Энергомаш». – 2007. – вып. 25. – с. 373-394.