



Научно-технический  
журнал по вопросам  
разработки и  
производства  
инновационной  
продукции

Лицензионный договор  
№ 285-1/2021 (НЭБ)

Журнал выходит 2 раза в  
год

Электронная версия  
доступна по адресу  
[pos.goz.ru/magazine](http://pos.goz.ru/magazine)



Адрес редакции:  
192012,  
г. Санкт-Петербург,  
вн.тер.г. муниципальный  
округ Рыбацкое,  
пр-кт Обуховской  
Обороны, д. 120.

Е-mail: [pos.mv@goz.ru](mailto:pos.mv@goz.ru)  
Телефон:  
8 (812) 207-56-20

---

РАДИОНАВИГАЦИЯ  
И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА ВКО  
«АЛМАЗ – АНТЕЙ»  
№ 12 (20) – 2023

---

АО «РИРВ».  
АО «Обуховский завод»

---

**Редакционный совет:**

Подвязников Михаил Львович, д.т.н., доц.  
Волокитина Ирина Николаевна, к.э.н.  
Долбенков Владимир Григорьевич, к.т.н.  
Брагин Алексей Юрьевич, к.э.н.  
Король Виктор Михайлович, к.т.н.

**Главный редактор**

Баушев Сергей Валентинович, д.в.н., проф.

**Заместитель главного редактора**

Сайбель Алексей Геннадиевич, д.т.н., доц.

**Ответственный редактор**

Васильева Людмила Николаевна

**Редакционная коллегия:**

Безлепкин Николай Иванович, д.ф.н., проф.  
Гаврилов Роман Сергеевич, к.т.н.  
Геворкян Арвид Грайрович, д.т.н., проф.  
Завгородний Александр Федорович, д.и.н., проф.  
Зозуля Виктор Михайлович, к.т.н.  
Королев Андрей Валерьевич, к.т.н.  
Марченко Борис Иванович, д.т.н., проф.  
Панфилов Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
Петухов Сергей Геннадьевич, д.т.н.  
Романюк Денис Андреевич, к.ф.-м.н.  
Синицын Евгений Александрович, д.т.н., проф.  
Фридман Леонид Борисович, д.т.н.  
Шатраков Юрий Григорьевич, д.т.н., проф.  
Щеглов Дмитрий Константинович, к.т.н.

---

Санкт-Петербург

**РАДИОНАВИГАЦИЯ И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ» №12 (20) – 2023: ТРУДЫ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ». – СПб.: Балтийская печать, 2023. – 152 с. – ил.**

Научно-технический журнал **РАДИОНАВИГАЦИЯ И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»** публикует результаты научных исследований, разработок и производства инновационной продукции в областях организации производства, вооружения и военной техники, радиофизики, организации воздушного движения, радионавигации, радиолокации.

К участию приглашаются сотрудники предприятий оборонного промышленного комплекса, научных и образовательных учреждений Российской Федерации.

Мнение редакции может не совпадать с точкой зрения авторов. Ответственность за достоверность материалов лежит на авторах публикаций.

Отсутствие в статьях сведений, содержащих государственную тайну, подтверждается наличием соответствующих Заключений о возможности опубликования с предприятий.

Журнал рассчитан на широкий круг специалистов.

## Уважаемый читатель!

29 и 30 июня 2023 года АО «Российский институт радионавигации и времени» при поддержке АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей» провел вторую конференцию «Радионавигация и время» по тематическим направлениям «Координатно-временное и навигационное обеспечение потребителей РФ» и «Координатно-временное обеспечение в единой системе организации воздушного движения РФ».

Конференцию открыли генеральный конструктор – заместитель генерального директора АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей» П.А. Созинов и генеральный директор АО «Обуховский завод» М.Л. Подвязников.

В работе Конференции приняли участие более 100 ученых, специалистов и представителей Минобороны России, организаций и предприятий, деятельность которых связана с разработкой и применением средств частотно-временного обеспечения.

Заслушано и обсуждено 8 докладов на пленарном заседании и 13 сообщений на Круглом столе «СЕВ РФ» по следующим основным вопросам:

- Концепция создания Системы единого времени Российской Федерации (СЕВ РФ) – существенный шаг в развитии частотно-временного обеспечения для удовлетворения перспективных требований всех потребителей страны с учетом новых внешних угроз национальной безопасности;

- прецизионное частотно-временное обеспечение СЕВ РФ;

- современные состояние и проблемы развития систем и средств частотно-временного обеспечения;

- развитие технологий и средств сравнения и синхронизации шкал времени;

- перспективные средства формирования, хранения, передачи и контроля частотно-временной информации;

- требования к частотно-временному обеспечению для гражданских и специальных областей применения, потребности рынка, перспективы развития.

Конференция отмечает:

1. Устойчивое координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО) широкого круга потребителей во все периоды военно-политической обстановки является важнейшей задачей поддержания обороноспособности Российской Федерации.

2. С учетом изменения международной политической обстановки и тенденций развития потребителей, а также учитывая важность КВНО объектов критической инфраструктуры, требуется трансформация подходов к вопросам эксплуатации и взаимоувязанного развития навигационных систем на уровне государства.

3. Приоритетным направлением развития КВНО является комплексирование существующих и перспективных систем в единую взаимоувязанную «систему систем», обеспечивающую выполнение требований, в первую очередь, критических потребителей по точности, рабочей зоне, доступности, целостности и непрерывности обслуживания при оказании услуг КВНО.

4. ГНСС ГЛОНАСС остается основным средством КВНО в создаваемой системе, при этом с учетом изменения геополитической обстановки необходимо уделить внимание комплексу вопросов помехоустойчивости как системообразующих

объектов ГНСС (сегмента управления и орбитальной группировки), так и аппаратуры потребителя.

5. Особенности применения ГНСС в ряде случаев требуют использования резервных систем. Развитие резервных по отношению к ГНСС ГЛОНАСС средств КВНО является необходимым условием для обеспечения критических потребителей, Существующие и разрабатываемые резервирующие решения на базе наземных средств (РСБН, РСДН, ЛСН...), а также других перспективных технологий (группировок низкоорбитальных космических аппаратов, нерадиотехнических) целесообразно объединить в единый взаимосвязанный комплекс. Практическая отработка технологии гармонизации нескольких РНС (ГНСС, РСДН с системой функциональных дополнений, локальные системы навигации) в настоящее время проводится в рамках ОКР «Альтернатива-Н».

6. Развитие системообразующих средств КВНО должно быть синхронизировано с созданием соответствующей комплексированной НАП, обеспечивающей работу по ГНСС и резервным системам. Основные направления совместного развития ГНСС, резервных систем и КНАП должны соответствовать принципам единства используемого пространственно-временного базиса и находить свое отражение в Радионавигационном Плане.

Конференция рекомендует:

1. Считать приоритетным направлением развития радионавигации в Российской Федерации создание единой радионавигационной системы на основе тесного комплексирования существующих и перспективных систем КВНО на альтернативных технологических базисах и систем передачи информации с целью гарантированного выполнения требований специальных, критических и других потребителей по точности, целостности, рабочим зонам, доступности и непрерывности координатно-временных и навигационных определений, в том числе в сложных условиях приема сигналов.

2. С целью проработки научно-методических вопросов создания единой радионавигационной системы Российской Федерации подготовить и представить на рассмотрение заседания Научного совета РАН по проблеме «Координатно-временное и навигационное обеспечение» предложения по комплексированию существующих и перспективных систем КВНО по технологии «система систем» на едином пространственно-временном базисе. Предложения должны предусматривать:

- обоснование целевых индикаторов по характеристикам целостности, доступности, точности, непрерывности, помехоустойчивости для локальных, региональных, глобальных рабочих зон систем и средств КВНО, для различных категорий наземных, морских, воздушных и космических потребителей;

- обоснование общей архитектуры единой радионавигационной системы и основных методов обеспечения требуемых целевых индикаторов;

- мероприятия по комплексному использованию существующей инфраструктуры радионавигационных систем, систем передачи информации, систем функциональных дополнений радионавигационных систем;

- мероприятия по развитию систем и средств, ассистирующих радионавигационным системам (дифференциальные подсистемы различных видов и классов точности, системы калибровки и синтезируемые библиотеки зональных задержек

средне- и длинноволновых систем, информационные каналы и т.п.);

- предложения по использованию для навигационных определений радиосигналов инфотелекоммуникационных и других систем с использованием доплеровских и дальномерных методов координатных определений;

- обоснование требований к перспективной комплексированной аппаратуре потребителей единой радионавигационной системы, включающей при необходимости в т.ч. нерадиотехнические навигационные средства, и к электронной компонентной базе;

- мероприятия по актуализации нормативно-правовой базы в части: характеристик систем и средств КВНО; правил тестирования и сертификации; стандартов передачи информации всех уровней, и с учетом перспективных требований потребителей различных классов; реализация данных мероприятий должна осуществляться в координации с ФОИВ, Госкорпорациями, а также с учетом требований и рекомендаций ведущих международных организаций в области навигации и синхронизации (ITU, IMO, ICAO, IHO, IALA);

- мероприятия по повышению уровня кибербезопасности КВНО;

- организацию проведения теоретических исследований по ключевым вопросам развития систем и средств КВНО.

3. При разработке предложений должны быть учтены:

- Радионавигационный план РФ;

- Межгосударственная радионавигационная программа государств-участников Содружества независимых государств на 2023-2026 годы;

- мероприятия, предусмотренные Межведомственной комплексной целевой программой «Развитие государственной системы единого времени и эталонных частот «Цель» на период до 2035 года»;

- мероприятия, предусмотренные Межведомственной Концепцией создания Системы единого времени Российской Федерации на базе Государственной системы единого времени и эталонных частот (ГСЕВЭЧ) «Цель».

4. Подготовить и разослать участникам конференции сборник материалов представленных докладов и сообщений.

5. Следующую конференцию «Радионавигация и время» провести в 2024 году в статусе «научно-техническая».

Для апробации предполагаемых научных результатов, полученных в ходе диссертационных исследований аспирантов и соискателей предприятий Концерна, в рамках конференции была организована работа дополнительных секций по тематикам:

- Радиолокация и радионавигация. Радиофизика;

- Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства;

- Математическое моделирование. Вооружение и военная техника.

На секциях были заслушаны и обсуждены 18 докладов, тезисы и материалы которых представлены в текущем 12-м номере нашего журнала.

Доктор военных наук, профессор  
С.В. Баушев

## Содержание

|   |     |
|---|-----|
| <i>Зидерер Ю.Д., Дзюбаненко А.А.</i><br>Адаптивная модель реинжиниринга, как инструмент, определяющий направления модернизации технологических процессов.....   | 7   |
| <i>Скорнякова Е.А., Золотухин К.В.</i><br>Анализ методики картирования потока процесса.....   | 20  |
| <i>Довгопольный Н.П.</i><br>Определения распределения неоднородностей в волноводном тракте.....   | 32  |
| <i>Гринь А.В., Николенко Б.Б., Славянский А.О.</i><br>Создание наземного комплекса радиотехнического мониторинга.....   | 36  |
| <i>Максимкин М.А., Климова С.А., Евтушенко А.С., Волков А.В.</i><br>Способ согласования кристаллов акустооптических ячеек широкополосных пьезопреобразователей.....   | 44  |
| <i>Шведов А.С., Климова С.А., Самылкин Д.В., Волков А.В.</i><br>Способ изготовления керамических плат методом низкотемпературного обжига.....   | 49  |
| <i>Мурсалов Д.Л.</i><br>Обнаружение сигнала на фоне шума с помощью нейронной сети и метода максимального правдоподобия.....   | 56  |
| <i>Ефремов А.Н.</i><br>Моделирование толщины анодно-окисных покрытий на неупрочняемых алюминиевых сплавах.....  | 66  |
| <i>Вихрев И.А., Ломов П.А., Блинков О.Г.</i><br>Систематизация данных планирования производства сложного сборного металлорежущего инструмента и оснастки с применением системного анализа.....                        | 73  |
| <i>Афанасьев В.Б., Медведев В.М., Остапенко С.Н., Рязанский В.П.</i><br>Развитие статистических методов управления качеством изделий оборонной продукции на основе двумерной модели распределения.....                | 84  |
| <i>Арбиев А.К.</i><br>Автоматизация технологических процессов путем внедрения следящих приводов на упругих трубчатых элементах.....   | 88  |
| <i>Столяров И.И.</i><br>Имитационное моделирование воздействия одиночных эффектов обратимого характера на параметры работы синтезатора частоты с автоматической регулировкой мощности.....                            | 100 |
| <i>Крячко А.Ф., Ревунов Г.М., Беляков Н.И.</i><br>Особенности расчета ЭМП открытых резонаторов.....   | 109 |
| <i>Михайлов С.В., Исаев С.Д., Пальгин Н.И., Шмелев А.А.</i><br>Применение компактных схемотехнических решений для повышения точности синхронизации времени в комплексах средств автоматизации тактического звена..... | 119 |
| <i>Макаев А.А., Мамчиц А., Шувалов С.Е.</i><br>Оценка характеристических размеров расчетной области для цифрового моделирования воздушного винта малых размеров.....  | 128 |
| <i>Галеев Э.Е.</i><br>Алгоритм прогнозирования финансовой устойчивости предприятия с использованием случайных марковских цепей.....   | 135 |
| <i>Липаков Н.Е., Сайбель А.Г.</i><br>Межгрупповая ранговая синхронизация в системах межсамолётной навигации.....  | 142 |
| <i>Жизневский А.К.</i><br>Проверка математического аппарата автоматической калибровки проходной ФАР.....  | 147 |

УДК 658.5

## АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ РЕИНЖИНИРИНГА, КАК ИНСТРУМЕНТ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Зидерер Ю. Д., Дзюбаненко А. А.

*В статье рассматриваются вопросы, связанные с текущим состоянием и перспективами внедрения концепции реинжиниринга в технологические процессы предприятий машиностроительной отрасли. Приведена адаптивная модель внедрения и реализации реинжиниринга, позволяющая определить ключевые направления модернизации технологических процессов машиностроительного предприятия. Продемонстрирована детальная декомпозиция основных процессов предприятия, анализ которой позволяет выявить узкие места для внедрения и реализации технологических инноваций, предложенных в процессе проведения исследования.*

*Ключевые слова:* реинжиниринг, технологический процесс, стандарт IDEF 0, CAD/CAM системы, автоматизированный мониторинг, металлообработка, жизненный цикл машиностроительного предприятия.

### **Введение**

На сегодняшний день важной задачей отечественной промышленности является повышение уровня развития производства и соответствующих технологий за счет внедрения инноваций, направленных на реализацию программы импортозамещения. Технологические инициативы особенно актуальны в настоящее время в связи с западными санкциями против России и, как следствие, интенсификации мероприятий в условиях реализации концепции импортозамещения.

Рассмотренная процедура приведет к повышению конкурентоспособности отечественной продукции, благодаря модернизации технологических процессов, повышению результативности производственных программ и разработке передовых отечественных видов продукции с относительно высокой добавленной стоимостью. Адекватное решение этой проблемы позволит не только сократить импорт, сохранив в стране значительный объем валютных средств, но и снизить издержки на товары, поддержать отечественного производителя, создать новые рабочие места.

Одним из способов сокращения зависимости отечественной промышленности от импорта является реинжиниринг технологических процессов (РТП), как основной инструмент достижения конкурентоспособности в развивающемся индустриальном мире.

Под реинжинирингом технологических процессов следует понимать подход, в основу которого полагается осуществление изменений на предприятии с целью повышения результативности производства, адаптивности подстройки его мощностей к нестационарным возмущениям хода технологического процесса, обеспечения устойчивости и оперативности реакции предприятия на нестабильный спрос, суще-

ственные колебания цен внутреннего рынка, вызванные, в том числе ослаблением курса рубля, а также высоким содержанием импортных компонентов в затратах на производство [1].

### **1 Адаптивная модель**

Реинжиниринг представляет собой «перепроектирование» технологических процессов. Данный метод выражает проектную деятельность, направленную на реструктуризацию производственных систем предприятия. Под реинжинирингом следует понимать подход, подразумевающий осуществление изменений на предприятии, предназначенных для повышения результативности производства и скорости реакции предприятия на изменения и волатильность рынка.

В рамках применения инструментов реинжиниринга на машиностроительном предприятии возникает потребность в устойчивой, базовой и адаптивной модели для поддержки внедрения и реализации концепции реинжиниринга в технологические процессы. Основная цель адаптивной модели: указать причины возникновения производственных потерь в процессе реализации реинжиниринга, способствовать разработке предупреждающих решений и добиться повышения результативности при внедрении. Предлагаемая модель под названием «адаптивная модель для внедрения реинжиниринга технологических процессов машиностроительной отрасли» построена на основе подхода жизненного цикла реинжиниринга (рисунок 1).

Область машиностроения обуславливается сложностью технологических процессов, как при создании отдельных деталей, так и при проектировании и производстве оборудования и машин. В соответствии с этим, процесс реализации концепции реинжиниринга для отрасли машиностроения является актуальным. Именно рациональная организация технологических процессов на современных машиностроительных предприятиях является одним из способов повышения эффективности. По этой причине важно разрабатывать методы реинжиниринга технологических процессов проектирования и изготовления отдельных деталей и целостных изделий на машиностроительных предприятиях.

Модель, представленная на рисунке, делится на два типовых этапа реинжиниринга: «реализация реинжиниринга» и «успех реинжиниринга».

#### **Этап 1: Реализация реинжиниринга**

Основными целями данного этапа являются определение взаимосвязей между «критическими показателями» и производительностью технологического процесса с помощью алгоритма, идентификация и анализ текущего состояния технологического процесса в целях обнаружения узких мест, а также планирование будущих изменений. Раздел «Реализация реинжиниринга» состоит из четырех этапов. Каждый этап содержит ряд последовательных шагов, которые выполняются в определенном порядке.

#### **Этап 2: Успех реинжиниринга**

Основная цель этого раздела — измерить результативность технологических



процессов машиностроительного предприятия на двух этапах: «Анализ существующих процессов» и «После». Измерения результативности производится согласно основным показателям, представленным в таблице 1.

Использование данной комбинации показателей позволяет точно произвести оценку результативности технологических процессов предприятия в рамках внедрения и реализации инструментов реинжиниринга.



Рисунок 1 – Адаптивная модель внедрения реинжиниринга технологических процессов

Таблица 1 – Показатели результативности

| Показатель     | Описание  |
|----------------|---|
| Время процесса | Время, необходимое для преобразования одного или нескольких входов в готовую услугу или продукт посредством данного процесса.                       |
| Время цикла    | Время, необходимое для прохождения одной единицы через процесс. Общее время от начала до конца вашего процесса, определяемое вами и вашим клиентом. |
| Качество       | ISO 9000 определяет качество как «степень, в которой набор неотъемлемых характеристик соответствует требованиям».                                   |
| Стоимость      | Назначенная стоимость на основе суммы затрат на подвиды деятельности, составляющие процесс.   |

Таким образом, задачи реинжиниринга аналогичны задачам инновации: освоение новшеств для обеспечения конкурентоспособности продукции и, в конечном счете – повышение адаптации предприятия к постоянно меняющимся условиям внешней среды.

## 2 Исследование технологического процесса

В современных условиях машиностроительное предприятие может успешно работать только при достижении высокого уровня результативности технологического процесса обработки металлических изделий. Из этого следует, что в условиях применения и реализации концепции реинжиниринга, перепроектирование и дальнейшая модернизация основополагающих цифровых систем, используемых в процессе механообработки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), будут являться ключевыми факторами достижения успеха машиностроительных производств.

В качестве инструмента для исследования технологического процесса изготовления металлических изделий и выявления основных потерь, возникающих во время протекания данного процесса, был выбран инструмент, применяемый в рамках реализации реинжиниринга и необходимый для преобразования процессов, путем внедрения технологических инноваций, а именно – декомпозиция с применением группы стандартов *Integrated DEFinition (IDEF)*.

Применение группы стандартов *IDEF* в рамках анализа текущего состояния технологических процессов машиностроительного предприятия, на текущий момент, является ключевым показателем, отображающим степень соответствия организации требованиям стандартов *ISO 9000* и *ISO 9001*.

Группа стандартов *IDEF* использовалась для описания модели технологического процесса проектирования и изготовления металлических изделий, в связи с тем, что данный метод позволяет оценивать множество характеристик, такие как:

- преобразуемые ресурсы, каждого из этапов (входы);
- ресурсы, образующиеся в ходе преобразования (выходы);
- средства, необходимые для успешного протекания этапов процесса (механизмы);
- информация, контролирующая процесс преобразования (управление).

Использование группы стандартов *IDEF* актуально в условиях реализации гибкой стратегии машиностроительного предприятия. Данная методология позволяет выполнить декомпозицию технологических процессов в целях анализа их текущего состояния [2]. Процесс разработки и изготовления продукции машиностроительного предприятия можно декомпозировать на основные этапы, представленные на рисунке

Первый этап представляет собой изготовление цифровых моделей изделий, необходимых для обеспечения качества на этапах конструирования и разработки. Процесс разработки цифровой модели деталь сборочных единиц (ДСЕ) представлен в виде декомпозиции укрупненного этапа (A1). В рамках применения нотаций группы стандартов *IDEF*, данный этап можно называть родительским блоком. Образующиеся в ходе декомпозиции этапы нижнего уровня называются дочерними блоками – соответственно.

Родительский блок (A1), изображающий укрупненный этап технологического процесса проектирования и изготовления ДСЕ, включает в себя базовые элементы группы стандартов *IDEF*, определяющие необходимые условия для успешного протекания процесса:

- вход: Требования заказчиков, являющиеся ключевыми при разработке цифровой модели ДСЕ;
- выход: Цифровая модель, разработанная в ходе преобразования требований

заказчика;

- механизм: Сотрудники предприятия, инструкции, правила и системы проектирования, необходимые для успешной реализации преобразований требований заказчика;

- управление: ГОСТ Р 57700.37-2021 – регламентирующий требования готовой цифровой модели ДСЕ.

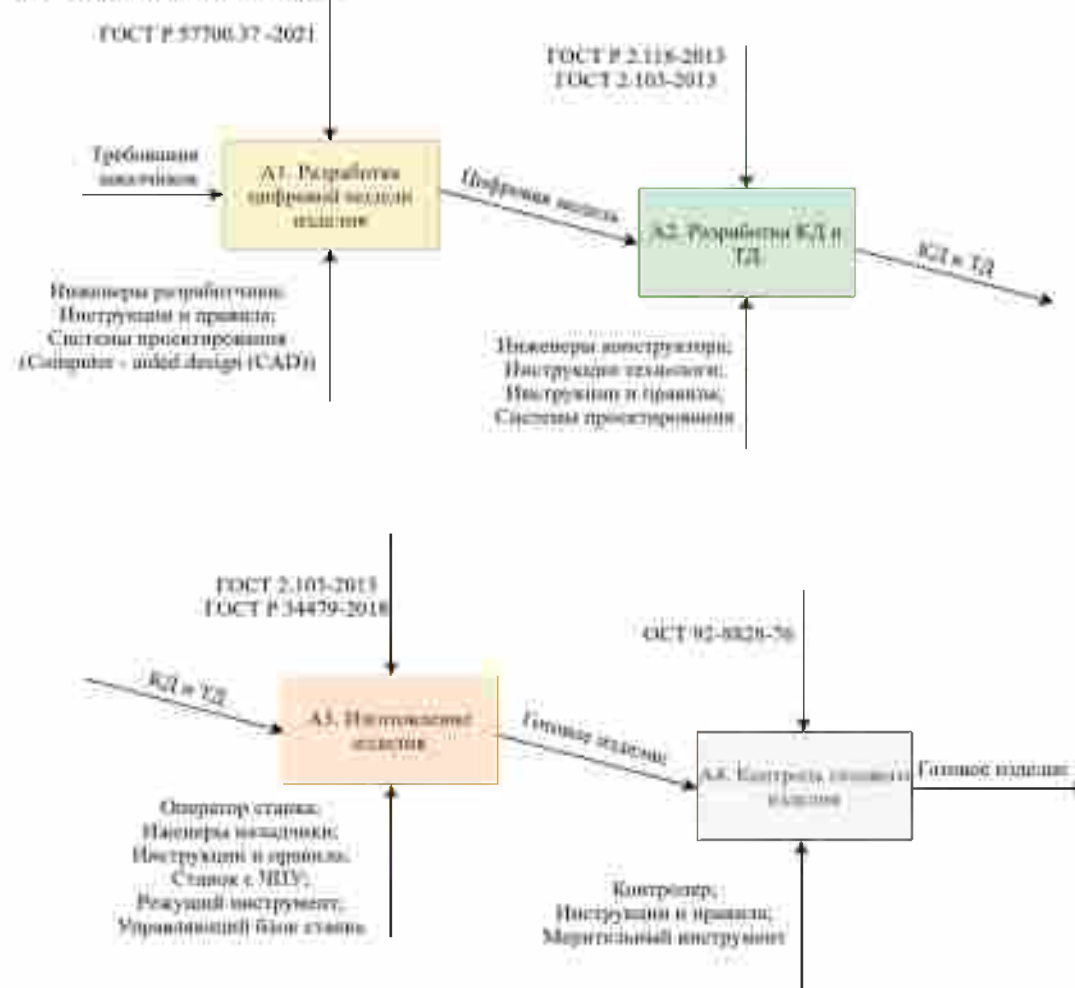


Рисунок 2 – Процесс разработки и изготовления продукции машиностроения

Форма процесса разработки цифровой модели ДСЕ, разработанная с применением нотаций группы стандартов IDEF, представлена на рисунке 3.

Изображенные на рисунке 3 дочерние блоки этапа разработки цифровой модели ДСЕ (A1.1 и A1.2), также имеют базовые элементы группы стандартов IDEF.

Второй этап производства представляет разработку конструкторской (КД) и технической документации (ТД) металлического изделия.

Процесс подготовки к изготовлению ДСЕ с указанием вероятностей переходов процесса демонстрирует рисунок 4. Родительский блок (A2), демонстрирующий укрупненный этап разработки КД и ТД, необходимой для изготовления ДСЕ, соответствующего основным критериям качества готового металлического изделия,

включает в себя базовые элементы группы стандартов IDEF, определяющие необходимые условия для успешного протекания процесса:

- **Вход:** Цифровая модель, в ходе анализа и преобразования которой, сотрудники предприятия, используя цифровые системы проектирования, разрабатывают конструкторскую и технологическую документацию;

- **Выход:** КД и ТД, необходимая для запуска изготовления продукции машиностроительного предприятия;

- **Механизм:** Сотрудники предприятия, инструкции, правила и системы проектирования, необходимые для успешной реализации преобразований цифровой модели ДСЕ в готовую КД и ТД;

- **Управление:** ГОСТ Р 2.118-2013 и ГОСТ 2.103-2013 – регламентирующие требования готовой КД и ТД.

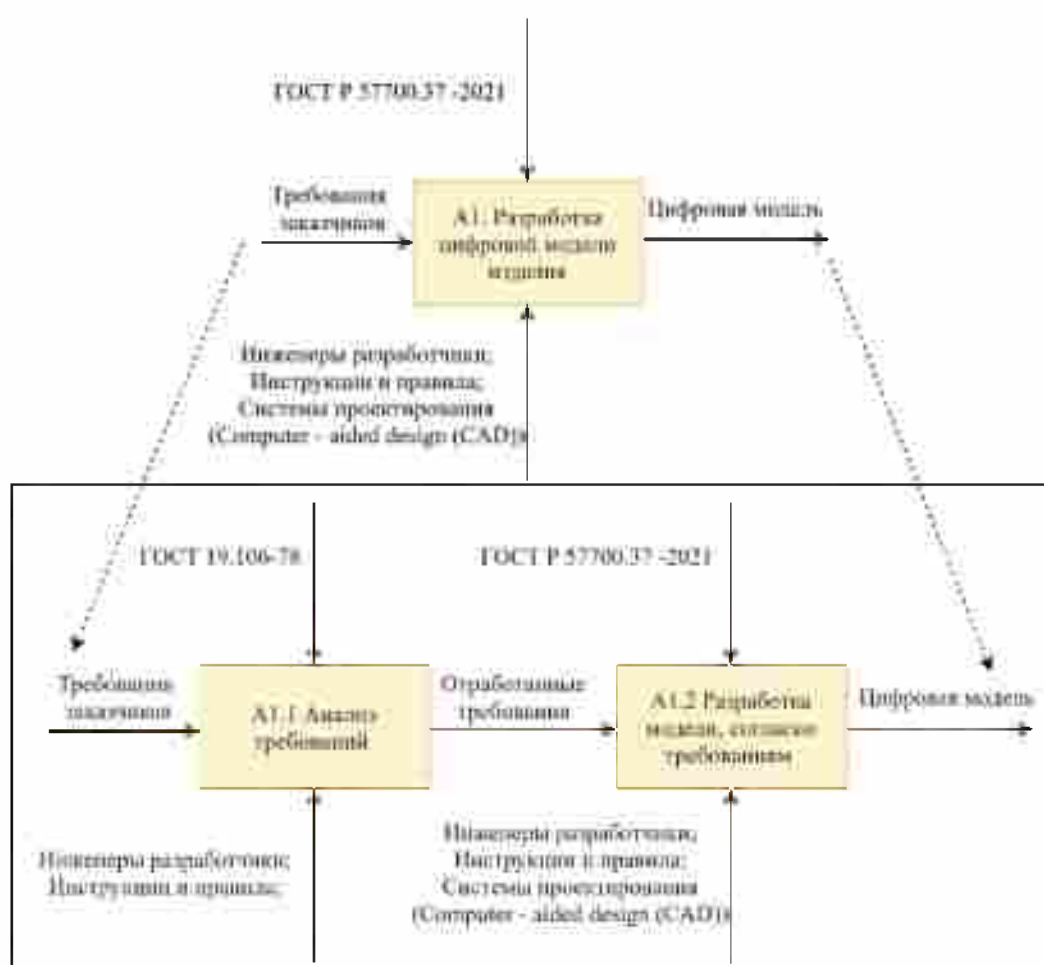


Рисунок 3 – Форма процесса разработки цифровой модели изделия

Форма процесса разработки КД и ТД, выполненная с применением нотаций группы стандартов *IDEF*, представлена на рисунке 4.

Изображенные на рисунке 4 дочерние блоки этапа разработки КД и ТД ДСЕ

(A2.1, A2.2 и A2.3), также имеют базовые элементы группы стандартов *IDEF*.

Этап механообработки является ключевым. Качество выпускаемого изделия напрямую зависит от успешного протекания данного этапа. Процесс механообработки состоит из четырех последовательных операций (дочерних блоков):

A3.1 – наладка оборудования, подготовка управляющего блока ЧПУ к работе;

A3.2 – Подбор режущего инструмента в зависимости от изготавливаемого на данном этапе механической обработки изделия;

A3.3 – Проверка состояния режущего инструмента;

A3.4 – Процесс металлообработки изделия.

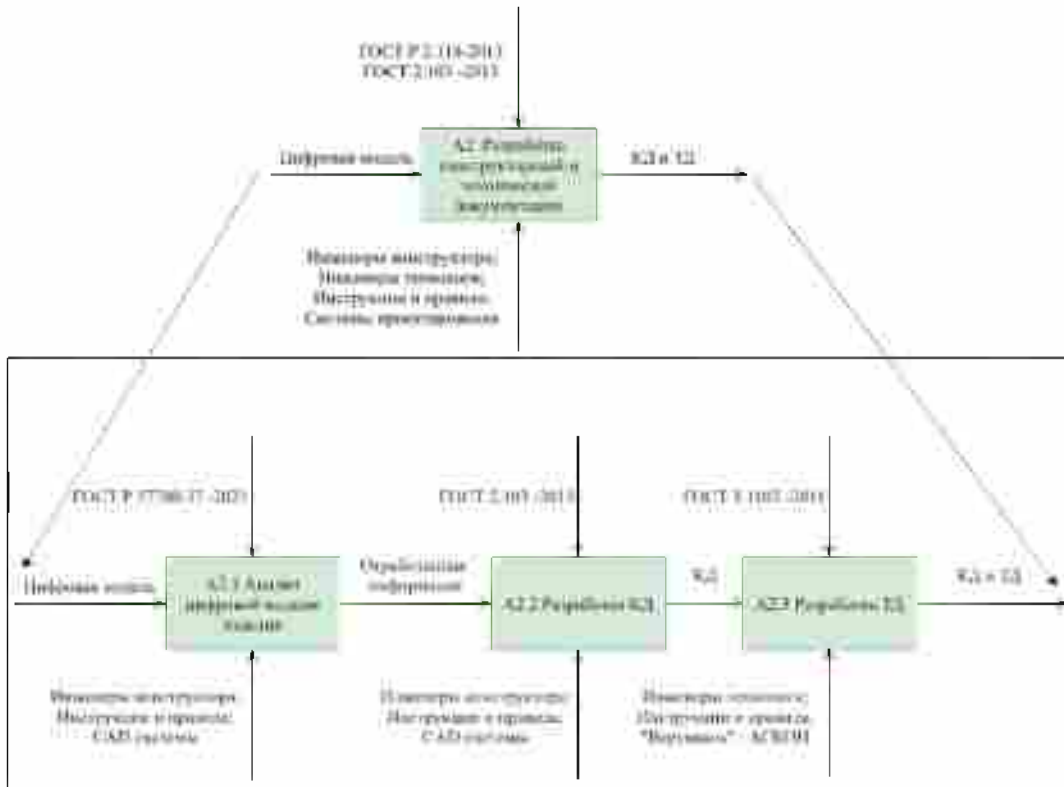


Рисунок 4 – Форма процесса разработки КД и ТД

Родительский блок (A3.), демонстрирующий укрупненный этап изготовления изделия, включает в себя базовые элементы группы стандартов *IDEF*, определяющие необходимые условия для успешного протекания процесса:

- вход: КД и ТД, необходимая для выработки задания на станок, подбора нужного вспомогательного инструмента и оснастки, наладки управляющего блока ЧПУ;
- выход: готовое изделие;
- механизм: Сотрудники предприятия, инструкции, режущий инструмент станка и налаженный управляющий блок, совокупный функционал которых необходим для успешного изготовления продукции машиностроительного предприятия;
- управление: ГОСТ Р 2.34479-2018 и ГОСТ 2.103-2013 – регламентирующие требования к готовому изделию.

Форма процесса изготовления металлического изделия, выполненная с применением нотаций группы стандартов *IDEF*, представлена на рисунке 5.

Изображенные на рисунке 5 дочерние блоки этапа изготовления металлического изделия (A3.1, A3.2, A3.3 и A3.4), также имеют базовые элементы группы стандартов *IDEF*.

Заключительный этап производственного процесса – проверка готового металлического изделия на соответствие КД и ТД. Целью данного этапа является установление допустимых отклонений от стандартов и проведение необходимой коррекции.

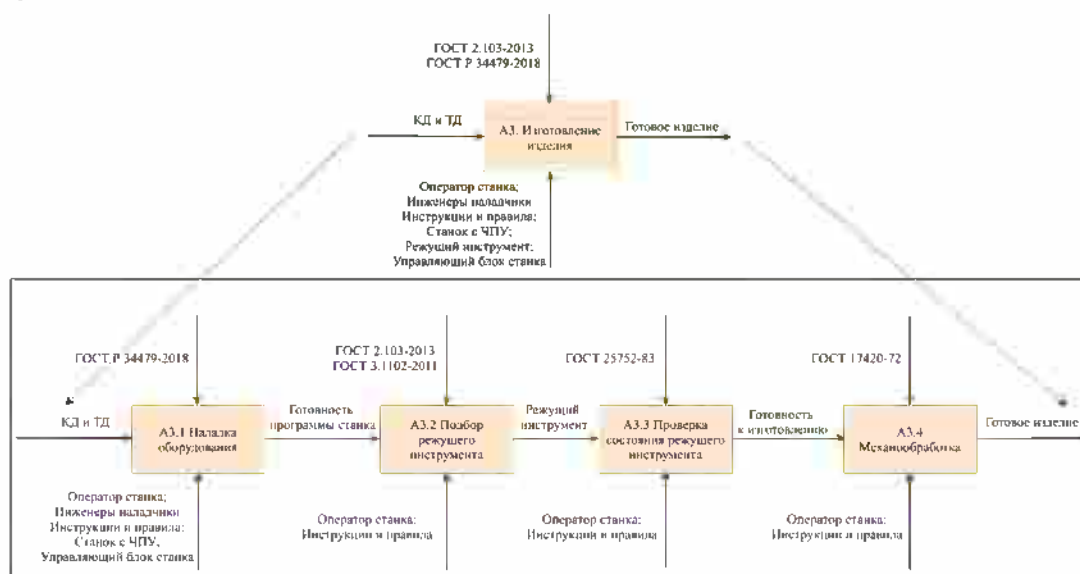


Рисунок 5 – Форма процесса изготовления металлических изделий

Форма процесса контроля готовой продукции, выполненная с применением нотаций группы стандартов *IDEF*, представлена на рисунке 6.

Родительский блок (A4), демонстрирующий укрупненный этап контроля готового металлического изделия, включает в себя базовые элементы группы стандартов *IDEF*, определяющие необходимые условия для успешного протекания процесса:

- вход: готовое изделие, контроль на соответствие КД и ТП которого, необходимо произвести;
- выход: готовое изделие, готовое к транспортировке к следующим этапам обработки или упаковке и доставке до заказчика;
- механизм: Сотрудники предприятия, инструкции, правил и мерительный инструмент, необходимые для контроля готовой продукции;
- управление: ОСТ 92-8828-76 – один из ключевых стандартов, регламентирующий требования к приемке готового металлического изделия.

Изображенные на рисунке 6 дочерние блоки этапа разработки КД и ТД ДСЕ (A4.1 и A4.2), также имеют базовые элементы группы стандартов *IDEF*.

Исходя из выполненной декомпозиции ключевых этапов проектирования и изготовления металлических изделий, представленной в виде нотаций группы стандартов *IDEF*, а также, в ходе проведенного анализа дочерних блоков процесса, были выявлены основные показатели, отражающие качество готового изделия [3]:

- прочность конструкции при готовой сборке;
- надежность функционирования;

- вес, металлоемкость и габариты;
- простота и безопасность обслуживания;
- удобство разборки и сборки.

Кроме того, произведенная декомпозиция технологического процесса производства продукции на машиностроительном предприятии позволила разработать модель, четко отражающую особенности каждого этапа технологического цикла изготовления металлических изделий с учетом последовательности операций (рисунок 7) [4].

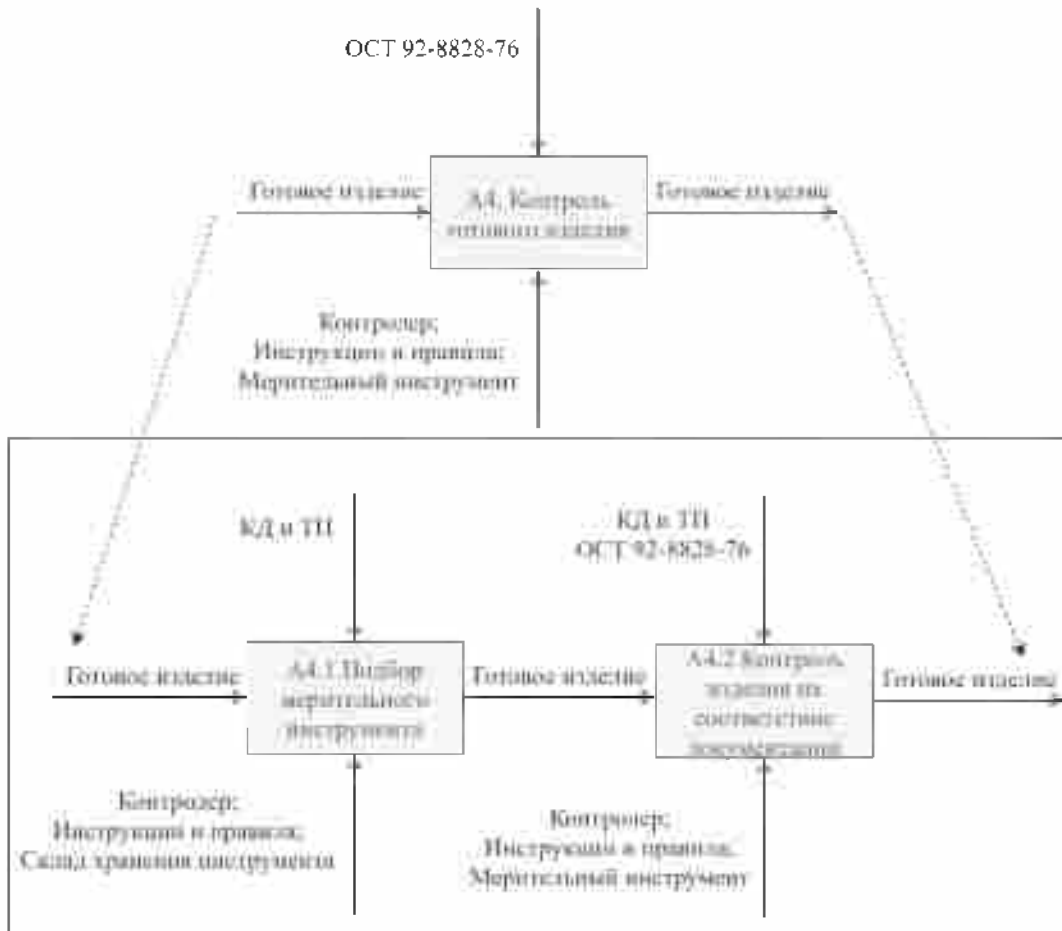


Рисунок 6 – Форма процесса контроля готовой продукции

При разработке модели произведена поэтапная детализация технологического процесса разработки металлических изделий на предприятиях машиностроительной отрасли. В ходе применения модели производится анализ уровня состояния цифровизации технологических процессов на этапах моделирования, проектирования, подготовки, изготовления и контроля в рамках внедрения актуальных *CAD/CAM* систем и систем автоматизированного мониторинга режущего инструмента.

Представленная модель технологического процесса изготовления металлических изделий путем механообработки на станках с ЧПУ позволяет определить узкие места на этапах производства и указать ключевые места для внедрения интегрированных *CAD/CAM* систем и методов автоматизированного мониторинга вспомога-

тельного инструмента. Граф поэтапной организации производства металлических изделий, с учетом использования представленных технологических решений, представлен на рисунке 8.

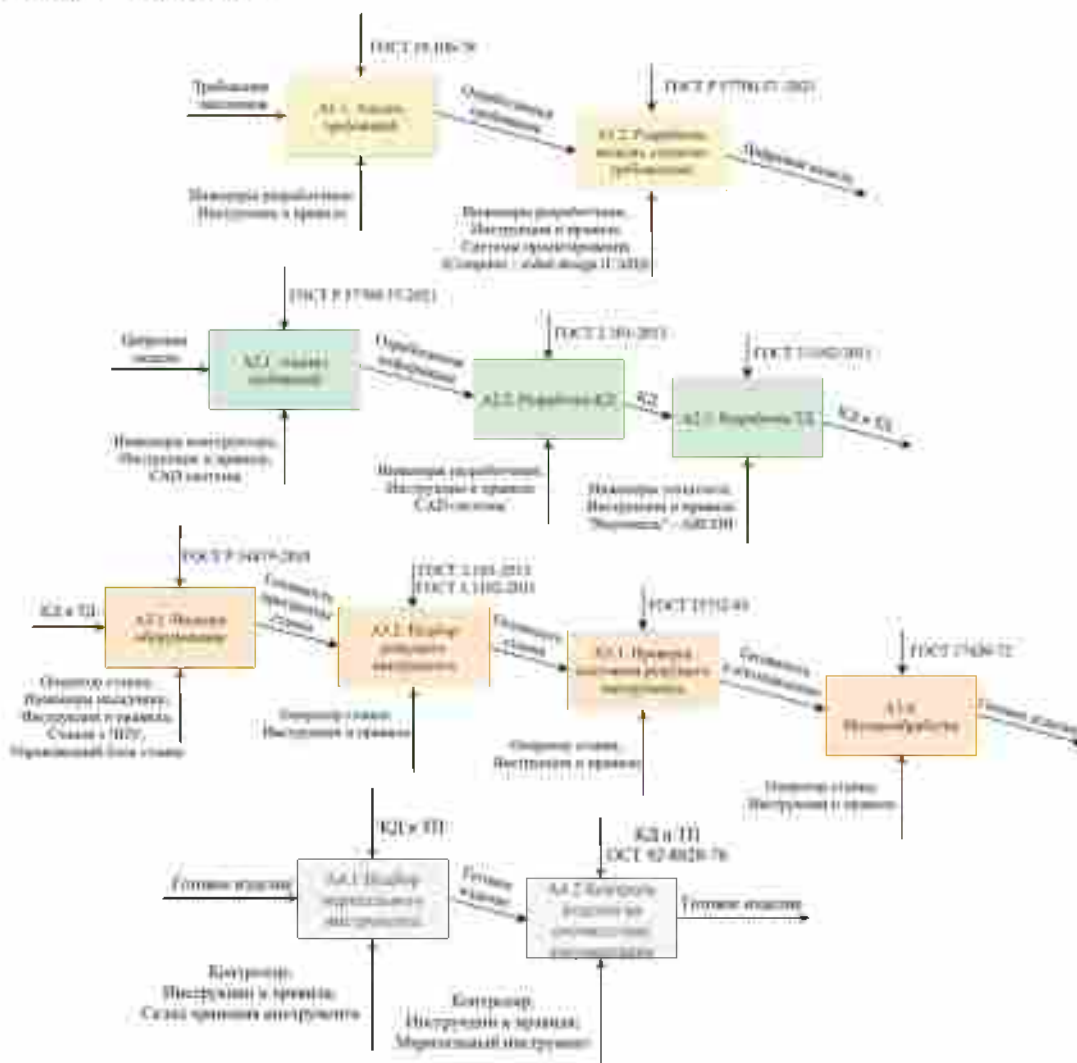


Рисунок 7 – Форма технологического цикла изготовления металлических изделий

### Заключение

Деятельность любого промышленного предприятия состоит из комплекса последовательных мероприятий, которые сосредоточены на выполнении строго поставленной цели. В современных реалиях необходимо большее внимание сосредотачивать на анализе технологических процессов, поскольку это позволяет оценить качество выполняемых работ, исключить операции, не приносящие ценности и эффективно распределить задачи среди участников процесса. Реинжиниринг позволяет провести всесторонний анализ деятельности различных промышленных комплексов, благодаря выделению входных и выходных данных каждого отдельного процесса. Объектом данного метода является не организация в целом, а отдельные процессы.

В статье рассматривалось текущее состояние и перспективы внедрения концепции реинжиниринга в ключевые технологические процессы предприятий маши-



ностроительной отрасли. В результате анализа текущего состояния и перспектив внедрения реинжиниринга выявлено, что основным направлением совершенствования организации производства металлических изделий для обеспечения качества продукции промышленного предприятия, является поэтапное внедрение интегрированных *CAD/CAM* систем и систем автоматизированного мониторинга состояния режущего инструмента.

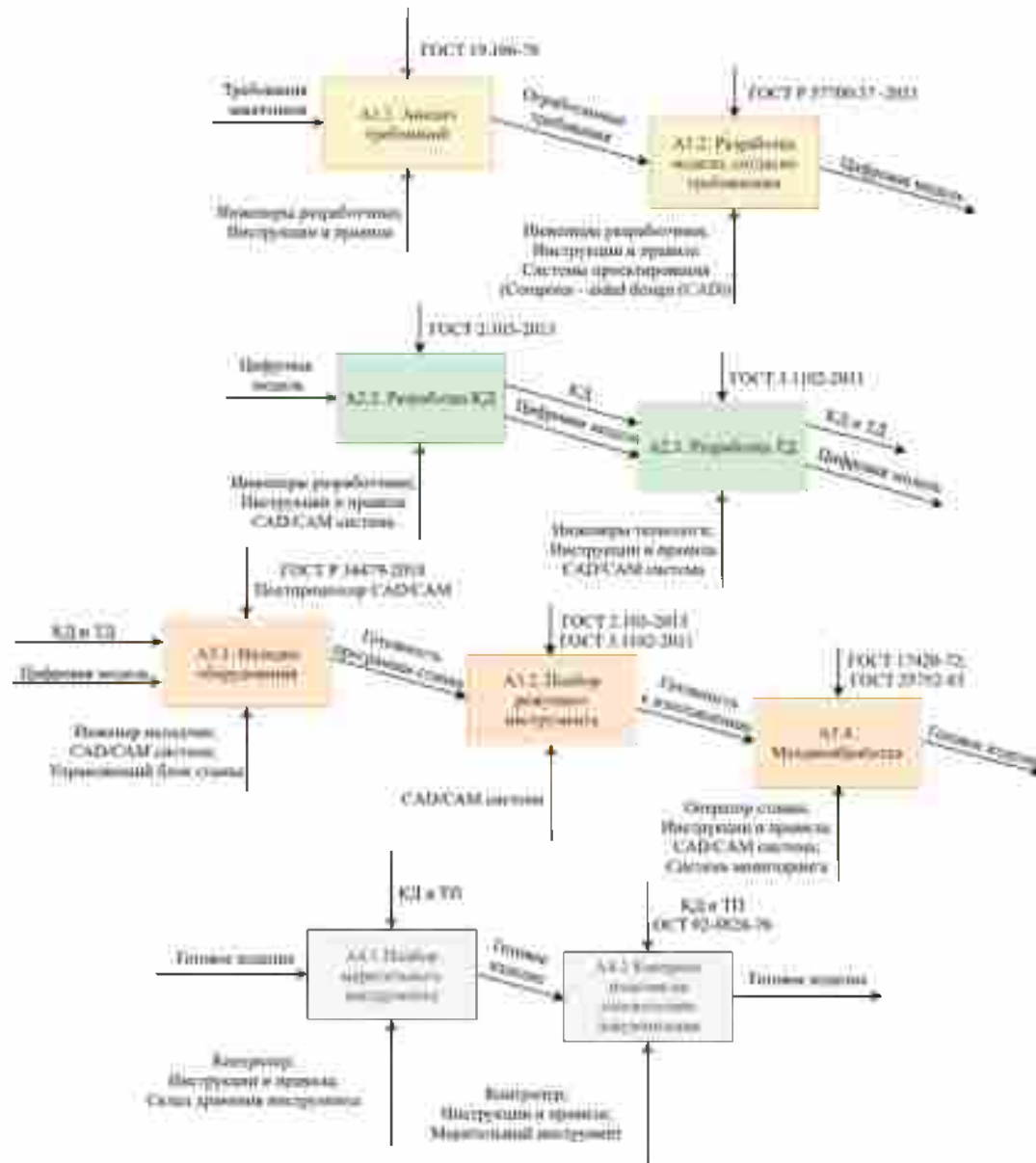


Рисунок 8 – Форма технологического цикла изготовления металлических изделий с внедрения технологических инноваций

Комплексный подход и совместное внедрение интегрированных *CAD/CAM*-систем, позволит управлять всеми этапами изготовления ДСЕ: от проектирования

цифровой модели изделия до выпуска готовой продукции. С помощью синхронной технологии можно напрямую редактировать модели изделия и подготавливать их к разработке программ для станков с ЧПУ, включая обработку глухих отверстий и зазоров, смещенных поверхностей, а также изменять размеры элементов детали.

В результате внедрения совместных *CAD/CAM* систем процесс разработки становится более гибким: инженеры-конструкторы совершенствуют изделия, специалисты оптимизируют управляющие процессы, технологи-программисты проверяют стратегии и выбирают оптимальный способ изготовления изделий.

#### Литература

1 Хаммер М., Чампи Дж. Реинжиниринг корпораций: манифест революции в бизнесе. – Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2007. – 288 с.

2 Чжун К.Л., АитСахлиа Ф. Элементарный курс теории вероятностей. Стохастические процессы и финансовая математика: учебник. 2-е издание / Пер. М.Б.Лагутин, К.Л.Чжун. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 457 с.

3 Будкин Ю.В., Таллер С.Л. Классификация показателей качества изделий машиностроения и приборостроения // Технология машиностроения. – 2017. – С.64-68.

4 Петрушевская А.А. Модели и методики организации цифрового производства радиоэлектронных изделий на основе внедрения межмашинного взаимодействия: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.02.22. – Санкт-Петербург, 2020. – 224 с.

5 Суслов А. Г. Технология машиностроения: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 2004. – 400 с.

Зидерер Юрий Дмитриевич – магистрант, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург. Область научных интересов: автоматизация производственных систем, реинжиниринг технологических процессов, управление изменениями производственных систем.

Email: yura.ziderer@gmail.com

Дзюбаненко Анастасия Андреевна – к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: автоматизация производственных систем, моделирование технологических процессов, организаций производства, обеспечение качеством сложных систем

Email: aap.nauka@gmail.com

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

ADAPTIVE MODEL OF REENGINEERING AS A TOOL THAT DETERMINES THE DIRECTIONS OF MODERNIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE

The article deals with issues related to the current state and prospects for the introduction of the concept of reengineering in the technological processes of enterprises in the engineering industry. An adaptive model for the introduction and implementation of reengineering is presented, which makes it possible to determine the key directions for the modernization of technological processes of a machine-building enterprise. A detailed decomposition of the fundamental processes of the enterprise is demonstrated, the analysis of which makes it possible to identify the places of implementation and implementation of technological innovations proposed in the course of the study.

**Key words:** reengineering, technological process, Markov chains, CAD/CAM systems, automated monitoring, metalworking, life cycle of a machine-building enterprise.

Ziderer Yuriy Dmitrievich – master student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

**Research interests:** automation of production systems, reengineering of technological processes, change management of production systems.

Dzyubanenko Anastasia Andreevna – candidate of technical sciences, associate professor, St.Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

**Research interests:** automation of production systems, modeling of technological processes, production organizations, quality assurance of complex systems

УДК 658.5.011

## АНАЛИЗ МЕТОДИКИ КАРТИРОВАНИЯ ПОТОКА ПРОЦЕССА

Скорнякова Е.А., Золотухин К.В.

*Проведено сравнение методов картирования потока. представлено сравнение карты потока создания ценности и карты потока процесса. рассмотрены ключевые понятия поточного производства в рамках концепции бережливого производства на основе государственных стандартов. Описана методика построения карты потока процесса сборки изделия, а также представлены результаты изменения количества изделий незавершенного производства при сравнении одного процесса с разным временем такта.*

*Ключевые слова:* бережливое производство; поток создания ценности; карта потока процесса; карта потока создания ценности.

### Введение

Цифровизация и автоматизация процессов промышленных предприятий должна осуществляться максимально эффективно, именно поэтому первым шагом является стандартизация процессов с применением различных инструментов и методов, в том числе и визуальных. Для производств выпускающих продукцию серийно и массово, а также организованных в форме потока, вопрос важности стандартизации и автоматизации стоит особо остро ввиду объемов выпуска и требуемой скорости реагирования на возникающие проблемы.

Одним из методов и инструментов, применяемых в рамках системы менеджмента качества, является методология планирования, разработки, подготовки производства и производства APQP (Advanced Product Quality Planning) [1]. Одним из элементов APQP является карта потока процесса (рисунок 1), представляющая собой визуальный инструмент [2], помогающий достигнуть единого понимания всех шагов процесса за счет представления его в виде схемы, отражающей технологические и другие операции, представленные в виде условных знаков определенной последовательности, соответствующей ходу рассматриваемого процесса.

Аналогичный термин «карта потока процесса» встречается в еще одном нормативном документе - ГОСТ Р 56407-2015 «Бережливое производство. Основные методы и инструменты» [3]. Согласно этому нормативному документу (далее НД), а именно представленной в нем таблице 4 [3], «карта потока процесса» имеет похожее название – «карта потока создания ценности» (values stream map).

Сравнение методов картирования потока процесса согласно указанным выше НД представлено в таблице 1.



Рисунок 1 – Типовой временной график APQP-процесса

Таблица 1 – Методы картирования потока процесса

| Номер НД                         | ГОСТ Р 51814.6-2005   | ГОСТ Р 56407-2015  |
|----------------------------------|---|--|
| Наименование метода              | Карта потока процесса   | Карта потока создания ценности (VSM) / карта потока процесса   |
| Назначение                       | Визуальное отображение процесса изготовления автомобильных компонентов с целью достижения понимания работы этого процесса                                 | Наглядное представление потока создания ценности, его характеристик с целью поиска и сокращения потерь, и улучшение потока с точки зрения сокращения всех видов потерь и удовлетворения требований потребителя |
| Описание                         | Схема, составленная из условных знаков и отражающая последовательность операций изготовления продукции  | Метод, направленный на создание визуального образа информационных и материальных потоков, необходимых для выполнения заказа потребителя  |
| Виды карт                        | Предварительная карта потока процесса (применяется для предварительного изучения возможностей процесса (по установочной серии), карта потока процесса     | Карта текущего состояния, карта будущего состояния   |
| Применяемые условные обозначения | Используемые знаки должны быть приведены с расшифровкой в нижней части карты. Рекомендуется выбрать не более 7-10 знаков-символов и стандартизировать их. | Применяется регламентированный набор символов/знаков [4]   |

Несмотря на указанную в [3] схожесть карты потока процесса и карты потока создания ценности, которые основываются на хронометраже процессов и применяются для оценки процессов с точки зрения потерь, они являются разными методами, что видно из таблицы 1. И в данном случае можно сказать, что карта потока процесса может быть заложена в основу VSM. Для подкрепления представленного утверждения, ниже авторами приведен анализ методики картирования потока процесса.

### 1 Основные понятия поточного производства

Перед рассмотрением методики создания карты потока процесса, стоит уделить внимание ключевым понятиям «бережливого производства», составляющим его основу.

Процесс – это совокупность действий, направленных на достижение определенного результата (продукт). Любой процесс включает в себя потери, незначимую и значимую работу [5]. При этом в процентном соотношении около 85% времени осуществления процесса составляют именно потери, то есть работа или действия, которые не добавляют ценности продукции или услуге. 10% приходится на незначимую работу, то есть работу, не добавляющую ценности, но без которой невозможно обойтись в текущих условиях организации конкретного производства. И 5 % это значимая работа, которую необходимо выполнять для обеспечения требований заказчиков к изготавливаемой продукции или предоставляемой услуге – добавляющая ценность этой продукции или услуге.

Основной отличительной особенностью производства, организованного в виде потока, является согласованность норм времени всех операций производства. Для эффективного производства на поточных предприятиях все работы должны быть стандартизованы. Сама работа является стандартизованной, когда присутствует точное описание каждого действия, включающее время такта, время цикла, последовательность выполнения определенных задач и минимальное количество запасов для выполнения работы [6].

Итак, время производственного цикла (ВПЦ, *production lead time*) это время прохождения продукции через весь процесс или поток создания ценности от первой операции до последней.

На уровне предприятия время производственного цикла не включает время нахождения продукции на складе сырья/материалов или готовой продукции. Данное понятие также применяется для обозначения времени выполнения проекта. Время производства является частью времени «от разгрузки до поставки».

Время такта (ВТ, *takt time*) – это величина, которая рассчитывается как доступное производственное время за определенный период (например, смена, сутки, месяц и т.д.) деленное на объем потребительского спроса за этот период. Под временем такта понимается время производства одной единицы продукции или услуги, то есть это скорость, с которой потребитель желает получать продукцию [7].

Рассмотрим пример: пусть время производственного цикла составляет 800 минут, в месяц для производства доступно 20 дней. При работе двух смен, по 8 часов каждая, получится, что в месяц общее производственное время составит 20 дней \* 8 часов \* 2 смены \* 60 минут = 19200 минут. Согласно полученным заказам, за месяц необходимо предоставить клиенту 6000 единиц готовой продукции. Таким

образом, разделив 19200 минут на 6000 единиц продукции можно получить время такта равное 3,2 минуты. Это означает, что в течение рассматриваемого месяца, предприятие должно производить единицу готовой продукции каждые 3,2 минуты.

Далее, исходя из времени производственного цикла и времени такта, можно рассчитать количество процессов. Для рассматриваемого примера количество процессов составляет 250 штук.

Следующим важным понятием является время цикла. Время цикла (ВЦ, *cycle time*) это время, необходимое для выполнения конкретного процесса при производстве единицы продукции или услуги в соответствии с процессом, где операция представляет собой повторяющуюся последовательность действий, которая приводит к выполнению заданий.

В лучшем случае ВЦ равняется ВТ, но также ВЦ может быть меньше или больше расчетного ВТ ввиду возможных ограничений мощности производственного оборудования на конкретном процессе.

Ограничивать выравнивание времени цикла под время такта могут особенности самого процесса, который может быть спроектирован таким образом, что выполнение операции на этом процессе быстрее определенного времени не представляется возможным. Это может быть как ввиду ограниченной площади месторасположения конкретного процесса, так и невозможности добавления еще одного сотрудника на этот процесс, ввиду небезопасной работы двух операторов ввиду пересечения траекторий движения при выполнении неразрывных блоков операций.

В источниках, на которые ссылаются государственные стандарты, связанные с потоком создания ценности, приведен ряд определений, в том числе «время добавления стоимости» (ВДС, *value add*). Это время тех элементов работ, которые изменяют изделие, когда заказчик выражает желание платить за него. Фактически это время непосредственной обработки.

Исходя из рассмотренных понятий, можно сформулировать неравенство, позволяющее лучше понять взаимосвязь приведенных определений:  $ВДС < ВЦ < ВПЦ$ .

Отдельно следует упомянуть определения «потока» и «потока создания ценности» [8].

Поток (*stream*) – совокупность элементарных действий, которые управляются как целое, характеризуемое скоростью перемещения основной характеристики объекта. Согласно данному НД, поток представляет собой деятельность системы взаимосвязанных процессов, например, соединенных в цепочку, отражающую последовательность перемещения и создания ценностей от входа одного процесса к другому синхронно по всей цепочке.

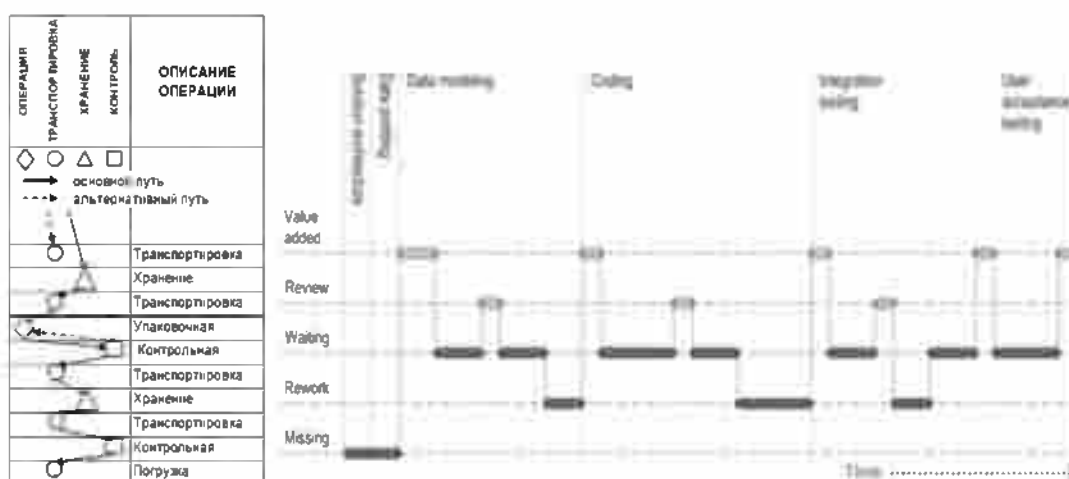
Поток создания ценности (ПСС, *value stream*) включает все действия, как создающие, так и не создающие ценность, которые позволяют продукции пройти все процессы от разработки концепции до запуска в производство и от принятия заказа до доставки потребителю. В данном определении под потребителем понимается как внешний, так и внутренний потребитель.

Ценность для потребителя может быть связана с категориями, такими как качество, время производства продукции, время оказания услуги, надежность, безопасность и др. Для производителя ценность связана с обменом продукции на деньги - универсальную обменную ценность. При этом чем выше ценность для потреби-

теля, тем большую обменную ценность имеет продукция для производителя. Ценность для внутреннего потребителя определяется реализацией требований к поставке продукции нужного качества, в нужное время и место, в необходимом количестве.

ПСЦ используется как интегральное понятие, включающее в себя материальные потоки (сырья, материалов, комплектующих, деталей и сборочных единиц, готовой продукции), информационные и финансовые потоки, направленные на создание и доставку готовой продукции потребителю в установленное время, в установленном месте, с установленной стоимостью, с последующим ее обслуживанием в процессе эксплуатации и утилизации.

Картированию потока создания ценности посвящено большое количество научных работ [9], в то время как карты потока процесса встречаются в публикациях отечественных авторов не так часто [10]. Наиболее часто встречается таблично-графическая форма карты потока процесса, прописанная в методологии APQP (рисунок 2,а), но также встречается и графическое представление (рисунок 2,б).



а)

б)

Рисунок 2 – Примеры карт потока процесса

Данная форма достаточно простая, но все же имеет ряд недостатков с точки зрения восприятия и последующего использования. В настоящей статье подробно описана методика построения графических карт потока процесса, позволяющих понять какое количество и виды технологических и вспомогательных операций, необходимы для производства продукции.

## 2 Методика построения карты потока процесса

Рассмотрим подробно методику составления детальной карты потока процесса с учетом количества единиц незавершенной продукции на каждом процессе и специальными условными обозначениями категорий процессов (таблица 2). Для рассматриваемого примера приняты следующие условные обозначения: запас представлен в виде закрашенного круга; перемещение в виде не закрашенного перевернутого треугольника; операции (обработки) человеком или оборудованием на рабочем месте/станции в виде закрашенного квадрата; рабочие места/станции, на кото-



рых операции человеком или оборудованием не выполняются, обозначены не закрашенным квадратом; нерабочие места/станции обозначены маленьким, не закрашенным квадратом.

Таблица 2 – Условные обозначения категорий процессов

|             |  |   |
|-------------|--|---|
| Запас       |  | ● |
| Перемещение |  | ▽ |
| Обработка   | Рабочие места/ станции, на которых выполняются операции человеком или оборудованием    | ■ |
|             | Рабочие места/ станции, на которых операции человеком или оборудованием не выполняются | □ |
|             | Нерабочие места/ станции   | ◦ |

Первым шагом по горизонтальной шкале записывается время в обратном порядке (справа налево), то есть финальный процесс (станция на линии) является точкой отсчета.

В зависимости от времени осуществления процесса, горизонтальная шкала может быть выражена в минутах или секундах. Соответственно, над делениями шкалы указывается время по порядку справа налево. На рисунке 3 изображен начальный этап построения карты потока процесса.

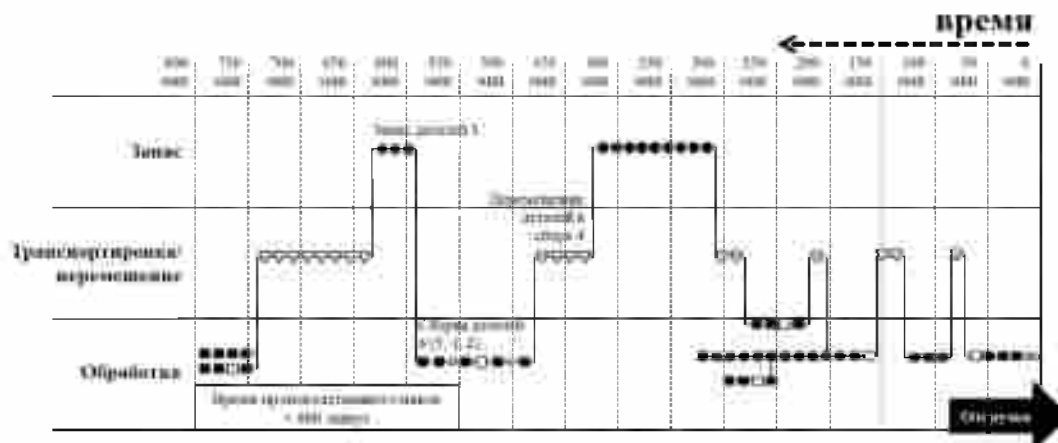


Рисунок 3 – Пример карты потока процесса

Для исключения путаницы, на карту добавляется стрелка, указывающая переход на следующий процесс, например, отгрузку продукции на склад или отправку клиенту.

По вертикали процесс разделяется на следующие категории: запас, транспортировку, обработку. Запас представляет собой количество деталей, паллет в запасе или подсобранных узлов.

В качестве транспортировки/перемещения указывается количество единиц незавершенной продукции, находящейся в процессе перемещения. Перемещаемый запас, устанавливаемый в зависимости от времени такта (фиксированное количество изделий, находящихся в процессе транспортировки), а также буфер, необходимый для настройки предшествующего и последующего процессов.

В обработке указываются: станции/рабочие места, на которых выполняются операции, как человеком, так и оборудованием; станции, на которых не выполняются операции; нерабочие станции, через которые продукция тоже проходит в рамках технологического процесса.

Для каждой из категорий должно быть введено условное обозначение, позволяющее легко ее идентифицировать на карте (таблица 2).

На созданной карте в обязательном порядке указывается название процессов. Например, «Запас деталей», и в скобках указывается количество деталей в запасе. В нашем случае это три детали. Таким же образом указывается название процессов перемещения, но до скобок указывается вместимость процесса, а в скобках - количество в буфере.

Для процессов обработки/сборки до скобок указывается общее количество процессов, а в скобках по порядку количество рабочие места/станции, на которых выполняются операции человеком или оборудованием, Рабочие места/станции, на которых операции человеком или оборудованием не выполняются и в последнюю очередь нерабочие места/станции.

По результатам замеров хронометража, составления карты потока процесса вычисляется общее время производственного цикла, которое указывается на самой карте.

## 2.1 Карта потока процесса сборки изделия

Рассмотрим пример картирования потока процесса сборки. Сборка изделия состоит из трех этапов: установка внутренних комплектующих корпуса, установка внешних комплектующих корпуса и финальная сборка. Между линиями есть два перемещения: перемещение с линии 1 на линию 2 и с линии 2 на линию 3 соответственно, как показано на рисунке 4.



Рисунок 4 – Карта потока процесса сборки изделия

Согласно карте, на рассматриваемом процессе находится 36 единиц незавершенной продукции, при этом ВТ, исходя из спроса на продукцию, составляет 2,5 минуты. Соответственно ВЦ сборки продукции, рассчитанное как произведение количества единиц незавершенной продукции на ВТ, составляет 90 минут. В зоне перемещения находится 9 единиц незавершенной продукции. Время перемещения между линиями 1 и 2 составляет 17 минут.

Задача оценки текущей карты может быть сформулирована как сокращение количества единиц незавершенной продукции, перемещаемое между линиями сборки, за счет выделения стандартного количества перемещаемых корпусов.

На рисунке 5 изображено перемещение на тележках 9 единиц незавершенной продукции между линиями 1 и 2.



Рисунок 5 – Перемещение незавершенной продукции

Если в процессе перемещения будет 0 корпусов, то между линиями будет разрыв.

Если в процесс перемещения добавить 1 корпус, который сойдет с линии 1 через 2,5 минуты, то в процессе перемещения разрыв между линиями сохранится. То есть одного корпуса в перемещении будет недостаточно, и линия 2 остановится по отсутствию корпусов на 14,5 минут – до момента пока этот один корпус не переместится до входа линии 2.

Чтобы посчитать минимально необходимое количество корпусов в процессе перемещения, необходимо разделить время перемещения между линиями 1 и 2 на время такта, составляющее 2,5 минуты. Таким образом, получается 6,8, то есть минимальный буфер составляет 7 корпусов. Округлить в меньшую сторону, то есть до 6-ти корпусов, нельзя, так как в таком случае линия остановится, и будет стоять 2 минуты, пока шестой корпус не дойдет до входа линии 2.

С целью обеспечения бесперебойной работы линии 2, в процессе перемещения должно быть минимум 7 корпусов. Два корпуса, которые также находятся в буфере, являются проблемой, на которой необходимо сосредоточиться и стремиться к их сокращению, с целью снижения общего ВЦ производства продукции.

## 2.2 Изменение количества изделий незавершенного производства после перехода на другое время такта

Рассмотрим пример, когда произошло изменение спроса на изделия, и теперь производству необходимо выпускать продукцию с тактом не 2,5 минуты, а 2 минуты. ВТ изменилось, но при этом количество изделий незавершенного производства, располагающихся на линии, изменено не было, то есть ВЦ производства из 90 минут не стало 72 минуты.

Пересмотр ВЦ сборки путем изменения количества изделий незавершенного производства после перехода на другое ВТ рассмотрим на примере подборок деталей 1 и 2, приведенных на рисунке 6.

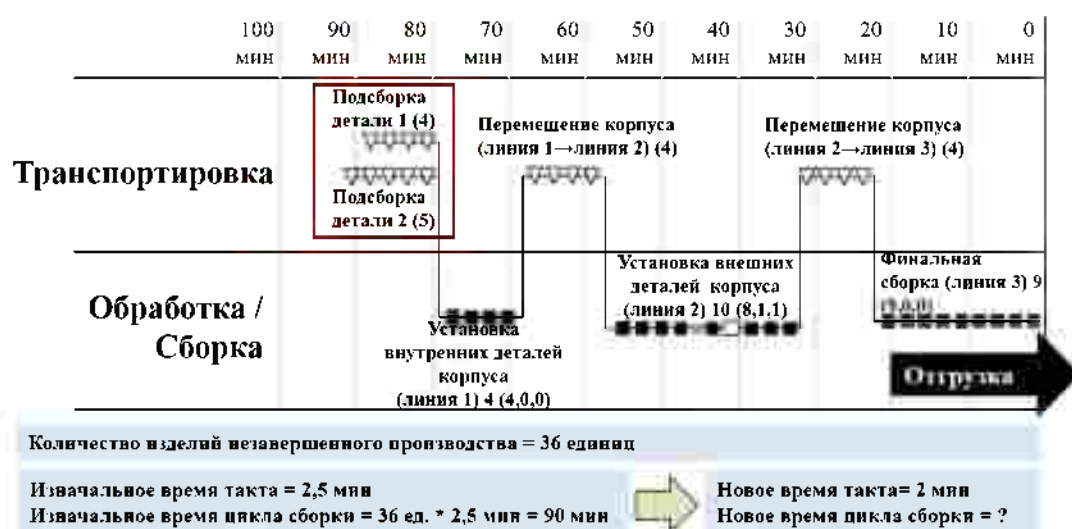


Рисунок 6 – Пример карты потока процесса до перехода на другое ВТ

Те участки, где нет операторов (перемещение или работа автоматического оборудования), считаются единым процессом перемещения, т.к. темп захода и выхода детали одинаковый.

Примем ВЦ оборудования неизменным, подразумевая, что оно уже работает на максимальной своей скорости.

Подборки деталей 1 и 2 осуществляются на автоматических конвейерах.

Время перемещения по линии подборки детали 1 состоит из двух отрезков времени: первый составляет 0,3 минуты, второй 2,9 минут. Соответственно, общее время перемещения составляет 3,2 минуты (время без обработки на автоматическом оборудовании).

Время цикла оборудования 1, 2 и 3 составляет 2,1 минуты, 1,8 минуты и 2,2 минуты соответственно, что в сумме равняется 6,1 минутам.

Общее время перемещения по автоматической линии подборки детали 1 составляет 9,3 минуты, то есть фиксированное количество деталей (незавершенной продукции) рассчитывается, как время на этой линии, разделенное на изначальное

время такта, то есть 2,5 минуты. В итоге получается, что фиксированный перемещаемый запас составляет 4 единицы.

Время перемещения по автоматической линии подборки детали 2 составляет 3 минуты, а время машинного цикла суммарно для оборудования 4 и 5 составляет 7,2 минуты. Таким образом, общее время перемещения по автоматической линии подборки детали 2 составляет 10,2 минуты, то есть фиксированное количество деталей рассчитывается, как время на этой линии, разделенное на изначальное ВТ, то есть 2,5 минуты. В итоге получается, что фиксированный перемещаемый запас составляет 5 единиц.

Необходимо пересчитать количество деталей, являющихся фиксированным перемещаемым запасом, для нового ВТ, составляющего две минуты.

Для автоматической линии подборки детали 1 фиксированный перемещаемый запас составит 5 единиц, а для автоматической подборки детали 2 он составит 6 единиц.

Сравнение карты потока процесса с учетом пересмотренных подборок деталей 1 и 2 представлено на рисунке 7.

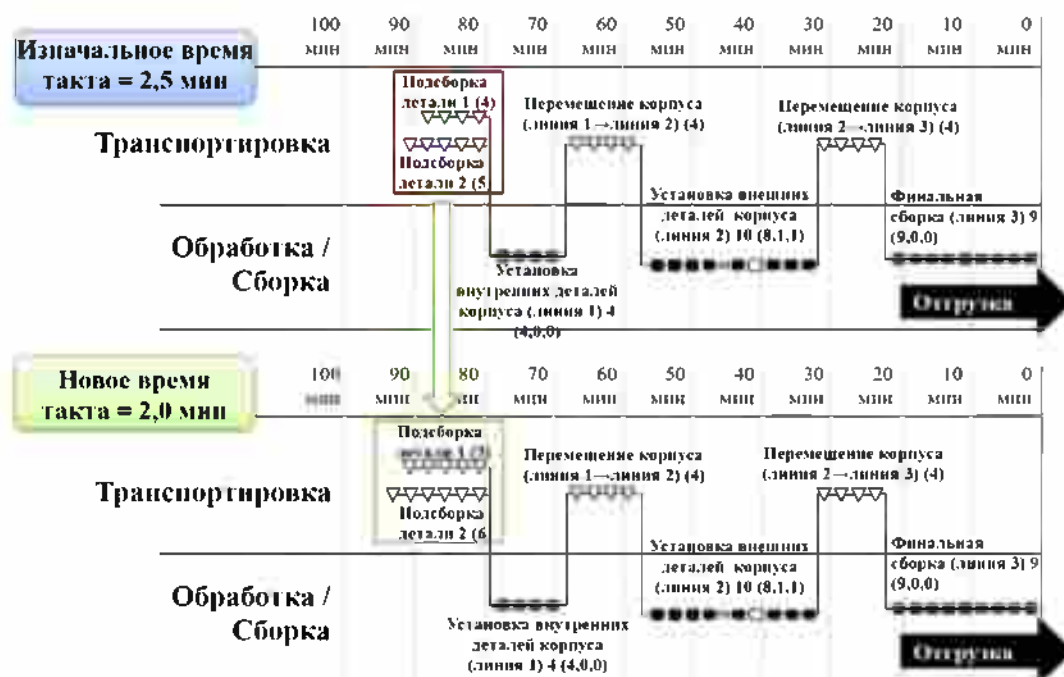


Рисунок 7 – Сравнение карты потока процесса с разным ВТ

Получается, что количество деталей в перемещаемом запасе на каждой из подборок увеличилось на 1 единицу. Таким же образом при изменении ВТ должна быть пересмотрена вся карта потока процесса, так как вероятно, что оборудование на других процессах обработки или перемещения может быть ускорено.

Картирование потока может осуществляться с применением разных методов, в частности, картирования потока создания ценности и картирования потока процесса. Указанные методы отличаются, как по содержанию, так и по применяемым графическим элементам/ символам. При составлении карты потока процесса проводится глубокий анализ всего производственного цикла, который позволяет выявить узкие места процессов и детально разобраться в потерях, возникающих во время производства продукции, с целью их устранения. Картирование потока может быть представлено в разных формах: таблично-графической или просто графической. Представленные примеры позволяют более детально понять суть методики картирования потока процесса, а также понять, какое место занимает этот инструмент при анализе производства.

#### Литература

- 1 Токмакова Т.В., Высоцкая В.И., Токмакова Е.Н., Маликов С.Б. Анализ особенностей методов APQP/PPAP для повышения качества наукоемкой продукции // СТИН. – 2022. – № 1. – С. 33-34.
- 2 ГОСТ Р 51814.6-2005 Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Менеджмент качества при планировании, разработке и подготовке производства автомобильных компонентов.
- 3 ГОСТ Р 56407-2015 «Бережливое производство. Основные методы и инструменты».
- 4 Ротер М., Шук Дж. Учитесь видеть бизнес-процессы. Практика построения карт потоков создания ценности. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. – 132 с.
- 5 Производственная система «Росатома». Пособие для самостоятельного изучения: Производственная система Росатома. Базовый курс. Режим доступа: [posobie\\_dlya\\_samostoyatel'nogo\\_izucheniya\\_proizvodstvennaya\\_sistema\\_rosatoma\\_bazovyj\\_kurs.pdf](#) (otrus.ru).
- 6 ГОСТ Р 56908-2016 «Бережливое производство. Стандартизация работы».
- 7 Скорнякова Е.А., Васюков В.М., Сулаберидзе В.Ш. Методы алгоритмизации планирования высокопроизводительного сборочного производства // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2018. – № 4(27). – С. 15-22.
- 8 ГОСТ Р 57524-2017 «Бережливое производство. Поток создания ценности».
- 9 Бельш К.В., Давыдова Н.С. Алгоритм составления карты потока создания ценности на промышленном предприятии // Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. – 2015. – Т. 25, № 1. – С. 7-13.
- 10 Панюков Д.И. Эффективное управление качеством проектирования новых производственных процессов на основе ISO/TS 16949 // World science. 2015. №3 (3). – С. 42-49.

Скорнякова Елизавета Алексеевна – кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: автоматизация производственных систем, реинжиниринг технологических процессов, управление изменениями производственных систем.

e-mail: elizavetasesina@mail.ru

Золотухин Кирилл Вячеславович – аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: автоматизация производственных систем, реинжиниринг технологических процессов, управление изменениями производственных систем.

e-mail: zoloto.kv@mail.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

#### ANALYSIS OF PROCESS FLOW MAPPING METHODOLOGY

Presented the comparison of process flow mapping methods and the key concepts of flow production within the framework of lean production based on state standards are considered. Described the method of building a product assembly process flow chart, as well as the results of changes in the number of work in progress when comparing the same process with different takt times are presented.

Key words: lean manufacturing; value stream; process flow chart; value stream map.

Skomiakova Elizaveta Alekseevna - PhD, Associate Professor of Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg.

Research interests: automation of production systems, process re-engineering, change management of production systems

e-mail: elizavetasesina@mail.ru

Zolotukhin Kirill Vyacheslavovich - Postgraduate student, assistant of Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg.

Research interests: automation of production systems, process re-engineering, change management of production systems

e-mail: zoloto.kv@mail.ru

УДК 621.372.8

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ВОЛНОВОДНОМ ТРАКТЕ

Довгопольный Н.П.

*Предложена методика определения неоднородностей в волноводном тракте по известной входной характеристике комплексного коэффициента отражения. Приведен пример ее применения.*

*Ключевые слова:* тракт, волновод, отражение, неоднородность, моделирование, дефект, монтаж.

Для контроля качества монтажа волноводного тракта обычно используют значения КСВ (коэффициента стоячей волны) в заданных точках рабочего диапазона частот. Однако современное развитие измерительной техники, в частности разработка векторных анализаторов цепей, дает возможность получить очень полезную информацию о распределении неоднородностей вдоль волноводного тракта. Это позволяет изменить подход к методике контроля качества монтажа. Также, знание мест расположения неоднородностей и оценка их величины может сильно облегчить устранение возможных дефектов монтажа.

На первый взгляд задача определения распределения неоднородностей по известной входной характеристике такая же, как и задача синтеза четырехполюсников СВЧ по известной входной характеристике. Однако, как известно, решение задач синтеза не является однозначным. Одна и та же входная характеристика может быть реализована как с применением только сосредоточенных элементов, так и с применением отрезков передающих линий. Это обстоятельство указывает на то, что при решении задач определения распределения неоднородностей в тракте, необходимо привлекать дополнительные ограничения, обусловленные конструкцией исследуемого тракта.

Будем считать, что тракт представляет собой однородный волновод с расположенными в нем случайным образом сосредоточенными неоднородностями.

Как показывает опыт, такая модель достаточно хорошо передает характеристики реальных волноводных трактов.

Для определения распределения неоднородностей в тракте, будем использовать методику, аналогичную методике, предложенной для направляющих неоднородных линий без дисперсии с плавно меняющимися параметрами [1]. Для таких линий выведена следующая формула первого приближения

$$G(j\omega) = \int_0^L N(x) e^{-i2\omega x/c} dx, \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота,  $G$  – входной коэффициент отражения,

$x$  – текущая координата,

$L$  – длина неоднородной линии,

$N(x) = \frac{1}{2} \frac{d \ln \rho(x)}{dx}$  – функция местных отражений,

$\rho(x)$  – волновое сопротивление,

$c$  – скорость света.



Формула (1) получена с учетом только однократных отражений. Ее физический смысл в том, что входной коэффициент тракта является векторной суммой коэффициентов элементарных отражений от отдельных участков тракта  $N(x)dx$  с учетом фазового запаздывания  $\omega x/c$  при распространении волны от отдельного участка до начала тракта.

Из формулы (1) следует, что для определения распределения неоднородностей вдоль тракта, описываемых собственными комплексными коэффициентами отражения  $N(x)$ , можно воспользоваться обратным преобразованием Фурье

$$N(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(k) e^{i2kx} dk \quad (2)$$

или

$$N(x) = \frac{2}{c} \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{i4\pi \frac{f}{c} x} df. \quad (2a)$$

Так, если в тракте есть только одна сосредоточенная единичная неоднородность  $N(x) = \delta(x - a)$ , расположенная на расстоянии  $a$  от начала тракта, то имеем

$$G(k) = e^{-i2ka} \quad (3)$$

и

$$N(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2k(x-a)} dk. \quad (4)$$

Пусть частотная характеристика входного комплексного коэффициента отражения тракта с единичной дискретной неоднородностью известна в диапазоне  $[k_2 - k_1]$  со средним волновым числом  $k_0 = 2\pi \frac{f_0}{c}$ , где  $f_0$  – средняя частота диапазона  $[f_2 - f_1]$ .

$$\begin{aligned} \text{Тогда оценка функции } N(x), \text{ а именно функция } \hat{g}(x) &= \frac{1}{\pi} \int_{k_1}^{k_2} e^{i2k(x-a)} dk = \\ &= \frac{\sin[(k_2 - k_1)(x-a)]}{\pi(x-a)} e^{i2k_0(x-a)} = \frac{2}{c} \int_{f_1}^{f_2} e^{i\frac{4\pi}{c} f(x-a)} df = \\ &= \frac{\sin[\frac{4\pi}{c}(f_2 - f_1)(x-a)]}{\pi(x-a)} e^{i4\pi \frac{f_0}{c}(x-a)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Максимум функции  $\hat{g}(x)$  совпадает с положением единичной неоднородности. Если умножить функцию  $\hat{g}(x)$  на  $\frac{c}{2(f_2 - f_1)}$  то получим нормированную функцию  $\hat{g}_n(x)$ , у которой  $|\hat{g}_n(a)| = 1$ .

Так как при наших предположениях, входной коэффициент отражения  $G(f)$  линейным образом зависит от коэффициентов местных отражений, то максимумы функции  $\hat{g}_n(x)$  определяемой формулой (6) определяют положение и величину неоднородностей

$$\hat{g}_n(x) = \frac{1}{(f_2 - f_1)} \cdot \int_{f_1}^{f_2} G(f) e^{i\frac{4\pi}{c} f x} df. \quad (6)$$

Для волноводных трактов, необходимо учесть наличие дисперсии (зависимость длины волны волновода от частоты. Это приводит к следующей модификации формулы (6)

$$Ge(x) = \left| \frac{1}{(f_2 - f_1)} \cdot \int_{f_1}^{f_2} G(f) e^{i\frac{4\pi}{c} f x \sqrt{1 - \left(\frac{c}{2a_v f}\right)^2}} df \right|, \quad (7)$$

где  $a_v$  – длина широкой стенки волновода,

$Ge(x)$  – распределение модуля собственного комплексного коэффициента отражения неоднородностей.

Для численного моделирования использования предлагаемой методики использовалась следующая модель волноводного тракта.

Волноводный тракт представляется в виде длинной линии с произвольно расположенными в ней реактивными неоднородностями, проводимость которых меняется случайным образом. Положение неоднородностей при моделировании подчинялось равномерному закону распределения. Проводимость неоднородностей, нормированная к волновому сопротивлению волновода, подчинялась нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma$ . Величина  $\sigma$  является средней амплитудой нормированных проводимостей неоднородностей тракта.

Далее, по формулам, приведенным в [2], рассчитывалась волновая матрица передачи  $T$  с помощью которой определялась частотная характеристика входного коэффициента отражения. При расчетах предполагалось, что в эксперименте используется идеальный векторный анализатор цепей, который не вносит дополнительных ошибок.

Приведем пример конкретного расчета. Пусть длина тракта равна 10 м, частотная характеристика известна в диапазоне от 2 до 4 ГГц, количество дискретных неоднородностей равно 3, дисперсия  $\sigma$  величин нормированных проводимостей тракта равна 0,3. Величины нормированных проводимостей и их положение, сгенерированные генераторами случайных чисел приведены в таблице 1. Расчетная частотная характеристика модуля входного коэффициента отражения  $G(f)$  для этого случая приведена на рисунке 1. В таблице 1 кроме входных данных приведена также и оценка модуля собственных коэффициентов отражения неоднородностей, полученная по предлагаемой методике. На рисунке 2 приведено восстановленное распределение неоднородностей в тракте. Из рисунка видно, что вследствие ограниченности используемого частотного диапазона, произошло размытие положения сосредоточенных неоднородностей.

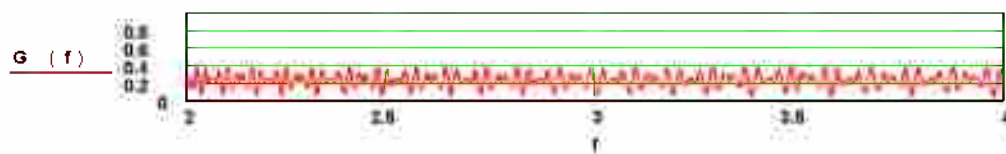


Рисунок 1 – Расчетная частотная характеристика входного коэффициента отражения  $G(f)$  тракта длиной 10 м с тремя неоднородностями для  $\sigma = 0,3$ . Частота  $f$  в ГГц

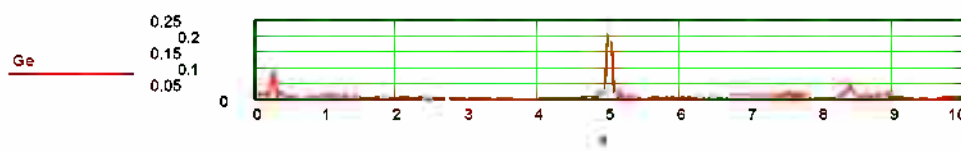


Рисунок 2 – Распределение неоднородностей в тракте, полученное по формуле (7),  $X$  – расстояние до начала тракта в метрах

Таблица 1 – Исходные данные и оценка модуля собственного коэффициента отражения неоднородностей.

| Положение неоднородностей в тракте $X_i$ в метрах | КСВ неоднородностей | Модуль собственного коэффициента отражения неоднородностей $\Gamma_i$ | Оценка модуля собственного коэффициента отражения неоднородностей $Ge_i$ |
|---|---------------------|---|--|
| $X_1 = 0.275$                                     | 1.221               | $\Gamma_1 = 0.1$  | 0.084  |
| $X_2 = 5.009$                                     | 1.567               | $\Gamma_2 = 0.221$  | 0.219  |
| $X_3 = 8.394$                                     | 1.17                | $\Gamma_3 = 0.078$  | 0.063  |

Выводы. Результаты моделирования показывают высокую информативность рассмотренной методики. Ее применение может быть использовано при оценке качества монтажа реальных волноводных трактов и полезно для устранения возможных дефектов монтажа.

#### Литература

1 Глебович Г.В., Андрианов А.В., Введенский Ю.В. и др. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. – М.: Радио и связь, 1984. – С.41.

2 Богуш В.А., Гусинский А.В., Шаров Г.А., Кострикин А.М. Векторные анализаторы цепей сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – С.54-55.

Довгопольный Николай Петрович – ведущий инженер, АО «Корпорация «Комета», г.Москва

Область научных интересов: антенно-фидерные устройства.

E-mail: dovgl949@mail.ru

Адрес: ул.Велозаводская, д.5, Москва, 115280.

#### DETERMINATION OF WAVEGUIDE DISCONTINUITIES DISTRIBUTION.

Method of determination of discontinuities in the waveguide tract according to the known characteristic of input complex reflection coefficient is proposed. An example of its use is given.

Keywords: tract, waveguide, reflection, discontinuity, simulation, defect, mounting.

Dovgopoly Nikolay Petrovich – leading engineer, Kometa Corporation JSC, Moscow

Area of scientific interests: antenna-feeder devices.

## СОЗДАНИЕ НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСА РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Гринь А.В., Николенко Б.Б., Славянский А.О.

*В данной работе рассматриваются принципы построения комплекса радиотехнического мониторинга наземного базирования, работающего в широком диапазоне длин волн от 1 см до 1 м, а также рассмотрены вопросы влияния параметров антенной системы и приемного тракта на основные характеристики системы радиоэлектронного наблюдения. В материалах приводится оценка влияния параметров антенной системы на итоговую погрешность пеленга системы с учетом возможных фазовых и частотных искажений, с целью обеспечения итогового значения ошибки пеленга, не превышающего нескольких градусов для всего диапазона длин волн. описан способ организации технологических процессов обработки информации.*

*Ключевые слова:* радиотехнический мониторинг, антенно-фидерная система, фазокорреляционный метод пеленгации, технологический процесс.

### Введение

Радиотехнический мониторинг широко применяется в исследовании поверхности земли, атмосферных процессов и геологических срезов, что помогает решать задачи в различных областях науки [1]. Большинство подобных систем обладают более узким частотным диапазоном, при этом не обеспечивают требуемую погрешность определения пеленга. Существующие решения, такие как антенная система R&S®ADD153SR, которая имеет рабочий диапазон частот от 20 МГц до 1,3 ГГц, обеспечивают погрешность определения пеленга не более 1°. Антенная система R&S®ADD078SR имеет рабочий диапазон частот от 1,3 ГГц до 6 ГГц и погрешность определения пеленга не более 2° [2]. Исследуемое устройство должно обеспечивать точность определения пеленга до нескольких градусов во всем рабочем диапазоне частот, поэтому требуется оценить влияние параметров антенной системы на уровни точности и чувствительности исследуемого пеленгатора, провести оценку достижимости заявленных характеристик создаваемого комплекса. Для оценки влияния параметров антенной системы на итоговую погрешность пеленга необходимо произвести моделирование работы предложенной конфигурации антенной системы с учетом возможных фазовых и частотных искажений и определить максимальные значения этих флуктуаций, при которых итоговое значение ошибки пеленга не превышала бы заявленного.

Чувствительность устройства, помимо параметров антенной системы, зависит от уровня потерь, вносимых приемным трактом, чувствительности приёмника, а также уровня усиления сигнала. На основе данных параметров можно определить минимальный допустимый уровень коэффициента усиления каждой из антенных систем.

## 1 Обоснование метода пеленгации

По своему типу методы пеленгации сигнала разделяются на три основные группы: амплитудный, разностно-дальномерный (РДМ) и фазовый. Каждый из указанных методов имеет свои требования к антенной системе и приемному тракту.

Во всех трех методах измеряют различия в сигналах, принимаемых двумя или более разнесенными антеннами. Степень точности РДМ зависит от расстояния между антеннами [4]. В методе сравнения амплитуд используются две направленные в разные стороны антенны так, что соотношение коэффициентов усиления для двух антенн будет уникальным для каждого угла в зоне обзора [5]. Данный метод также имеет ряд недостатков, таких как низкая точность измерения и требование к сверхточному замеру амплитуд в широком диапазоне частот.

Фазовая интерферометрия является методом, используемым в создаваемом комплексе. Этот метод, как и РДМ, основан на определении временной задержки прихода сигнала между двумя или более антеннами. В отличие от разницы во времени, разность фаз может быть точно измерена на коротких расстояниях (при малой базе между антеннами относительно длины волны). Существует несколько методов фазовой пеленгации, такие как метод максимального правдоподобия и корреляционный метод.

Метод максимального правдоподобия позволяет получить высокую точность определения направления сигнала, однако она определяется размером самой большой базы. Указанный метод не подходит, так как для увеличения дальности работы системы, как правило, необходимо предусмотреть возможность поднятия системы на высоту, что подразумевает жесткие требования к уменьшению массогабаритных параметров антенной системы.

Фазокорреляционный метод в свою очередь позволяет увеличивать точность в широкой полосе частот за счет увеличения количества антенн, не требуя при этом увеличения размера наибольшей базы. При оптимальном выборе расположения антенн и подборе компонентов приемного тракта этот метод обеспечивает требуемую точность, чувствительность и зону обзора.

## 2 Описание исследуемого комплекса

Комплекс радиотехнического мониторинга предназначен для обнаружения, распознавания и определения направления на источники радиоизлучения, определения их характеристик и выдачи информации о них на вычислительный комплекс.

В состав предлагается включить:

антенно-фидерную систему (АФС), содержащую приемо-пеленгационный комплекс (ППК) и антенно-фидерное устройство (АФУ);

- устройства усиления и коммутации сигналов;
- устройства цифровой обработки и регистрации сигналов;
- управляющую ЭВМ со специальным программным обеспечением;
- источники вторичного электропитания.

Антенно-фидерная система предназначена для приема электромагнитных излучений и передачи их на входы радиоприемных устройств систем поиска и пеленгования сигналов. Для реализации пеленгатора необходимо обеспечить прием и обработку сигналов в широкой полосе частот. Для этого были выбраны две группы

антенн: дипольного типа для частот в  $P$ - $L$  диапазонах и спиральные комбинированного типа для диапазонов  $S$ - $X$ . Данное решение было принято вследствие того, что предлагаемые антенны дипольного типа, несмотря на узкую рабочую полосу и низкий уровень КУ, позволяют при относительно небольших собственных размерах принимать сигналы с длиной волны многократно больше размера антенны. Спиральные антенны в свою очередь, хоть и имеют широкую рабочую полосу, применяются на более высоких частотах.

Входной сигнал с каждого из восьми приемных канала оцифровывается двумя приемными модулями. Оцифрованный в каждом канале сигнал в 16-битной форме подается на вход программного блока обработки и непрерывного, и импульсного сигналов параллельно. В программном блоке обработки непрерывного сигнала, реализованном на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) осуществляется дискретное преобразование Фурье в заданной полосе промежуточной частоты. После чего определяется несущая частота сигнала с учетом частоты переноса, а также радиотехнические параметры сигнала и фазовый сдвиг в каждом из каналов обработки.

### 3 Исследование влияния параметров антенной системы на погрешность определения пеленга

Для исследования влияния вносимых фазовых и частотных искажений в декартовой системе координат задаются положения каждого из  $N$  элементов антенной системы, выбирается опорная антенна и частоты, на которых проводится эксперимент.

Сам алгоритм моделирования заключается в измерении всех  $\varphi_i(\theta, \beta, \lambda)$ , где  $i = 1..N$ ,  $\theta$  – угол в азимутальной плоскости,  $\beta$  – угол в угломестной плоскости, и вычисления на их основе разности фаз  $\Delta\varphi$ , относительно опорной антенны. Далее происходит вычисление корреляционной суммы  $I$  для принятого сигнала, при котором используется значение длины волны из перечня тестовых, наиболее близкое к длине волны пеленгуемого сигнала. Корреляционная сумма определяется по формуле

$$I(\theta, \beta, \lambda) = \frac{2}{N(N-1)} [(\sum_{i=1}^N \cos\delta_i)^2 + (\sum_{i=1}^N \sin\delta_i)^2]. \quad (1)$$

Значение  $\delta_i$  определяется как разность между значением  $\Delta\varphi$ , измеренным при приеме пеленгуемого сигнала и значением  $\Delta\varphi$  из таблицы, определенной ранее при калибровке системы.

В качестве оценки пеленга ИРИ выбираются  $\theta$  и  $\beta$ , при которых корреляционная сумма достигает своего минимума.

Фазовый сдвиг определяется на основе разностей расстояний от источника излучения до опорной ( $R_{\text{опор}}$ ) и  $i$ -ой ( $R$ ) антенн в системе. Для учета фазовых искажений к значению сдвига и частоты пеленгуемого сигнала добавляется случайная величина  $\varepsilon$  с соответствующей дисперсией

$$\Delta\varphi_i = 2\pi * \frac{R - R_{\text{опор}}}{\lambda} + \varepsilon. \quad (2)$$

Частотные искажения учитываются при определении частоты пеленгуемого сигнала за счет добавления к ней случайной величины.

Как упоминалось ранее, в устройстве используются две антенных системы для двух разных диапазонов. Первая из них антенно-фидерное устройство, состоящее из

восьми антенн дипольного типа, размещенных на двух дисках по четыре на каждом.

Для работы диполей в качестве антенной системы для фазовой пеленгации необходимо выбрать оптимальное расстояние между ними. Расстояние между антеннами не должно превышать двух метров, так как необходимо предусмотреть возможность поднятия антенной системы на высоту для обеспечения дальности радиовидимости.

Для оценки максимально допустимых фазовых искажений проведем моделирование по описанному ранее алгоритму. Применительно к пеленгатору заявлены требования к зоне обзора в различных плоскостях, на основе этих требований определены диапазоны углов направления источника радионизлучения, для азимутальной плоскости от 0 до 360° при постоянном направлении в угломестной плоскости 32°, для угломестной от 0 до 90° при постоянном направлении в азимутальной плоскости 45°.

По результатам моделирования были определены зависимости погрешности определения пеленга от уровня фазовых неоднородностей и определены предельно допустимые фазовые неоднородности для исследуемых антенн.

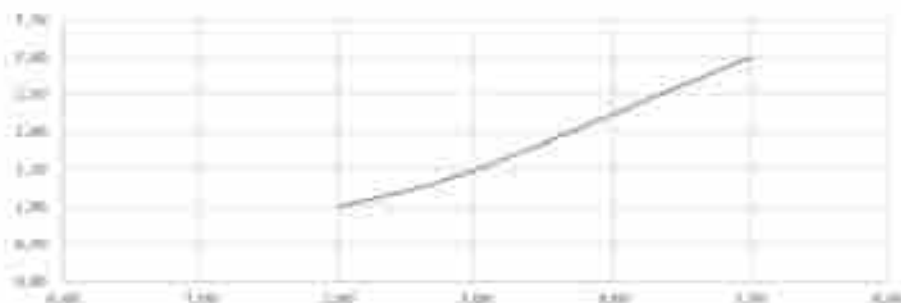


Рисунок 1 – Зависимость ошибки определения пеленга от фазовых неоднородностей в азимутальной плоскости для АФУ на частоте 200 МГц

Вторая антенная система, приемо-пеленгационный комплекс, состоит из 35 комбинированных объемных спиральных антенн, расположенных по семь штук на пяти гранях усеченной прямоугольной пирамиды. На рисунке 2 изображена схема размещения антенн на поверхностях ПШК. Применение комбинированных объемных спиральных антенн обеспечивает широкий диапазон частот, однако не обеспечивает равномерные ДН в азимутальной плоскости, чем и обусловлена представленная конфигурация. Благодаря наличию пяти граней, каждая из них может обеспечивать обзор в 90 градусов в азимутальной плоскости и до нескольких десятков градусов в угломестной.

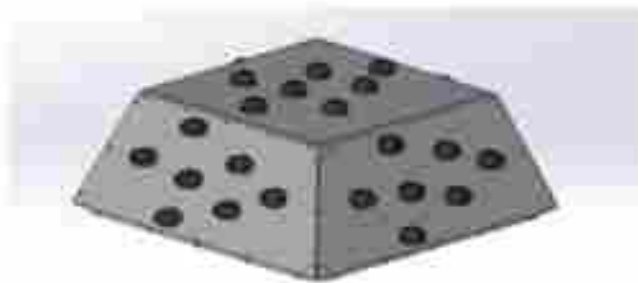


Рисунок 2 – Схема размещения антенн в системе ПШК

На рисунках 3 и 4 приведены зависимость ошибки определения пеленга от фазовых неоднородностей в азимутальной и угломестной плоскостях при различных уровнях фазовой неоднозначности. Моделирование проводилось для одной грани усеченной пирамиды.

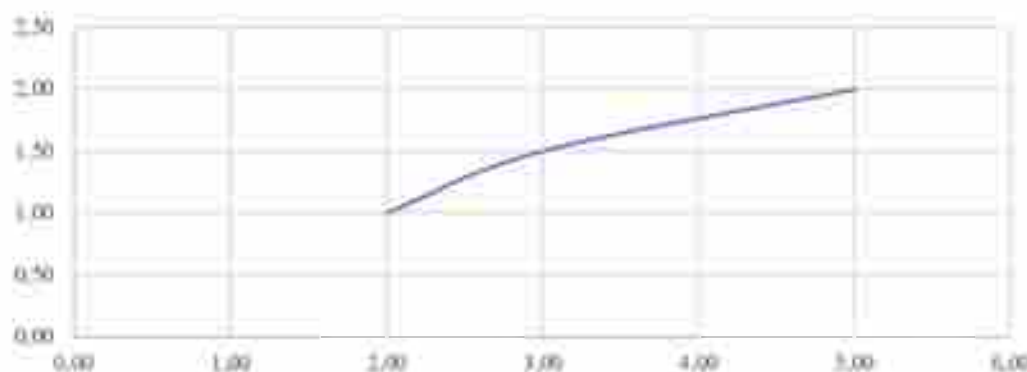


Рисунок 3 – Зависимость ошибки определения пеленга от фазовых неоднородностей в азимутальной плоскости для ПШК на частоте 2 ГГц

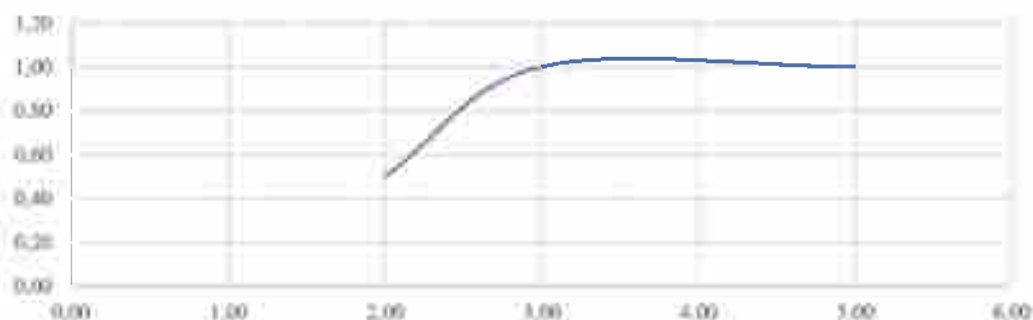


Рисунок 4 – Зависимость ошибки определения пеленга от фазовых неоднородностей в угломестной плоскости для ПШК на частоте 2 ГГц

#### 4 Организация автоматизированного технологического процесса обработки получаемых данных

Постоянное развитие методов и алгоритмов обработки информации РЭН, совершенствование способов определения координат источников РЭС, определения параметров сигналов РЭС ведут к необходимости обеспечения возможности постоянной отработки, совершенствования и обновления программного обеспечения обработки и анализа информации.

В зависимости от поставленных задач и применяемых принципов могут быть разработаны отдельные программные компоненты, с участием которых будут выстроены технологические процессы сбора, обработки и анализа информации наземного комплекса радиотехнического мониторинга.

Для повышения достоверности и правильности определения параметров сигналов определенных РЭС используемые алгоритмы могут быть скорректированы и дополнены, что приведет к изменению применяемых программных компонентов и технологических процессов обработки информации. С целью повышения автоматизации и эффективности применения наземного комплекса радиотехнического мони-



торинга программные средства обработки и анализа информации целесообразно разделить на множество самостоятельных программных компонентов, каждый из которых реализует определенный алгоритм обработки информации или его часть. Технологический процесс обработки информации в таком случае будет представлять собой совокупность операций, выполняемых четко определенными программными компонентами, осуществляемых в заданной последовательности. Кроме этого, технологический процесс включает в себя задачи по передаче информации между задействованными программными компонентами.

С целью обеспечения гибкости и расширяемости наземного комплекса радиотехнического мониторинга в его состав целесообразно включить адаптируемое специальное программное обеспечение организации и автоматизации технологических процессов по предлагаемому принципу, включающее в свой состав редактор технологических процессов. На рисунке 5 изображена схема взаимодействия специального программного обеспечения организации и автоматизации технологических процессов с программными компонентами обработки информации.

Предлагаемое специальное программное обеспечение и программные компоненты обработки и анализа информации размещаются на управляющей ЭВМ.



Рисунок 5 – Схема взаимодействия специального программного обеспечения организации и автоматизации технологических процессов с программными компонентами обработки информации

### Заключение

В данной работе описаны вопросы создания наземного комплекса радиотехнического мониторинга в широком диапазоне длин волн и процесс организации автоматизированного технологического процесса обработки получаемых данных.

Для определения требований к антенной системе было проведено исследование влияния фазовых флуктуаций на работу системы пеленгации. Для антенно-фидерного устройства уровень фазовых флуктуаций не должен превышать  $3^\circ$  в азимутальной плоскости и  $0,5^\circ$  в угломестной, для приемно-пеленгационного комплекса не более  $2^\circ$  в азимутальной и  $5^\circ$  в угломестной плоскостях для обеспечения точ-

ности определения направления на источник в несколько градусов во всем диапазоне рабочих частот.

По итогам исследования следует сделать выводы о возможности создания наземного комплекса радиотехнического мониторинга с выбранной конфигурацией антенн, позволяющей обеспечить заданную чувствительность системы и погрешность определения пеленга не более нескольких градусов в диапазоне длин волн от единиц до сотен сантиметров, а также целесообразность применения специального программного обеспечения организации и автоматизации технологических процессов обработки и анализа информации радиотехнического мониторинга.

#### Литература

1 Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы и средства. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2006. – 492 с.

2 R&S® ADDx MULTICHANNEL DF ANTENNAS Product overview / Rohde&Schwarz. – URL: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/ADDx-multichannel\\_bro\\_en\\_0758-1106-12\\_v1200.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ADDx-multichannel_bro_en_0758-1106-12_v1200.pdf) (дата обращения: 16.04.2023).

3 Денисов В.П., Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы. – Изд-во ТУСУРа, Томск, 2002 – 252 с.

4 Верба В.С. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – 2010. – 680 с.

Гринь Александр Владимирович – аспирант, РТУ МИРЭА, г. Москва.

Область научных интересов: методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации.

Email: [grin.alex7@yandex.ru](mailto:grin.alex7@yandex.ru)

Николенко Борис Борисович – начальник отдела, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И.Берга», г. Москва.

Область научных интересов: автоматизированные системы управления, системы организации технологических процессов, наземные комплексы обработки информации, системы диспетчеризации.

Email: [nikolenkob@gmail.com](mailto:nikolenkob@gmail.com)

Славянский Андрей Олегович – начальник отдела, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И.Берга», г. Москва.

Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, радиотехнические комплексы пассивной и активной локации, бортовая аппаратура обработки и управления.

Email: [andrey.slavyanskiy@gmail.com](mailto:andrey.slavyanskiy@gmail.com)

Адрес: ул. Новая Басманная, 20 стр.9, Москва, 107078.

---

**CREATION OF A GROUND COMPLEX RADIO TECHNICAL MONITORING**

This paper discusses the principles of constructing a ground-based radio monitoring complex operating in a wide range of wavelengths from 1 cm to 1 m, and also considers the influence of the parameters of the antenna system and receiving path on the main characteristics of the radio-electronic surveillance system. The materials provide an assessment of the influence of the antenna system parameters on the final system bearing error, taking into account possible phase and frequency distortions, in order to ensure the final value of the bearing error not exceeding several degrees for the entire wavelength range, and describes a method for organizing information processing technological processes.

**Key words:** radio engineering monitoring, antenna-feeder system, phase correlation method of direction finding, technological process.

**Grin Aleksandr Vladimirovich** – graduate student, RTU MIREA, Moscow.

**Research interests:** methods of system analysis, optimization, management, decision making, information processing.

**Nikolenko Boris Borisovich** – head of the department, JSC "TSNIRTI named after Academician A.I. Berg", Moscow.

**Research interests:** automated control systems, systems for organizing technological processes, ground-based information processing complexes, dispatching systems.

**Slavyanskiy Andrey Olegovich** – head of the department, JSC "TSNIRTI named after Academician A.I. Berg", Moscow.

**Research interests:** digital signal processing, radio engineering complexes of passive and active location, on-board processing and control equipment.

## СПОСОБ СОГЛАСОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Максимкин М.А., Климова С.А., Евтушенко А.С., Волков А.В.

*В данной работе представлен способ увеличения быстродействия обработки сигналов сверхвысоких частот путём согласования кристаллов акустооптических ячеек широкополосных пьезопреобразователей. Показано практическое решение согласования кристаллов с помощью расчетного моделирования оптимального значения импеданса, удовлетворяющего требованиям при создании широкополосного преобразователя. Рассмотрены технологические толщины акустических связующих слоев, обеспечивающих импеданс и частотные характеристики широкополосного преобразователя.*

*Ключевые слова:* акустооптическая ячейка; акустический импеданс; широкополосный преобразователь; быстродействие; связующие акустические слои, диаграмма Вольперта-Смита.

### Введение

В настоящее время интерес к акустооптическим устройствам связан с возможностью параллельной обработки информации в реальном масштабе времени, высоким быстродействием, малыми габаритными размерами и массой, а также незначительной потребляемой мощностью и низкой стоимостью данных оптических устройств. Направление акустооптики активно развивается в части создания акустооптических устройств для обработки информации, например, акустооптических процессоров, которые применяются для спектрального анализа радиосигналов, вычисления функций корреляции и свертки, голографической записи сигналов [1-2].

Ключевым элементом при создании любого акустооптического устройства является акустооптическая ячейка (АОЯ). Принцип действия АОЯ основан на дифракции света в оптически прозрачном материале (кристалле) на бегущей ультразвуковой волне, создаваемой пьезоэлектрическим преобразователем, который присоединён к кристаллу. Благодаря появлению участков сжатия и растяжения, возникающих в кристалле и различающихся показателем преломления, в среде формируется дифракционная решётка. Световой пучок, дифрагируя на решётке, образует несколько выходных пучков (дифракционных порядков), разнесённых в пространстве под равными углами относительно друг друга. При помощи апертурной диафрагмы из всех выходных лучей выделяется максимум первого порядка, который существует только при наличии звуковой волны в АОЯ, а остальные максимумы блокируются [3].

Таким образом, оптическая система акустооптических устройств в большинстве случаев представляет собой специализированный процессор для выполнения одно-, двумерного преобразований Фурье и вычисления корреляционных функций. Акустическая часть устройства направлена на создание динамической дифракционной решётки, которая за микросекунды позволяет перестраивать оптические параметры сигналов для управления характеристиками всего устройства в реальном времени. Такие системы высокоэффективны за счёт возможности разработки сложных дифракционных решёток [3].

Быстродействие акустооптического устройства ограничивалось полнотой передачи акустической энергии пьезопреобразователя в оптический кристалл АОЯ из-за рассогласования импедансов их материалов. К современным материалам АОЯ относятся монокристаллы ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), в качестве пьезопреобразователя, и парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ) – оптического кристалла, который обладает большой величиной акустооптического качества, прозрачностью в широком диапазоне длин волн света ( $0,35 \div 5,05$  мкм) [5]. Известно [5], что акустический импеданс  $\text{LiNbO}_3$  составляет  $21 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ , а для сдвиговых волн  $\text{TeO}_2$  –  $3,6 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ . Очевидно, что шестикратное различие акустических импедансов без их согласования не может обеспечить широкополосность преобразователя. Классическое решение проблемы заключается в использовании четвертьволнового промежуточного слоя с импедансом в  $9,3 \cdot 10^5 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$  [6]. Данная работа демонстрирует решение проблемы быстродействия широкополосных пьезопреобразователей путём практической отработки технологического режима согласования кристаллов АОЯ.

### 1 Технологии согласования кристаллов акустооптической ячейки

Технология согласования пьезопреобразователя с оптическим кристаллом имеет решающее значение при создании акустооптического устройства. В работе [6] для согласования двух импедансов кристаллов  $\text{TeO}_2$  и  $\text{LiNbO}_3$  разработаны и теоретически рассчитаны толщины акустических связующих слоёв на основе золота (Au) и индия (In). Расчетное моделирование на основе круглой диаграммы Вольперта-Смита для согласования кристаллов с широкой полосой пропускания помогло определить суммарный импеданс металлических связующих слоёв, который находится в пределе между  $4 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$  и  $20 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ .

Толщина напыляемого слоя индия методом термического напыления в вакууме на поверхности кристаллов выше 1 мкм при диффузионной сварке  $\text{LiNbO}_3$  с  $\text{TeO}_2$ , имеющего на поверхности подслоя Au, нанесённого магнетронным распылением, приводит к «непровару», вследствие чего АОЯ непригодна для дальнейшей эксплуатации в акустооптических приборах, что проявляется в нестабильности работы и некорректном отображении показаний. Поэтому для напыления слоя индия определены три оптимальных значения толщины в 0,5 мкм, 0,75 мкм и 1,0 мкм.

Скорость магнетронного распыления золота из-за достаточно большой его плотности  $19,32 \text{ г}/\text{см}^3$  составляет около 1 мкм/с, поэтому толщина плёнки золота слабо зависит от массы его заготовки, но сильно зависит от времени распыления, которое было экспериментально определено. С другой стороны, толщина слоя индия сильно зависит от массы его заготовки, поэтому было изготовлено несколько образцов с разной массой заготовки индия и определена зависимость времени распыления от толщины напыляемого слоя.

В результате контроля сварного слоя акустооптические ячейки с толщиной подслоя золота 0,2 мкм и слоя индия 0,75 мкм с помощью прибора измерения комплексных коэффициентов и передачи Р4-11 определены оптимальные технологические параметры изготовления акустооптической ячейки с качественным сварным соединением при достижении акустического импеданса  $9,3 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ , что позволяет расширить полосу пропускания акустооптического модулятора до 53 МГц. В настоящее время существуют акустооптические модуляторы с полосой пропускания 40-42 МГц [5].

По результатам работы были подсчитаны экономические показатели изготовления акустооптической ячейки. Стоимость акустооптического устройства за рубежом варьируется от 2500 до 4000\$. Рыночная цена акустооптических устройств российского производства ниже на 20% по сравнению с иностранными аналогами и варьируется от 150 до 250 тыс. руб. Затраты на закупку материалов для изготовления одной АОЯ приведены в таблице 1, а время изготовления – в таблице 2.

Таблица 1 – Затраты на закупку материалы для изготовления одной АОЯ

| Наименование материала                           | Кол-во | Цена за шт./гр. (руб.) | Итого (руб.) |
|--|--------|------------------------|--------------|
| Пластина пьезопреобразователя LiNbO <sub>3</sub> | 1      | 2530                   | 2530         |
| Акустооптический кристалл TeO <sub>2</sub>       | 1      | 30000                  | 30000        |
| Золото   | 0,35   | 4000                   | 1400         |
| Индий  | 0,275  | 180                    | 50           |
| Итоговая стоимость материала                     |        |                        | 33980        |

Таблица 2 – Время на изготовление одной АОЯ

| Операция изготовления       | Время подготовительных операций (мин) | Время на исполнение операции (мин) | Время выдержки (мин) |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| Напыление золота            | 30                                    | 0,5                                | 120                  |
| Сварка                      | 80                                    | 7                                  | 480                  |
| Шлифовка                    | 40                                    | 480                                | 0                    |
| Проверка                    | 5                                     | 10                                 | 20                   |
| Итоговое время изготовления |                                       |                                    | 1273                 |

Из данных таблицы 2 следует, что полный цикл изготовления АОЯ составляет 21 час, а время, затраченное рабочими на изготовление одной АОЯ, - 8 часов 30 минут. Следовательно, по проведенным расчетам видно, что производство акустооптических ячеек является мало затратным с невысокой стоимостью материалов.

Полученные акустооптические ячейки можно использовать при создании дефлекторов, предназначенных для работы в системах оптической обработки радиосигналов, например, в радиочастотных анализаторах спектра, для преобразования частоты радиосигнала в угол отклонения лазерного пучка. Так же данные устройства можно использовать при создании мощных телескопов. Акустооптические ячейки могут служить основными элементами для создания систем считывания и воспроизведения трехмерного видео.

### Заключение

В работе определено оптимальное значение импеданса, необходимого для согласования акустооптического кристалла из парателлурита (TeO<sub>2</sub>) и пьезопреобразователя из ниобата лития (LiNbO<sub>3</sub>), который путём теоретического расчёта с использованием диаграмм Вольперта-Смита равен 9 г/(с см<sup>2</sup>). Показано, что для достижения оптимального значения импеданса согласующихся кристаллов необходимо использовать подслои золота на контактных поверхностях акустооптического кри-

сталла, а также сварочный слой индия на поверхностях обоих кристаллов. Определены оптимальные технологические параметры для нанесения подслоя золота, а также диффузионной сварки слоев индия в вакууме на согласующихся поверхностях акустооптического кристалла и пьезопреобразователя. Оптимальные значения толщины подслоя золота и слоя индия, необходимых для акустооптического согласования кристаллов и достижения оптимального импеданса  $9 \text{ г/(с}\cdot\text{см}^2)$ , составили для подслоя золота 0,3 мкм; 0,2 мкм; 0,1 мкм, а для слоя индия - 0,5 мкм; 0,75 мкм; 1,0 мкм, соответственно. Таким образом, пьезопреобразователь, согласованный с оптическим кристаллом определяет максимальную эффективность, широкополосность, быстроедействие и стабильность акустооптического устройства.

#### Литература

- 1 Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. – М.: Советское радио, 1978.
- 2 Вовк Ю.К., Сапожников В.К., Щелопут Д.В. и др. Голографическая запись двоичной информации с помощью многоканальных акустооптических модуляторов света // Автометрия. – 1979. – С. 53-60.
- 3 Васильева Л.М., Гусев О.Б., Клуздин В.В. и др. Многоканальный акустооптический модулятор // Оптико-механическая промышленность. – 1981. – № 5. – С.24-27.
- 4 Пожар В.Э., Пустовойт В.И. О сжатии ультракоротких импульсов света // Квантовая электроника. – 1987. – Т. 14, № 4. – С. 811-813.
- 5 Liu Y., Li H., Liu J., Tan S., Lu Q., Guo W. Low  $V\pi$  of thin-film of lithium niobate modulator fabricated with photolithography // Optics Express. 2021. V. 29, No. 1.
- 6 Максимкин М.А. Формирование связующих акустических слоев при создании широкополосных пьезопреобразователей для акустооптических устройств // Метрология в XXI веке. Материалы VIII НПК молодых учёных, аспирантов и специалистов. 2020. – С. 219-225.

Максимкин Михаил Александрович – аспирант, АО «ЦНИРТИ имени А.И.Берга», г.Москва.

Область научных интересов: радиотехника, акустооптика, согласование акустооптических кристаллов.

E-mail: mma777@mail.ru

Климова Светлана Александровна – кандидат физ.-мат. наук, доцент, АО «ЦНИРТИ имени А.И.Берга», г.Москва.

Область научных интересов: радиотехника, разработка новых материалов для электроники, полупроводниковая электроника.

E-mail: klimsvalek@mail.ru

Евтушенко Андрей Сергеевич – аспирант, АО «ЦНИРТИ имени А.И.Берга», г.Москва.

Область научных интересов: разработка принципиальных схем, проектирование радиотехнических приборов, разработка оптических приборов.

E-mail: evtushenkoas971@mail.ru

Волков Андрей Валентинович – кандидат технических наук, АО «ЦНИРТИ имени А.И.Берга», г.Москва.

Область научных интересов: современные методы конструирования и технологии производства радиоэлектронной аппаратуры, разработка новых материалов для электроники.

E-mail: vol.1@mail.ru

Почтовый адрес: 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр.9.

#### METHOD OF THE MATCHING CRYSTALS OF ACOUSTO-OPTIC CELLS OF BROADBAND PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS

The method for increasing the high-speed performance of signals by the matching crystals of acousto-optic cells of broadband piezoelectric transducers has presented. A practical solution for matching crystals using computational simulation of the optimal impedance value that agreements of the requirements for creating the broadband transducers have shown. The technological thicknesses of acoustic binding layers providing the impedance and frequency characteristics of a broadband transducer have considered.

Key words: acousto-optic cell; acoustic impedance; broadband transducers; high-speed performance; bonding acoustic layers; Wolpert-Smith diagram.

Maksimkin Mikhail Aleksandrovich – graduate student, JSC “CNIRTI”, Moscow.

Area of scientific interests: radio engineering, acousto-optics, matching of acousto-optical crystals.

Klimova Svetlana Aleksandrovna – candidate of physics and mathematics sciences, associate Professor, JSC "CNRTI ", Moscow.

Area of scientific interests: radio engineering, development of new materials for electronics, semiconductor electronics.

Evtushenko Andrey Sergeevich – graduate student, JSC “CNIRTI”, Moscow.

Area of scientific interests: development of circuit diagrams, design of radio engineering devices, development of optical devices.

Andrey Valentinovich Volkov – candidate of technical sciences, JSC “CNIRTI”, Moscow.

Area of scientific interests: modern methods of design and production technologies of radio-electronic equipment, development of new materials for electronics.



## СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЖИГА

Шведов А.С., Климова С.А., Самылкин Д.В., Волков А.В.

*В работе показана возможность изготовления миниатюрного приёмно-передающего модуля путём применения низкотемпературной керамики многослойной платы. Приведены особенности изготовления изделий по данному методу, а также некоторые разработки в области создания пассивной электронно-компонентной базы в объёме многослойной платы. Определены перспективные направления использования данного метода при проектировании электронных изделий.*

*Ключевые слова:* многослойные керамические платы; метод низкотемпературного обжига керамики; LTCC; миниатюризация; модуль сверхвысоких частот; 3D-упаковка; электронная компонентная база

### Введение

Развитие области создания приёмно-передающих устройств для мобильного, как бортового, так и наземного применения привело к повышению требований к массогабаритным характеристикам и стабильности электрических параметров изделий. В настоящее время в области конструирования и создания радиоэлектронных устройств наблюдается тенденция к [1]:

- миниатюризации за счёт облегчённых композитных материалов;
- модернизации отвода тепла от высокопроизводительных электронных устройств и их составных частей, изготавливаемой, в основном, за рубежом;
- повышению быстродействия изделий, благодаря увеличению объёма интегрированных компонентов на квадратный сантиметр.

Важнейшими элементами приёмно-передающего модуля (ППМ) являются многослойные керамические платы (МКП). На данный момент такие керамические платы реализуются в современных Bluetooth-модулях мобильных устройств, как альтернативный канал передачи данных. Методы и технологии изготовления таких плат показал, что применение технологии изготовления низкотемпературной керамики на основе метода низкотемпературного совместного обжига (метод НТО, англ. – Low Temperature Co-fired Ceramics (LTCC)) является перспективным для миниатюризации и интеграции большего количества и типов пассивных элементов электронно-компонентной базы (ЭКБ) в слоях керамических плат [2-4]. Преимущества данного способа изготовления керамических плат состоят в следующем [5-6]:

- высокие технические показатели и надёжность монолитной структуры: высокая добротность и низкие диэлектрические потери на сверхвысоких частотах (СВЧ), контролируемый импеданс цепей, стабильность к внешним воздействиям - высокая прочность (до 250 МПа) и теплопроводность (до 4 Вт/м·К), относительно печатных плат; значения коэффициента температурного расширения (КТР) близки к значениям КТР основных полупроводниковых материалов, используемых, напри-

мер, в гибридной интегральной схеме (ГИС).

- компактные размеры и прочность конструкции – возможность интеграции пассивных компонентов в объём керамической платы и объёмный дизайн цепей (ВЧ/СВЧ модули и коммутационные трёхмерные платы).

- высокая повторяемость технологических параметров.
- расширенный диапазон рабочих температур и механических нагрузок.
- быстрая разработка прототипа платы и функционального узла.
- низкая себестоимость продукции.

Благодаря таким свойствам МКП по методу НТО получили широкое применение в качестве основы конструкции СВЧ-схем, НЧ-микросхем и различных ГИС [7].

В тоже время существуют проблемы разработки, проектирования и производства низкотемпературной керамики в России. Во-первых, в связи с введением санкционных ограничений существенно возросли риски отказа поставок импортных систем, таких как *Dupont*, *Ferro* и другие, для производства изделий по методу НТО [8]. Поэтому возрос спрос на разработку изделий на основе отечественного стекло-керамического материала (СКМ). В последнее десятилетие российским производителям удалось разработать отечественную систему, которая не уступает импортным аналогам по своим технологическим и электрофизическим характеристикам, например [9]:

- плотность –  $3,1 \pm 0,2$  г/см<sup>3</sup>;
- диэлектрическая проницаемость –  $7,2 \pm 0,3$  (10 ГГц);
- тангенс угла диэлектрических потерь -  $0,002 \pm 0,0005$  (10 ГГц).

Во-вторых, существует острая проблема в отсутствии производства ряда важнейших вспомогательных материалов (связующих компонентов (связки), поверхностно-активных веществ (ПАВ)) для обеспечения полной технологической независимости в части изготовления низкотемпературной керамики [10].

В-третьих, при создании изделий по методу НТО используется импортная программная среда для проектирования, которая требует периодического обновления лицензий.

В-четвертых, основной проблемой является низкая осведомленность предприятий СВЧ электроники о наличии отечественного материала и руководящих указаний к конструированию, а также недостаточный обмен информацией в части базовых знаний и новейших достижений в данной области и в области сборочных операций устройств по данному методу, что ведёт к высокому уровню зависимости от импортных поставщиков, невозможности изготовления ряда миниатюрных и эффективных устройств, увеличению трудоёмкости изготовления изделия.

Решение указанных проблем возможно при большем количестве российских производителей, которые будут развивать технологию изготовления плат СВЧ устройств методом низкотемпературного обжига при увеличении номенклатуры изделий. При использовании данной технологии существенно возрастает сложность проведения разработок конструкции, так как разработка производится не в плоскости, а в объёме. Однако, используя современные системы автоматизированного проектирования и опираясь на богатый опыт разработчиков и проектировщиков конструкции, можно говорить о реализации всего перечня устройств СВЧ методом низкотемпературного обжига.

В работе рассмотрены особенности применения низкотемпературной керамики для миниатюризации и расположения пассивной ЭКБ в объёме керамической платы, разрабатываемой для ППМ СВЧ диапазона.

### **1 Обоснование метода низкотемпературного обжига керамики**

Технологический процесс изготовления керамических плат с применением метода НТО является развитием толсто пленочной технологии изготовления керамических плат и имеет несколько отличительных особенностей по сравнению с классической толсто пленочной технологией [11-12], а именно:

- параллельная трафаретная печать отдельных слоев с различной топологией, которая осуществляется на подготовленной подложке из «сырой» ленты с последующей предварительной сушкой в течение 2 ч при комнатной температуре для устранения отпечатка ячеистой структуры трафарета и выравнивания поверхностного профиля.

- дополнительная термическая обработка (ИК-сушка) отдельных слоев с различной топологией при температуре 120-200 °С после выдержки пасты для вжигания, чтобы структура слоев стала монолитной, а также для удаления летучих органических растворителей. Поэтому для обеспечения расчетной ёмкости следует учитывать коэффициент усадки материала.

- формирование общего пакета (стека) платы или мультизаготовки, после которого проводится низкотемпературный обжиг керамики.

На данный момент достигнуты результаты в изготовлении многослойных плат по методу НТО в 10 слоев, а также 14 слоев, т.е. подобраны оптимальные технологические режимы и номенклатура изделий, для которой реализуется данный метод.

Основным этапом, отличающий метод НТО от классической технологии, является низкотемпературный обжиг стека керамических слоев, который имеет ряд специфических параметров, зависящих от материала подложки и конструкции платы. Спекание слоев происходит при постоянной температуре, примерно, 800-960 °С. При этом происходит сцепление покрытия с подложкой химическое (взаимодействие окислов стекла и керамики) и физическое (заполнение стеклом открытых поверхностных пор керамики). После выдержки изделие медленно охлаждают во избежание внутренних напряжений и растрескиваний платы. Готовый монолитный набор групповых заготовок керамической платы разделяется на части и переходит на дальнейшие традиционные операции сборки.

Другим отличительным аспектом предложенного метода НТО является применение новых составов паст для вжигания со специальными присадками. Данные пасты изготавливаются на основе таких материалов, как медь, серебро, золото. Ранее использовались более тугоплавкие материалы: молибден, вольфрам, молибден-марганцевый сплав.

Для заполнения переходных отверстий и нанесения топологии на керамические заготовки применяются металлизированные проводящие и резистивные пасты. Важными критериями при выборе паст являются, как их равномерное совместное

спекание, так и, в последующем, совместимость, например, с серебряными выводами радиоэлементов, устанавливаемых с помощью навесного или поверхностного монтажа.

## **2 Описание результатов моделирования процессов создания низкотемпературной керамики**

Метод НТО позволяет формировать пассивные элементы ЭКБ такие, как резисторы, конденсаторы, индуктивности, непосредственно внутри керамической структуры. Существуют особенности проектирования таких структур, например, возможность соединения интегральных резисторов с проводниками проводится путём не только сквозных отверстий по вертикали, но и за счёт перекрытия соответствующих участков проводящими или резистивными пастами по горизонтали. При этом, на данный момент российскими производителями лазерной техники разработаны приборы, которые повышают точность подстройки номиналов резисторов до  $\pm 10 \dots 30\%$  внутри объёма, а на внешних слоях - до  $\pm 5 \dots 7\%$ .

Интегральные конденсаторы выполняются в виде трёхмерных структур. В качестве диэлектрика выступают слои керамики, которые на данный момент позволяют получить элементы номиналом  $0,5 \dots 20$  пФ и обладают высокой добротностью.

Интегральные катушки индуктивности выполняются в виде планарных и объёмных структур с высокой добротностью и малыми габаритными размерами. Объёмные индуктивности – комбинация планарных катушек, соединённых между собой и расположенных в разных слоях. Магнитная связь, возникающая между витками, позволяет увеличить индуктивность до  $2 \dots 50$  нГн, в зависимости от структуры.

Кроме того, метод НТО позволяет непосредственно внутри керамической структуры формировать аналоговые элементы СВЧ-устройств: фильтры, диплексеры, направленные ответвители, дифференциальные делители мощности и другие элементы СВЧ-схем, которые представляют собой керамические слои с межслойными переходами, внутренними и внешними проводниками: чип-кристаллом, различными элементами топологии, полостями и окнами; площадками под монтаж микросхем с планарными выводами, а также переключками верхних и нижних площадок.

Таким образом, в результате проектирования объёмной структурной модели керамической платы фильтра приёмо-передающего устройства на AWR-платформе удалось уменьшить габаритные размеры всей микросхемы и определить гребенчатую топологию поверхности функционального слоя [12]. Основным критерием при разработке модели керамической платы, которая предполагается для изготовления по НТО методу, являлось неизменность электрических параметров исходной платы фильтра ШИМ, изготовленной по классической технологии. Проверка указанного условия осуществлялась с помощью достижения смоделированной квадратуры амплитудно-частотной характеристики, представленной на рисунке 1.

В результате хорошего соответствия смоделированной платы (микросхемы) на

основе низкотемпературной керамики удалось уменьшить размеры исходной платы фильтра ПИМ с  $20 \times 6,8 \times 0,5$  мм до  $7 \times 6,4 \times 0,6$  мм. Кроме того, предполагается перейти от герметизированных фильтров к бескорпусным, благодаря возможности создания монолитной структуры микросхемы по НТО методу. Таким образом, необходимость в дополнительном зазоре между платой и крышкой фильтра, которая увеличивает толщину прибора в целом, при моделировании устройства становится не актуальной для низкотемпературной керамики.

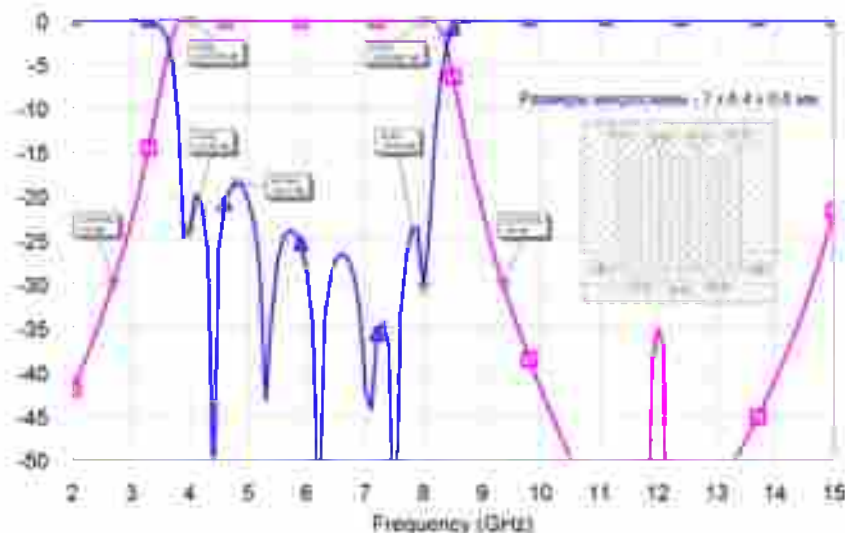


Рисунок 1 – Амплитудно-частотная характеристика СВЧ-сигнала керамической платы (микросхемы), спроектированной для изготовления по методу низкотемпературного обжига: на врезке – топология функционального слоя фильтра приёмопередающего модуля

### Заключение

Метод НТО позволяет разместить в каждом слое структуры платы всю необходимую пассивную ЭКБ. При этом за счёт совместного спекания вся конструкция приобретает монолитную структуру, что положительно отражается на надёжности устройства в целом, а также его влагозащищённости. Объективно, недостатком данной конструкции можно привести плохую ремонтпригодность пассивных ЭКБ. Однако, в рамках применения, например, в бортовой или космической среде, это не является недостатком, так как в настоящее время наблюдается переход к узловой замене неисправных составных частей изделия с низкой себестоимостью.

Таким образом, применение метода низкотемпературного обжига для изготовления керамической платы приведёт к уменьшению размеров изделий. Кроме того, плотность элементов и их вариативность, а также надёжность и функциональность изделия, в целом, возрастёт за счёт возможного 3D-моделирования конструкции и размещения пассивной ЭКБ внутри платы.

## Литература

- 1 Симин А., Холодняк Д., Вендик И. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. – С.190-196.
- 2 Джоввет ЧЕ. Технология тонких и толстых пленок для микроэлектроники / Под ред. Е.Б.Соколова. – Москва: Металлургия, 1980.
- 3 Колецов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989.
- 4 Steinberg J.I., Horowitz S.J., Bacher R.J. Low-temperature co-fired tape dielectric material systems for multilayer interconnections // Microelectron. 1986. Int. 3. P. 36-39.
- 5 Чигиринский С. Особенности и преимущества производства многослойных структур на основе керамики (LTCC, HTCC, MLCC) // Компоненты и технологии. – 2009. – № 11. – С.130-131.
- 6 Купцов Д.А., Сымов А.Ф., Думчиков К.А., Собченко М.И., Ухандеев В.И. Использование плат на DBC-подложке для обеспечения надёжного соединительного контакта в герметичных приборах // Электронные информационные системы. – 2020. – №1 (24). – С.77-85.
- 7 Rappaport T.S., Sun S., Mayzus R. and et. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! // IEEE Access. 2013. Is. 1. P. 335-349.
- 8 Макарович К., Мелийцев В., Чигиринский С. LTCC-система SK-47 от КЕКО Equipment Ltd. // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2018. – №5.
- 9 Вайман Д.А., Красный И.Б., Данилов В.С., Кумачева С.А. Исследование технологических аспектов формирования трехмерных плат с металлизационными слоями из LTCC-керамики // Доклады АН ВШ РФ. – 2017. – № 1(34).
- 10 Sebastian M.T., Uvic R., Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties // Int. Mater. Rev. 2015. V. 60. P. 392-412.
- 11 Walker J., Maloney J., Gleason C. and et. The Effect of Firing Temperature on Structure and Electrical Properties in Low Temperature Co-fired Ceramics // «Addit. Conf. – 2016». 2016. P. 136-141.
- 12 Бенни Хаддад. Проектирование LTCC-приёмопередатчика X-диапазона с антенной решеткой в NI AWR Design environment // СВЧ-электроника. Проектирование и моделирование. – 2019. – №2. – С.32-42.

Шведов Андрей Сергеевич – аспирант, АО «ЦНИРТИ имени А.И.Берга», г.Москва.  
 Область научных интересов: радиотехника, многослойные платы, технология сборки радиокомпонентов.  
 E-mail: andshvedov@gmail.com

Климова Светлана Александровна – кандидат физ.-мат. наук, доцент, АО «ЦНИРТИ имени А.И.Берга», г.Москва.  
 Область научных интересов: радиотехника, разработка новых материалов для электроники, полупроводниковая электроника.  
 E-mail: klimsvalek@mail.ru

Самылкин Дмитрий Владимирович – аспирант, АО «ЦНИРТИ имени А.И.Берга», г.Москва.

Область научных интересов: перепроектирование бизнес процессов создания печатных плат, технология сборки плат.

E-mail: di1rona@mail.ru

Волков Андрей Валентинович – кандидат технических наук, АО «ЦНИРТИ имени А.И.Берга», г.Москва.

Область научных интересов: современные методы конструирования и технологии производства радиоэлектронной аппаратуры, разработка новых материалов для электроники.

E-mail: vol.1@mail.ru

Почтовый адрес: 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр.9.

## MANUFACTURING THE CERAMIC BOARDS BY TECHNOLOGY OF LOW TEMPERATURE CO-FIRED CERAMICS

Manufacturing a miniature transceiver by using the low-temperature co-fired ceramics (LTCC) of a multilayer board has observed at work. The features of the manufacturing products using this method as well as some developments in the area of the creating a passive electronic component base into 3D structure of the multilayer board have shown. The perspective ways for applications by LTCC at the design of electronic products have identified.

Key words: multilayer boards; low-temperature co-fired ceramics; LTCC; miniaturization; ultra-high frequency module; 3D packaging; electronic component base

Shvedov Andrey Sergeevich – graduate student, JSC “CNIRTI named after A.I. Berg”, Moscow.

Area of scientific interests: radio engineering, multilayer boards, radio component assembly technology.

Klimova Svetlana Aleksandrovna – candidate of physics and mathematics. Sciences, Associate Professor, JSC “CNIRTI named after A.I. Berg”, Moscow.

Area of scientific interests: radio engineering, development of new materials for electronics, semiconductor electronics.

Samytkin Dmitry Vladimirovich – graduate student, JSC “CNIRTI named after A.I. Berg”, Moscow.

Area of scientific interests: redesign of business processes for creating printed circuit boards, board assembly technology.

Andrey Valentinovich Volkov – Candidate of Technical Sciences, JSC “CNIRTI named after A.I. Berg”, Moscow.

Area of scientific interests: modern methods of design and production technologies of radio-electronic equipment, development of new materials for electronics.

УДК 621.372.8

## **ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛА НА ФОНЕ ШУМА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И МЕТОДА МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ**

Мурсалов Д.Л.

*Представлено решение задачи обнаружения сигнала на фоне шума с помощью нейронной сети, а также обнаружение сигнала на фоне шума с помощью метода максимального правдоподобия. Выполнена генерация массивов данных. Вводятся входные параметры нейронной сети, выбрана модель логистической регрессии и алгоритм обучения нейронной сети, определена структура нейронной сети. Приведены результаты модельных расчетов нейронной сети и метода максимального правдоподобия. Проводится анализ полученных результатов.*

*Ключевые слова:* обнаружение сигнала, нейронная сеть, перцептрон, логистическая регрессия, метод максимального правдоподобия.

### **Введение**

Обнаружение сигналов в радиотехнических системах выполняется по алгоритмам теории обнаружения сигналов [1], которая давно уже сформировалась и широко используется. Однако в связи с появлением в последнее время новых технологий возникает необходимость их проверки с целью оценки эффективности их использования при решении задач обнаружения сигналов.

Одним из перспективных направлений в обнаружении сигналов является использование широко применяемой информационной технологии нейронных сетей [2] в таких направлениях как обработка видеозображений, голоса, изображений и др.

В настоящей статье рассматривается решение задачи обнаружения сигнала на фоне шума с одинаковыми исходными данными с помощью нейронной сети и одного из методов теории обнаружения сигналов.

### **1 Постановка задачи и исходные данные**

Необходимо решить задачу обнаружения заданного сигнала на фоне шума с помощью нейронной сети и с помощью метода максимального правдоподобия. Проанализировать полученные результаты.

Рассматриваем обнаружение следующих сигналов:

- некоррелированный шум с нормальным распределением;
- синусоидальный сигнал с некоррелированным шумом.

Принимается следующее:

- отношение сигнал/шум (в раз) равен 5;



- амплитуда сигнала равна 1 В (выбрана для удобства, чтобы не нормировать).

С помощью компьютерной системы Mathcad 15 выполняется генерация массивов данных, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

| Количество массивов данных | Количество выборок в массиве данных | Тип сигнала           | Назначение   |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--|
| 10                         | 100                                 | Первый тип сигнала    | Обучение нейронной сети  |
| 10                         | 100                                 | Второй тип сигнала    |  |
| 100                        | 100                                 | Первый тип сигнала    | Верификация нейронной сети, использование в методе максимального правдоподобия     |
| 100                        | 100                                 | Второй тип сигнала    |  |
| 1                          | 100                                 | Синусоидальный сигнал | Получение второго типа сигнала, использование в методе максимального правдоподобия |

Примечание: Второй тип сигнала получается путем сложения первого типа сигнала и синусоиды

Для генерации массивов данных некоррелированного шума с нормальным распределением (первый тип сигнала) приняты следующие исходные данные:

- количество выборок в массиве данных ..... 100;
- математическое ожидание ..... 0;
- среднее квадратическое отклонение ..... 0,2;
- шаг интегрирования ..... 1;

- функция системы Mathcad 15 для генерации шума –  $rnorm(m, \mu, \sigma)$  – генерация вектора шума из  $m$  случайных чисел, имеющих нормальное распределение со средним  $\mu$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ .

График, построенный с использованием одного из полученных массивов данных для первого типа сигнала, приведен на рисунке 1.

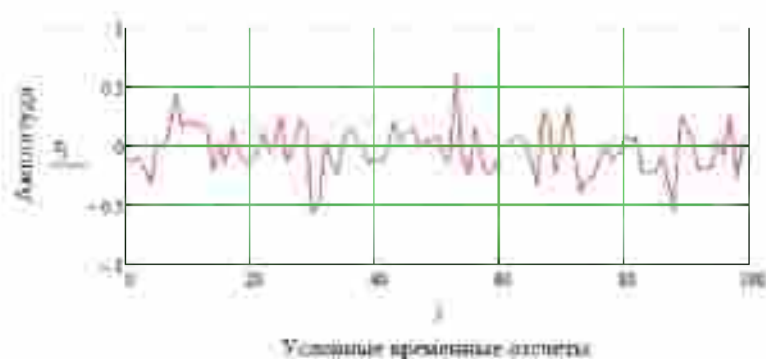


Рисунок 1 – График некоррелированного шума с нормальным распределением

Для генерации массивов данных синусоидального сигнала с некоррелированным шумом (второй тип сигнала) приняты следующие исходными данные:

- количество выборок в массиве данных ..... 100;
- амплитуда синусоиды ..... 1;
- шаг интегрирования ..... 1;
- период синусоиды ..... 1.

График, построенный с использованием одного из полученных массивов данных для второго типа сигнала, приведен на рисунке 2.

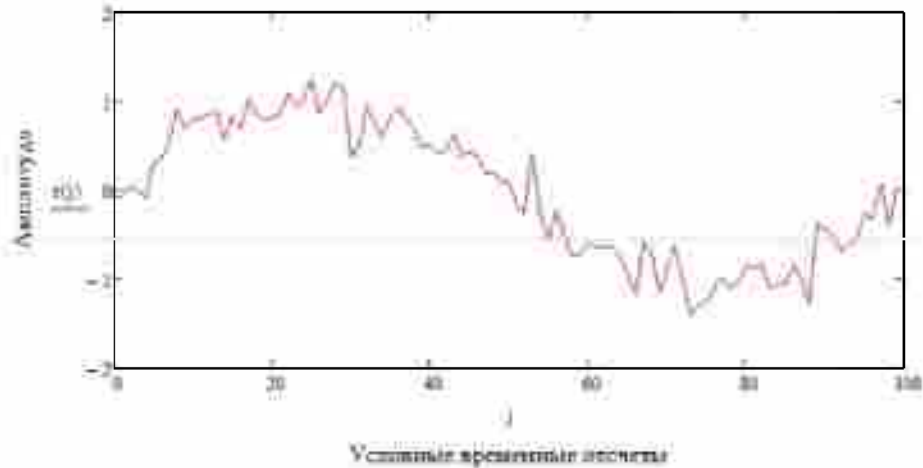


Рисунок 2 – График синусоидального сигнала с некоррелированным шумом

## 2 Обнаружение сигнала на фоне шума с помощью нейронной сети

### 2.1 Входные параметры нейронной сети

Для обнаружения с помощью нейронной сети приведенных в п.3 сигналов [3] вводятся параметры  $K_{нс\ 1}$  и  $K_{нс\ 2}$ , рассчитываемые по формулам:

$$K_{нс\ 1} = \int_{t=1}^n x(t)dt, \quad (1)$$

$$K_{нс\ 2} = \int_{t=1}^n x^2(t)dt, \quad (2)$$

где  $K_{нс\ 1}$  – параметр, определяющий интеграл функции обнаруживаемых сигналов с помощью нейронной сети;

$K_{нс\ 2}$  – параметр, связанный с энергией обнаруживаемых сигналов с помощью нейронной сети ( $P = U^2/R$  при  $R = 1$  Ом);

$n$  – количество выборок в массиве данных,  $n = 100$ .

Используя полученные массивы данных, приведенные в таблице 1, рассчитываются параметры  $K_{нс\ 1}$  и  $K_{нс\ 2}$  по формулам (1) и (2) для обоих типов сигналов для обучения и верификации нейронной сети. Результаты расчетов для обучения нейронной сети приведены в таблице 2.

График параметров  $K_{нс\ 1}$ ,  $K_{нс\ 2}$  для обоих типов сигналов (массив данных №1-10) для обучения нейронной сети приведен на рисунке 3.

## 2.2 Выбор нейронной сети

Необходимо соотнести сигнал на входе нейронной сети к одному из 2 типов сигналов. Это является задачей классификации в машинном обучении [4]. Задачи такого типа, как правило, решаются с помощью логистической регрессии, в которой переменная ответа является категориальной.

Известны 3 типа моделей логистической регрессии:

- бинарная логистическая регрессия. Переменная ответа может принадлежать только к одной из двух категорий;

- полиномиальная логистическая регрессия. Переменная ответа может принадлежать к одной из 3 или более категорий, среди категорий нет естественного порядка;

- порядковая логистическая регрессия. Переменная ответа может принадлежать к одной из 3 или более категорий, и среди категорий существует естественный порядок.

Таблица 2

| № массива данных | Значения параметров $K_{нс,1}$ , $K_{нс,2}$ для обучения нейронной сети для |            |   |            |
|------------------|---|------------|---|------------|
|                  | некоррелированного шума с нормальным распределением                         |            | синусоидального сигнала с некоррелированным шумом |            |
|                  | $K_{нс,1}$  | $K_{нс,2}$ | $K_{нс,1}$  | $K_{нс,2}$ |
| 1                | -3,009  | 3,91       | -3.009  | 57.306     |
| 2                | -2.782  | 3.646      | -2.782  | 53.329     |
| 3                | -3,084  | 4,75       | -3.084  | 56.712     |
| 4                | -1,07   | 3,867      | -1.07   | 55.814     |
| 5                | -1,272  | 4,211      | -1.272  | 50.838     |
| 6                | 0,348   | 4,29       | 0,348   | 53.69      |
| 7                | 1,173   | 3,835      | 1,173   | 52.313     |
| 8                | 0,33  | 2,683      | 0,33  | 53.605     |
| 9                | -0,141  | 4,398      | -0,141  | 58.007     |
| 10               | -0,008765   | 3,204      | -0,008765   | 51.724     |

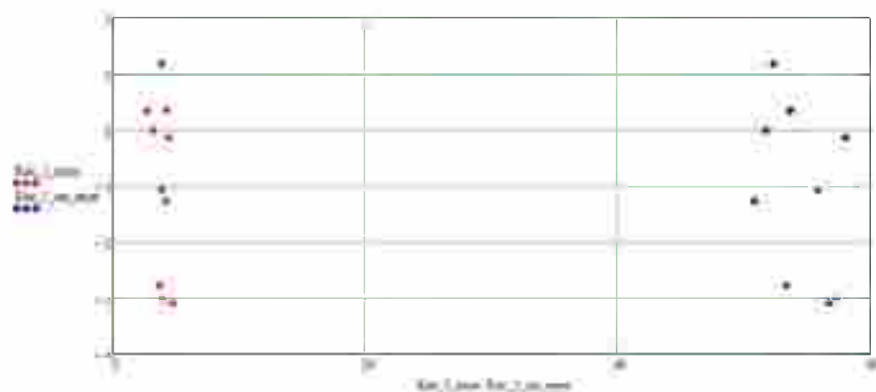


Рисунок 3 – График параметров  $K_{нс,1}$ ,  $K_{нс,2}$  для обоих типов сигналов (массив данных №1-10)

Известны следующие наиболее распространенные алгоритмы обучения нейронных сетей:

- метод обратного распространения, который является одним из основных способов обучения и содержит алгоритм вычисления градиентного спуска;

- метод упругого распространения. Это метод является альтернативным методу обратного распространения, требующий много времени и не позволяющий получить результат в короткие сроки.

- генетический алгоритм обучения, основанный на комбинировании (скрещивании) результатов, т.е. новое поколение является продуктом комбинации результатов с самыми лучшими свойствами.

Применительно к нашей задаче принимается, что для классификации 2 типов сигналов необходимо использовать бинарную логистическую регрессию. В качестве алгоритма обучения нейронной сети целесообразно применить метод обратного распространения, т.к. он хорошо исследован и является одним из основных способов обучения.

Анализ графика на рисунке 3 показывает, что параметры  $K_{НС.1}$  и  $K_{НС.2}$  для первого и второго типов сигналов сгруппированы в разных частях графика и линейно разделены, поэтому, на первый взгляд, использование сигмоидальной функции является нецелесообразным. Однако, отмечено, что при линейном разделении нейронная сеть не обучается. При использовании же сигмоидальной функции нейронная сеть прошла обучение.

Исходя из графика, принимаются следующие допущения:

- параметр  $K_{НС.1}$  для обоих типов сигналов имеет значение не более 10;
- параметр  $K_{НС.2}$  для первого типа сигнала имеет значение не более 10;
- параметр  $K_{НС.2}$  для второго тип сигнала имеет значение не менее 40.

Т.к. параметр  $K_{НС.1}$  для обоих типов сигналов является математическим ожиданием с шумовой составляющей, то можно отметить, что этот параметр будет стремиться к нулю при объеме выборке, стремящейся к бесконечности. Следовательно, на решение задачи классификации сигнала будет влиять незначительно.

Для распознавания 2 типов сигналов будем использовать нейронную сеть в виде двухслойного персептрона, с 2 входами (параметры  $K_{НС.1}$ ,  $K_{НС.2}$ ), 5 нейронами в скрытом слое и 2 выходами  $D_1$ ,  $D_2$ . 5 нейронов в скрытом слое является достаточным условием в соответствии с теоремой Колмогорова [4] и определяется как  $2n + 1$ , где  $n$  - количество входов. Обучение нейронной сети целесообразно проводить с "учителем" с помощью рассчитанных параметров  $K_{НС.1}$  и  $K_{НС.2}$  для обоих типов сигналов для обучения.

Структура нейронной сети приведена на рисунке 4.

### 2.3 Обучение и верификация нейронной сети

Входными данными для нейронной сети являются параметры  $K_{НС.1}$  и  $K_{НС.2}$ . Нейронная сеть прошла обучение с параметрами  $K_{НС.1}$  и  $K_{НС.2}$  для обоих типов сигналов. Для этого использовались массивы данных №1-10 (см. таблицу 2). На вход нейронной сети подавались параметры  $K_{НС.1}$  и  $K_{НС.2}$ . На выходе нейронная сеть выдавала значения  $D_1$  и  $D_2$ , рассчитывала ошибки и методом обратного распростране-

ния пересчитывала значения весов, смещений и выходов нейронов. Следующая итерация обучения выполнялась с теми же параметрами  $K_{НС,1}$  и  $K_{НС,2}$ , которые опять поступали на вход нейронной сети с получением на выходе новых значений  $D_1$  и  $D_2$ . Этот процесс продолжался до существенного уменьшения значения ошибок. Далее на вход нейронной сети поступали следующие параметры  $K_{НС,1}$  и  $K_{НС,2}$ . Количество итераций при обучении нейронной сети для параметров  $K_{НС,1}$  и  $K_{НС,2}$  составило от 10 до 30.

После обучения нейронная сеть прошла верификацию с помощью параметров  $K_{НС,1}$  и  $K_{НС,2}$  для обоих типов сигналов. Количество групп параметров  $K_{НС,1}$  и  $K_{НС,2}$  составило 100 для первого типа сигнала и 100 – для второго. При этом вероятность правильного обнаружения типа сигнала нейронной сетью составила 0,959 при заданной вероятности ложной тревоги 0,02 при пороге обнаружения 0,228.

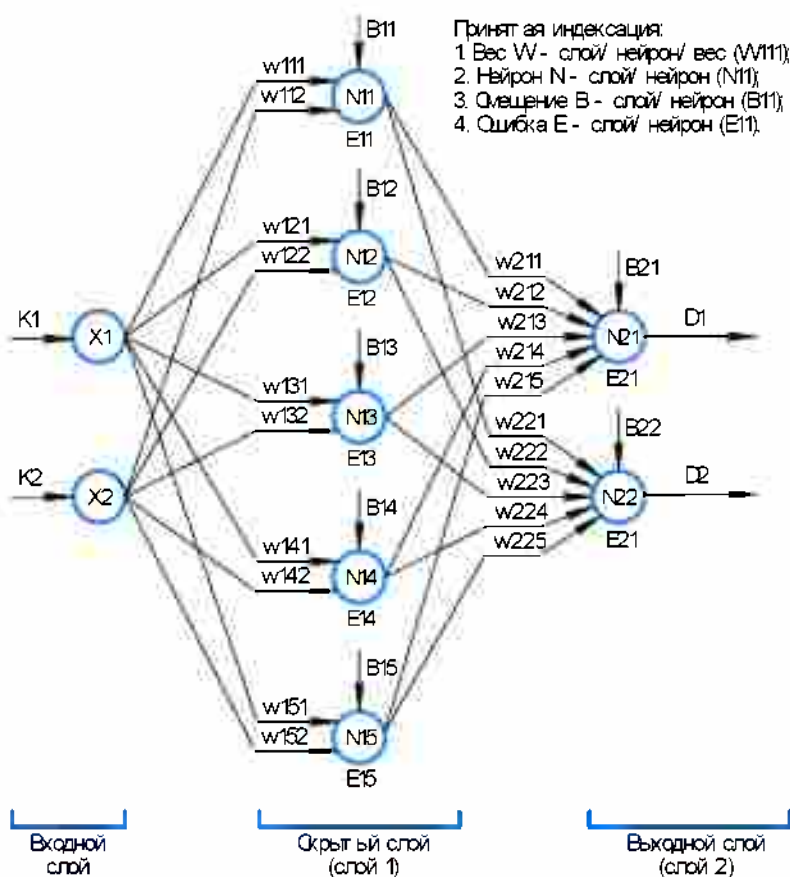


Рисунок 4 – Структура нейронной сети

### 3 Обнаружение сигнала на фоне шума с помощью метода максимального правдоподобия

В соответствии с теорией обнаружения сигналов [5] уравнение наблюдения  $f(t)$  имеет вид

$$f(t) = k * S(t) + n(t), \quad (3)$$

где  $S(t)$  – полностью известный сигнал, заданный на интервале времени  $(t_1; t_2)$ , в

нашем случае это синусоидальный сигнал, см. п.3:

$k$  – множитель, представляющий из себя дискретную случайную величину с двумя возможными состояниями,  $k = (0; 1)$ ;

$n(t)$  – некоррелированный шум с ограниченной полосой с нормальным распределением.

Устройство обнаружения должно обработать функцию  $f(t)$  с последующим решением о принятии одной из двух гипотез:

- $H_0$  – шум  $n(t)$  присутствует, сигнал  $S(t)$  отсутствует;
- $H_1$  – сигнал  $S(t)$  присутствует.

Структурная схема устройства обнаружения [6] приведена на рисунке 5.

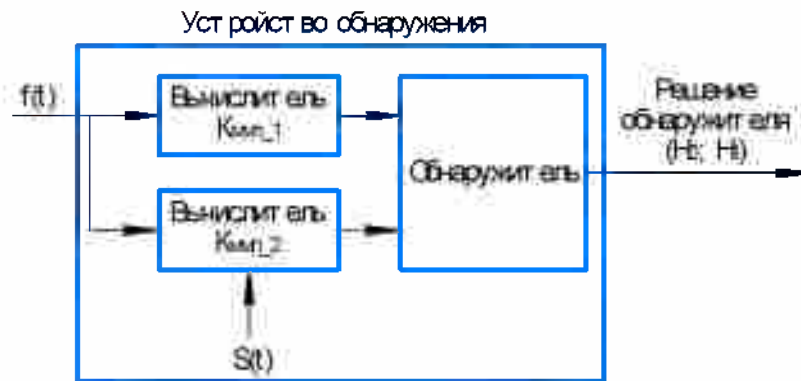


Рисунок 5 – Структурная схема устройства обнаружения

Функция распределения некоррелированного шума с ограниченной полосой с нормальным распределением [7] имеет вид

$$f_{ш}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} * e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

где  $y$  – значение некоррелированного шума с ограниченной полосой с нормальным распределением функции  $n(t)$ ;

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение некоррелированного шума с ограниченной полосой с нормальным распределением.

Функция распределения некоррелированного шума с нормальным распределением и синусоидального сигнала [7] имеет вид

$$f_{ш,с}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} * e^{-\frac{(y-s)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

где  $y$  – значение некоррелированного шума с нормальным распределением функции  $n(t)$ ;

$S$  – значение синусоидального сигнала функции  $S(t)$ ;

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение некоррелированного шума с нормальным распределением.

С учетом (4), (5) и приведением этих формул в наиболее удобный вид для практических расчетов, вводятся параметры, рассчитываемые по формулам:

$$K_{мп_1} = -\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}}, \quad (6)$$

$$K_{мп_2} = -\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - S_i)^2}{n}}, \quad (7)$$

где  $K_{мп_1}$  – весовой коэффициент сигнала, поступившего на вход устройства об-

наружения, без сигнала  $S(t)$ ;

$K_{\text{ММП}_2}$  – весовой коэффициент сигнала, поступившего на вход устройства обнаружения, с сигналом  $S(t)$ ;

$y_i$  – значение выборки в массиве данных шума или шума с синусоидальным сигналом;

$S_i$  – значение выборки в массиве данных синусоидального сигнала  $S(t)$ ;

$n$  – количество выборок в массиве данных,  $n = 100$ .

Критерием оптимального обнаружения сигнала является максимальное значение одного из весовых коэффициентов  $K_{\text{ММП}_1}$  и  $K_{\text{ММП}_2}$ :

- если  $K_{\text{ММП}_1} > K_{\text{ММП}_2}$ , то принимается гипотеза  $H_0$ ;

- если  $K_{\text{ММП}_1} < K_{\text{ММП}_2}$ , то принимается гипотеза  $H_1$ .

При событии  $H_0$  порог обнаружителя  $L_{\text{обнаруж}}$ , при котором при заданной вероятности ложной тревоги обеспечивается требуемая вероятность правильного обнаружения, определяется по формуле

$$L_{\text{обнаруж}} = l * \sigma, \quad (8)$$

где  $l$  – множитель порога обнаружителя;

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение некоррелированного шума с ограниченной полосой с нормальным распределением.

Вероятность правильного обнаружения  $D_{\text{по}}$  при решении обнаружителя о событии  $\bar{H}_1$  при событии  $H_1$  [8] находится по формуле

$$D_{\text{по}} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i(\bar{H}_1|H_1)}{N}, \quad (9)$$

где  $R_i(\bar{H}_1|H_1)$  – решение обнаружителя о событии  $\bar{H}_1$  при событии  $H_1$  при превышении порога обнаружителя весовым коэффициентом сигнала  $K_{\text{ММП}_2}$ ;

$N$  – количество массивов данных,  $N = 100$ .

Вероятность ложной тревоги  $F_{\text{лт}}$  при решении обнаружителя о событии  $\bar{H}_1$  при событии  $H_0$  [8] находится по формуле (10).

$$F_{\text{лт}} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i(\bar{H}_1|H_0)}{N}, \quad (10)$$

где  $R_i(\bar{H}_1|H_0)$  – решение обнаружителя о событии  $\bar{H}_1$  при событии  $H_0$  при превышении порога обнаружителя весовым коэффициентом сигнала  $K_{\text{ММП}_1}$ ;

$N$  – количество массивов данных,  $N = 100$ .

В результате синтеза модели устройства обнаружения сигнала на фоне шума с помощью метода максимального правдоподобия вероятность правильного обнаружения  $D_{\text{по}}$  составила 0,99 при заданной вероятности ложной тревоги  $F_{\text{лт}}$ , равной 0,02 при пороге обнаружения  $L_{\text{обнаруж}}$ , равном 0,228. При этом на вход устройства обнаружения подавалось 100 массивов данных для первого типа сигнала и 100 массивов данных для второго типа сигнала. Каждый массив данных состоял из 100 выборок.

#### 4 Анализ полученных результатов

Для анализа синтезированных моделей устройства обнаружения сигнала на фоне шума с помощью нейронной сети и метода максимального правдоподобия исходные данные и результаты обнаружения сведены в таблицу 3.

Исходя из таблицы 3 видно, что при одинаковых исходных данных вероятность правильного обнаружения в модели устройства обнаружения с помощью ме-

тогда максимального правдоподобия составляет 0,99 при заданной вероятности ложной тревоги 0,02, а у модели устройства обнаружения с помощью нейронной сети – 0,959 при заданной вероятности ложной тревоги 0,02. При одинаковой заданной вероятности ложной тревоги вероятность правильного обнаружения методом максимального правдоподобия выше, чем у нейронной сети.

Таблица 3

| Модель устройства обнаружения с помощью нейронной сети   |                          | Модель устройства обнаружения с помощью метода максимального правдоподобия   |                       |
|--|--------------------------|--|-----------------------|
| Параметр   | Значение параметра       | Параметр   | Значение параметра    |
| Количество массивов данных для первого типа сигнала  | 100                      | Количество массивов данных для первого типа сигнала  | 100                   |
| Количество массивов данных для второго типа сигнала  | 100                      | Количество массивов данных для второго типа сигнала  | 100                   |
| Количество выборок в каждом массиве данных   | 100                      | Количество выборок в каждом массиве данных   | 100                   |
| Среднее квадратическое отклонение некоррелированного шума с ограниченной полосой с нормальным распределением   | 0,2                      | Среднее квадратическое отклонение некоррелированного шума с ограниченной полосой с нормальным распределением         | 0,2                   |
| Вероятность правильного обнаружения .....<br>при заданной вероятности ложной тревоги .....<br>при пороге обнаружения   | 0,959<br>0,02<br>0,228   | Вероятность правильного обнаружения .....<br>при заданной вероятности ложной тревоги .....<br>при пороге обнаружения | 0,99<br>0,02<br>0,228 |
| Количество математических операций (умножение, деление, сложение и др.) модели устройства обнаружения:<br>- при обучении<br>- при верификации<br>- итого ..... | 55395<br>98001<br>153396 | Количество математических операций (умножение, деление, сложение и др.) модели устройства обнаружения                | 102602                |

Общее число математических операций в модели методом максимального правдоподобия в 1,5 раза меньше, чем в модели нейронной сети. Однако, модель с нейронной сетью имеет два этапа: обучение с «учителем» и верификацию (эксплуатацию). Этап с «учителем» является настройкой модели, после этого только модель начинает работать. А в модель методом максимального правдоподобия уже заложен эталонный сигнал, вследствие чего этап обучения отсутствует. Поэтому, предлагается сравнивать количество математических операций модели с нейронной сетью после обучения с моделью методом максимального правдоподобия. С учетом этого, количество математических операций двух моделей примерно сопоставимо и составляет для модели с нейронной сетью и модели методом максимального правдоподобия, соответственно: 98001 и 102602.

Таким образом, можно отметить, что задача, рассматриваемая в этой статье,



решается с помощью обеих моделей. Однако, появление ограничения к вероятности правильного обнаружения, например, не ниже 0,99, приведет к тому, что модель с нейронной сетью не сможет решить такую задачу. Если же не будут задаваться жесткие ограничения к значению вероятности правильного обнаружения, то возможно использование и модели с нейронной сетью.

#### Литература

- 1 Ван Трис Г. Теория обнаружения оценок и модуляции. Том 1. – М.: Советское радио, 1972 – 744 с.
- 2 Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. – М.: Радиотехника, 2009 – 432 с.
- 3 Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 1999.
- 4 Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
- 5 Хуторцев В.В. Статистическая теория радиотехнических систем. – МО РФ, 2006. – 384 с.
- 6 Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003 – 400 с.
- 7 Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д.Ширмана. – М.: Советское радио, 1970. – 560 с.
- 8 Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

Мурсалов Дмитрий Леонидович – аспирант, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: радионавигация, радиолокация.

Email: nos.mv@goz.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

#### SIGNAL DETECTION IN THE BACKGROUND OF NOISE USING A NEURAL NETWORK AND MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD

We present the solution of the problem of signal detection in the background noise using neural network, as well as the signal detection in the background noise using the method of maximum likelihood. The generation of data arrays is performed. The input parameters of a neural network are entered, the model of a logistic regression and the algorithm of training of a neural network are chosen, the structure of a neural network is defined. The results of model calculations of the neural network and the method of maximum likelihood are presented. The results are analyzed.

Keywords: signal detection, neural network, perceptron, logistic regression, maximum likelihood method.

Mursalov Dmitriy Leonidovich – postgraduate student, JSC "All-Russian Research Institute of Radio Equipment", St. Petersburg.

Research interests: radio navigation, radiolocation.

УДК 519.237.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ АНОДНО-ОКИСНЫХ ПОКРЫТИЙ НА НЕУПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

Ефремов А.Н.

*В работе получена регрессионная модель зависимости толщины анодно-окисного покрытия на сплавах АМгб, АМгЗМ и АМц от основных технологических параметров процесса. Показано, что определяющими факторами являются плотность тока, состав электролита, температура и время анодирования. Получена эмпирическая формула, описывающая зависимость толщины покрытия от технологических параметров. Проведена оценка адекватности построенной модели и представлена графическая интерпретация результатов.*

*Ключевые слова:* регрессионная модель; толщина покрытия; алюминиевые сплавы; анодное окисление в серной кислоте; технологические параметры анодирования

### Введение

Окисные покрытия на алюминии и его сплавах применяют для защиты деталей от коррозии и истирания; с целью декоративной отделки полированных или окрашенных поверхностей; в качестве грунта для лакокрасочных покрытий и других органических пленок; как подслоя для нанесения электролитических покрытий; для специальных целей, связанных с особыми свойствами (электрическая и тепловая изоляция, большая пористость и высокая степень адсорбции и др.) [1-2].

Для защитного и защитно-декоративного анодирования алюминия и его сплавов обычно применяются электролиты на основе серной, шавелевой, хромовой или сульфосалициловой кислот.

Наиболее широкое применение находит сульфатный электролит благодаря низким рабочим напряжениям и дешевизне процесса. Покрытия, полученные в данном электролите на алюминии и ряде его сплавов, обладают рядом ценных свойств (пористость, защитная способность, твердость, жаростойкость, износостойкость и др.) [1-2].

При анодном окислении алюминия и его сплавов можно получать покрытия с заданными свойствами. Свойства покрытий обуславливаются составом электролита и технологическими режимами анодирования. Варьируя эти параметры, можно управлять свойствами анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах.

В промышленных условиях достаточно сложно и экономически неоправданно подобрать рациональные и экономичные режимы нанесения покрытий, поэтому разработка комплексной математической модели прогнозирования качества (далее – ММПК) покрытий для различных условий производства является целесообразной при выборе технологических режимов. Создание такой модели позволит сократить затраты на подготовку производства и эксплуатацию, а также свести к минимуму

риски, связанные с появлением бракованной продукции [3].

Настоящая работа является продолжением работ по созданию комплексной ММПК анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах при различных условиях производства.

### 1 Экспериментальная часть

Исследование выполнялось для процесса анодирования неупрочняемых алюминиевых сплавов АМгб, АМгЗМ, АМц в растворе серной кислоты. Изучалось влияние плотности тока  $i_a$ , времени анодирования  $\tau$ , температуры  $T$  и концентрации серной кислоты в электролите  $C_k$  на толщину анодно-окисного покрытия.

Образцы-подложки размером  $100 \times 50 \times 2$  мм из алюминиевых сплавов АМгб, АМгЗМ, АМц в количестве 3 штук каждого монтировались совместно с деталями в различные места ванны анодирования. Перед процессом анодирования проводился анализ электролита на содержание серной кислоты. В процессе анодирования проводился автоматический контроль температуры, силы тока и времени анодирования при постоянном напряжении (потенциостатический режим анодирования). Методика проведения экспериментов подробно описана в работе [4].

Толщину покрытия на образцах определяли гравиметрическим методом с использованием электронных весов **ViBRA HTR-220CE** (Shinko Denshi Co. Ltd, Япония) с точностью до четвертого знака [5].

### 2 Математическое моделирование

Для построения математической модели толщины анодно-окисного покрытия в качестве варьируемых факторов были выбраны: анодная плотность тока  $i_a$ , продолжительность анодирования  $\tau$ , температура  $T$  и концентрация серной кислоты в электролите  $C_k$ . Моделирование проводилось в среде **MATLAB**. Граничные значения факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Планирование эксперимента процесса анодирования

| Контролируемые параметры | $i_a, \text{A/дм}^2$ | $\tau, \text{мин}$ | $T, \text{°C}$ | $C_k, \text{г/л}$ |
|--------------------------|----------------------|--------------------|----------------|-------------------|
| Верхний предел           | 3,5                  | 90                 | 25             | 230               |
| Нижний предел            | 0,5                  | 10                 | 15             | 60                |
| Рабочее значение         | 2                    | 50                 | 20             | 195               |

В качестве целевой функции  $\delta = f(i_a, \tau, T, C_k)$  была составлена модель множественной линейной регрессии. Методика моделирования состояла из следующих этапов:

- построение оценочной модели методом наименьших квадратов;
- выделение значимых факторов по критерию Стьюдента;
- проверка отсутствия значимости отброшенных факторов по п.2;
- построение доверительных интервалов для коэффициентов регрессии и дисперсии ошибок;
- удаление резко выделяющихся наблюдений (отсев выбросов);
- повторение пп. 2-4 (при наличии выбросов);
- проверка адекватности построенной модели по остаткам.

### 3 Результаты и их обсуждение

Разность рассчитанных толщин анодно-окисных покрытий на всех неупрочняемых сплавах, исследованных в данной работе, при различных технологических условиях не превышала  $\pm 1$  мкм, поэтому регрессионная модель строилась по общей совокупности значений толщин для сплавов АМг6, АМг3М и АМц.

Построенная модель имеет общий вид

$$\delta = b_0 + b_1 \cdot \tau + b_2 \cdot i_a + b_3 \cdot T + b_4 \cdot C_k + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $b_i$  – коэффициенты регрессии,  $\varepsilon$  – случайная величина (остатки).

Полученный вектор  $p$ -значений для проверки значимости коэффициентов регрессии показан в таблице 2.

Таблица 2 – Вектор  $p$ -значений

| Коэффициент регрессии | $p$ -значение         |
|-----------------------|-----------------------|
| $b_0$                 | $2,5 \times 10^{-6}$  |
| $b_1$                 | $1,0 \times 10^{-4}$  |
| $b_2$                 | $1,2 \times 10^{-15}$ |
| $b_3$                 | $3,5 \times 10^{-4}$  |
| $b_4$                 | $2,5 \times 10^{-3}$  |

Видно, что все коэффициенты имеют  $p$ -значение менее 0,01. Следовательно, статистически значимыми факторами являются все факторы, включенные в модель.

Доверительные интервалы для дисперсии ошибок рассчитывались по формуле

$$\frac{S}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m)} \leq \sigma^2 \leq \frac{S}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(n-m)}, \quad (2)$$

где  $S$  – остаточная сумма квадратов,

$\chi^2$  – квантиль нормального распределения,

$n$  – число измерений,

$m$  – число факторов.

Доверительные интервалы для коэффициентов регрессии рассчитывались как

$$b_i - t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m)s_i < \beta_i < b_i + t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m)s_i, \quad (3)$$

где  $b_i$  – вектор коэффициентов модели,

$t$  – квантиль Стьюдента,

$s_i$  – стандартная ошибка.

Для удаления резко выделяющихся выбросов строился график доверительных интервалов остатков (рисунок 1).

В таблице 3 представлены полученные коэффициенты уравнения регрессии и их доверительные интервалы с учетом выбросов.

Далее строим график прогнозных значений толщины анодно-окисного покрытия и доверительные интервалы для него (рисунок 2).

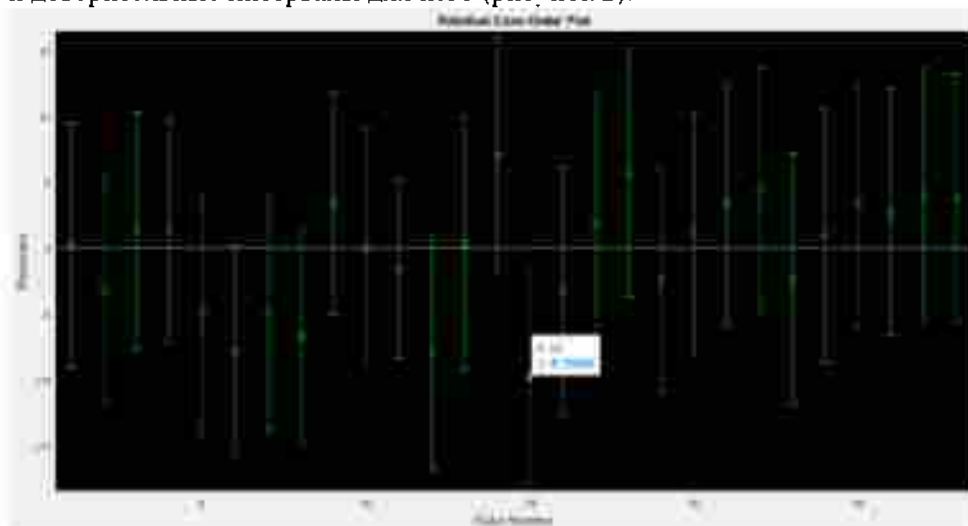


Рисунок 1 – График доверительных интервалов остатков

Таблица 3 – Коэффициенты регрессии математической модели и доверительные интервалы для них

| Коэффициент | Фактор при коэффициенте   | Значение в уравнении | Нижняя граница (b1) | Верхняя граница (b2) |
|-------------|---------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| $b_0$       | Свободный член            | -23,2711             | -35,1116            | -11,4305             |
| $b_1$       | $\tau$ , мин              | 0,2507               | 0,1370              | 0,3644               |
| $b_2$       | $i_a$ , А/дм <sup>2</sup> | 36,4325              | 32,3517             | 40,5133              |
| $b_3$       | $T$ , °С                  | -1,0545              | -1,4753             | -0,6338              |
| $b_4$       | $C_k$ , г/л               | 0,0315               | 0,0012              | 0,0617               |

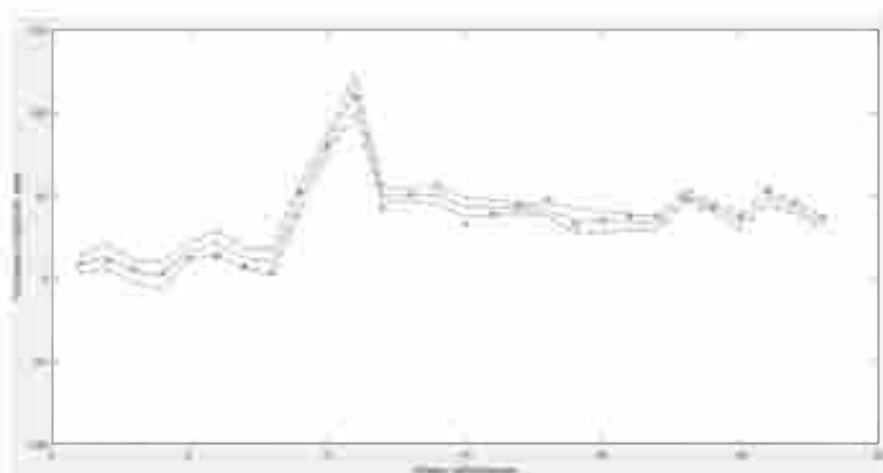


Рисунок 2 – График прогнозных значений толщины анодно-окисного покрытия с доверительными интервалами

Итоговая регрессионная модель имеет вид

$$\delta = -23,2711 + 0,2507 \cdot \tau + 36,4325 \cdot i_a - 1,0545 \cdot T + 0,0315 \cdot C_k + \varepsilon. \quad (4)$$

В регрессионной модели все коэффициенты регрессии статистически значимы на 5%-ом уровне значимости. Коэффициенты имеют ожидаемые, логически оправданные знаки. Интерпретация коэффициентов логична, имеет смысл.

Коэффициент при переменной  $i_a$  равный 36,4325 говорит о том, что при увеличении плотности тока анодирования на 1 А/дм<sup>2</sup> толщина анодно-окисного покрытия в среднем вырастет на 36,4325 мкм, при неизменных температуре, продолжительности анодирования и концентрации H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в электролите. Данный результат подтверждают литературные данные [1, 2, 4], что с ростом плотности тока увеличивается и скорость нанесения покрытия.

Коэффициент при переменной  $T$  равный -1,0545 свидетельствует о том, что с ростом температуры электролита на 1°C толщина анодно-окисного покрытия в среднем снизится на 1,0545 мкм, при постоянстве плотности тока, времени анодирования и концентрации H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в электролите.

Коэффициент при переменной  $\tau$  равный 0,2507 говорит о том, что при увеличении времени анодирования на 1 мин толщина покрытия в среднем увеличится на 0,2507 мкм, при неизменных температуре электролита, плотности тока и концентрации H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в электролите. Данное утверждение вполне логично: чем больше продолжительность анодного окисления, тем больше толщина формирующегося покрытия.

Коэффициент при переменной  $C_k$  равный 0,0315 говорит о том, что при увеличении концентрации H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в электролите на 1 г/л толщина покрытия в среднем увеличится на 0,0315 мкм, при неизменных температуре электролита, плотности тока и времени анодирования.

Свободный коэффициент также имеет логический смысл: при отсутствии анодной поляризации (отсутствие тока), будет происходить растворение покрытия в серной кислоте, что согласуется с литературными данными [2].

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,982$  означает, что 98,2% вариации толщины анодно-окисного покрытия объясняется четырьмя факторами, включенными в модель (температура электролита, плотность тока и время анодирования, концентрация серной кислоты в электролите).

Для проверки гипотезы о значимости уравнения в целом использована статистика Фишера  $F$ . Для принятия решения о значимости уравнения регрессии в целом необходимо сравнить расчетное значение  $F$ -статистики с ее критическим значением ( $F_{\text{крит}}$ ). Таким образом, расчетная статистика Фишера равная  $F(k-1, n-k) = F(3,24) = 305,56 > F_{\text{крит}} = 3,009$ , поэтому нулевая гипотеза о незначимости в целом уравнения регрессии отклоняется, и делаем вывод о статистической значимости уравнения регрессии в целом на 5%-ом уровне значимости.

Для оценки качества построенной модели рассчитывалась средняя ошибка аппроксимации по остаткам. Средняя ошибка аппроксимации регрессионной модели по остаткам составила 7,752%, что говорит об удовлетворительной точности построенной модели, поскольку не превышает 8-10%.

### Заключение

В работе проведено математическое моделирование толщины анодно-окисного покрытия на неупрочняемых алюминиевых сплавах с помощью пакета *MATLAB*. Получена эмпирическая зависимость, описывающая толщину анодно-окисного покрытия на алюминиевых сплавах АМг6, АМг3М, АМц в зависимости от технологических параметров процесса анодирования.

Показано, что определяющими параметрами для конкретного технологического процесса в определенной выборке являются плотность тока, состав электролита, температура и время анодирования.

Построенная модель может быть использована как составная часть комплексной математической модели для прогнозирования качественных характеристик анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах в зависимости от технологических параметров процесса анодирования.

Созданная на заключительном этапе исследования компьютерная модель прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах, которая будет включать в себя ситуационные данные реального производственного объекта, позволит создать виртуальный элемент цифрового двойника линии анодного оксидирования [3, 4, 6].

### Литература

- 1 Скопинцев В.Д. Оксидирование алюминия и его сплавов. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. – 120 с.
- 2 Мельников П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1979. – 296 с.
- 3 Ефремов А.Н. Архитектура математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах // Евразийский союз ученых. Серия: технические и физико-математические науки. – 2022, – т. 1, №10(103). – С.6-13.
- 4 Ефремов А.Н. Математическая модель прогнозирования толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг 6 // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2023. – №2. – С.38-52.
- 5 ПИ 1.2.616-2003. Сернокислотное анодное окисление алюминиевых сплавов: производственная инструкция / разработана ФГУП ВИАМ. 50 с.
- 6 Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.

Ефремов Андрей Николаевич – аспирант, Публичное акционерное общество «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург».

Область научных интересов: математическое и компьютерное моделирование, электрохимическое производство, цифровые двойники.

E-mail: andrey\_effremuss@mail.ru.

Почтовый адрес: 620110, г. Екатеринбург, ул. Анатолия Мехренцева, 42-277.

## MODELING OF ANODIC OXIDE COATING THICKNESS ON NON-HARDENING ALUMINIUM ALLOYS

A regression model of anode-oxide coating thickness of the on AMg6, AMg3 and AMc alloys depending on the main technological parameters is obtained. It is shown that the determining factors are the current density, electrolyte composition, temperature and anodizing time. An empirical formula describing the dependence of the coating thickness on the technological parameters is obtained. The adequacy of the constructed model is assessed and a graphical interpretation of the results is presented.

**Keywords:** regression model; coating thickness; aluminium alloys; anodic oxidation in sulfuric acid; technological parameters of anodizing.

Yefremov Andrey Nikolaevich – 3<sup>rd</sup>-year postgraduate, Independent non-profit organization of further vocational education «Science and education center of aerospace defense «Almaz – Antey», Public Joint Stock Company “Kalinin Machinery Plant, Yekaterinburg”, Yekaterinburg, Russian Federation, Head of the Technical Control Bureau  
Sciences research interests: mathematical and computer modeling, electrochemical production, digital twins



## **СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ДАННЫХ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА СЛОЖНОГО СБОРНОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ОСНАСТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА**

Вихрев И.А., Ломов П.А., Блинков О.Г.

*Проведение работ по повышению эффективности инструментального хозяйства непосредственно при планировании производства инструмента предопределяется его спецификой. На основании системного анализа разработана методология оценки параметров данных планирования производства сложного сборного металлорежущего инструмента и оснастки. Данная методология позволяет оценить вычисляемые показатели и на их основании построить систему исходных данных. На основании разработанной системы данных были предложены рекомендации по планированию и учету производства инструмента и оснастки на машиностроительном предприятии.*

Ключевые слова: инструментальное хозяйство, система данных, планирование производства, системный анализ, алгоритмы расчетов.

Рациональная организация инструментального хозяйства - важное условие высокой эффективности производства на предприятиях Концерна ВКО «Алмаз – Антей». Качество и прогрессивность инструмента, рациональная организация обеспечения им рабочих мест и объем затрат на инструмент в значительной мере определяют технико-экономические показатели предприятий. В современных условиях производства поиск, исследование и мобилизация резервов, связанных с деятельностью инструментального хозяйства предприятия, приобретают исключительно важное значение. Специфика инструментального хозяйства предопределяет проведение работ по повышению его эффективности непосредственно при производстве инструмента.

Инструментальное хозяйство имеет огромное значение для предприятий, производящих сложную, трудоемкую продукцию. Условия планирования и обеспечения предприятия сложным сборным металлорежущим инструментом и технологической оснасткой, являющимися зачастую уникальной продукцией, регламентированы основными правилами организации инструментального хозяйства на предприятии. В условиях единичного и мелкосерийного производства особенно ужесточаются требования к оперативно-производственному планированию.

В такой ситуации систематизация данных планирования производства сложного сборного металлорежущего инструмента и оснастки осуществляется с применением системного анализа. Системный анализ основан на процессах формулирования проблемы, моделирования системы для ее решения и самого решения проблемы. Данная методика используется при неполной, некорректной информации о возникшей проблеме [5-7].

На первом этапе выполняется сбор данных. Цель этапа состоит в создании общей совокупности показателей в виде общего документа или перечня. Источниками данных являются документы, инструкции нормативная документация предприятия, в которых указываются методы расчета параметров. Из источников выбираются понятия, смысловое наполнение показателей и формулы для расчета.

На втором этапе выполняется анализ взаимной зависимости показателей. Целью этапа является выявление проблем, связанных с несоответствием требованиям целостной системы показателей. На первом шаге строится матрица соответствия показателей между собой (таблица 1). В данной матрице по вертикали и горизонтали перечисляются показатели. На пересечении показателей стрелками (↑,↓) показывается направление зависимости. Направление зависимости определяется на основании смыслового наполнения и формулы показателей.

Т а б л и ц а 1 – Матрица соответствия показателей

| Показатели | П1 | П2 | П3 | П4 |
|------------|----|----|----|----|
| П1         |    | ↑  | ↑  |    |
| П2         | ↓  |    |    |    |
| П3         | ↓  |    |    | ↑  |
| П4         |    |    | ↓  |    |

Далее на основании таблицы составляется графическая зависимость в виде направленного графа. Вершинами графа являются сами показатели, стрелки показывают направление зависимости. Однако вершины располагаются по уровням (рисунок 1): на первом – показатели, которые не зависят от других и есть зависимые от них, на втором – показатели, зависящие от первого уровня и т. д.

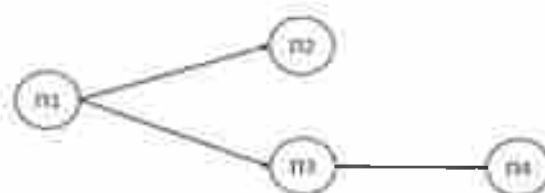


Рисунок 1 – Графическая зависимость показателей

Согласно распределению вершин, на графе определяются взаимные уровни зависимости. На рисунке изображена зависимость без системных ошибок. В качестве ошибок может быть (рисунок 2) наличие:

- отдельных частей графа, то есть разрывы в зависимости;
- циклических зависимостей, так как они не позволяют найти исходные данные для анализа,
- обратных связей, так как при измерении и расчете показателей должно быть направление движения или процесса.

Для устранения ошибок граф должен быть перестроен с помощью разделения показателей и выявления дополнительных связей.

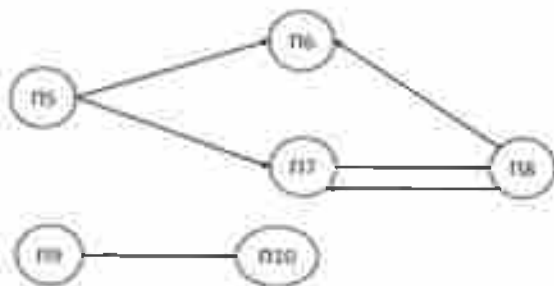


Рисунок 2 – Графическая зависимость с системными ошибками

На третьем этапе выявляются исходные данные. Целью этапа является определение списка исходных данных, обладающего свойством полноты и целостности информации. Выполняется анализ формул показателей, и выбираются данные, которые можно измерить или оценить в реальной системе без дополнительных вычислений. Выбранные данные группируются:

- согласно процессам на предприятии, то есть данные объединяются согласно времени их появления;
- согласно по выполняемым задачам, согласно смысловому наполнению показателей.

После выделения групп они сравниваются по масштабам данных, и анализируется их пересечение, то есть дублирование одних и тех же данных в разных группах. Для дальнейшей работы группы позиционируются согласно масштабу. Найденные пересечения позволяют убрать лишние данные и определить зависимости групп – в пределах одной вертикали допускается дублирование.

На четвертом этапе создается система данных. Целью этапа является определение минимума исходных данных и реструктурирование формул. Сначала на основании составленного списка на третьем этапе выбираются данные только из групп наименьшего масштаба. Далее данные структурируются в классификацию согласно требованиям к классификации системного анализа. Полученная классификация является системой и соответствует принципам целостности и полноты обеспечения данными для задач системы. Потом проводится изменение формул первоначальных показателей первого этапа. Найденные формулы позволяют упростить расчеты, избавиться от избыточности оценочных показателей. Последним шагом составленные показатели проверяются на реальных ситуациях в системе.

Результатами применения методики являются:

- система данных для обеспечения полной информации и контроля выполнения технологических операций в виде классификации;
- скорректированная структура показателей, состоящая из минимального их количества и взаимных зависимостей между ними;
- новые алгоритмы расчетов, позволяющие сократить трудоемкость сбора информации и вычисления показателей.

Для оценки продукции серийного типа в литературе предлагаются системы показателей. Наиболее полно они представлены в изданиях ГОСТ. Собранные показатели были либо упомянуты списком, либо были приведены формулы расчетов [1-

4]. По многим параметрам формулы не приводятся. На основании их наличия распределены уровни иерархии, так как формула отражает функциональную зависимость.

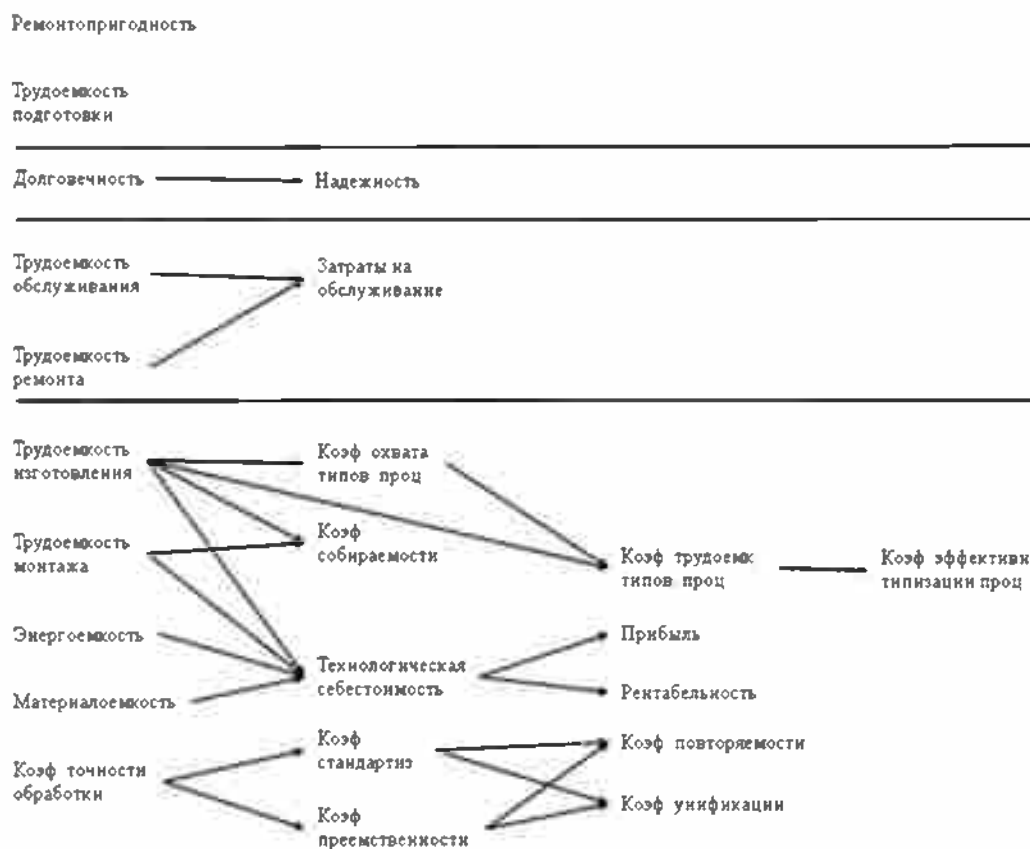


Рисунок 3 – Граф зависимости показателей продукции

Согласно предлагаемой методике был построен граф зависимости показателей продукции друг от друга. На рисунке 3 показаны уровни зависимости показателей. Данная схема разделилась на три несвязанные между собой области, что говорит о кусочном представлении информации.

В данном распределении видны ошибки, связанные с нарушением принципов системного анализа и требований сбора первичной информации.

Структурные ошибки:

- отдельные группы не описаны параметрами (требования, показатели эксплуатации, затраты на утилизацию);
- существуют коэффициенты, одинаковые по формулам (коэффициенты стандартизации и технологической преемственности, унификации и конструкторской преемственности).

Информационные ошибки:

- полученные показатели не отражают процесс управления производством и не показывают степень готовности продукции;
- собранные показатели не являются исходными данными для оценки, они содержат уже итоги всего процесса.

Таким образом, полученная классификация не является полной и корректной. Для оценки уникальной продукции необходима классификация, удовлетворяющая следующим требованиям:

- на нижнем уровне – конкретные данные, являющиеся исходными для расчета параметров;
- в разных ветках данные не должны дублироваться;
- данные должны давать полную информацию о процессе производства уникальной продукции.

Для описания уникальной продукции предлагаются следующие параметры:

|   |  |
|---|--|
| срок службы;                                  | трудоемкость обработки при индивидуальных процессах; |
| кол-во отказов (сбоев);                       | трудоемкость сборки;                                 |
| время простоя;                                | трудоемкость монтажа;                                |
| энергоёмкость;                                | трудоемкость подготовки к функционированию;          |
| материалоемкость;                             | трудоемкость обслуживания;                           |
| число оригинальных деталей;                   | трудоемкость ремонта;                                |
| число стандартных деталей;                    | ремонтпригодность.                                   |
| число деталей по типовым процессам;           |  |
| трудоемкость обработки при типовых процессах; |  |

Указанные параметры содержат исходную информацию для оценки и позволяют рассчитать показатели оценки уникальной продукции.

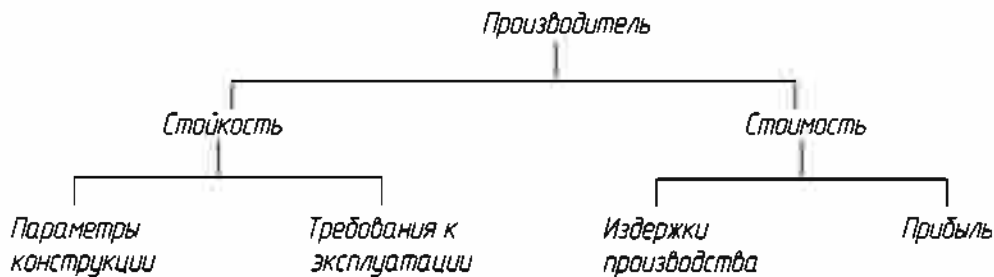


Рисунок 4 – Классификация исходных данных для уникальной продукции

На рисунке 4 предлагается классификация данных. На ее основании можно обеспечить:

- сбор и хранение данных для разных видов уникальной продукции;
- расчет и оценку показателей – при производстве.

В классификации параметры производителя разбиты по направлениям «Стойкость и стоимость». Далее стойкость делится на параметры конструкции и требования к эксплуатации. Стоимость делится на издержки производства и прибыль.

Так как потребительские свойства закладываются в процессе производства, и основное внимание сосредотачивается на создании продукции, выбранные данные охватывают точку зрения производителя. Следовательно, параметры потребителя описаны недостаточно (так как не являются самоцелью).



Рисунок 5 – Структура данных для описания уникальной продукции

На рисунке 5 предлагается разработанная структура данных на основании классификации. Структура состоит из 10 таблиц: «Вид ресурса», «Оборудование», «Функции», «Продукция», «Комплектующие», «Цены», «Нормы расходов», «Комплект», «Работы» и «Эффект». В каждой таблице определены коды (\*), обеспечивающие порядок следования записей и связи с другими таблицами.

Предлагаемая структура подразумевает следующее.

Таблицы «Вид ресурса», «Функции», «Оборудование», «Комплектующие» являются справочными и первоначальными. Описывают данные о возможностях предприятия. Таблица «Цены» описывает первоначальную стоимость потребляемых ресурсов, таблица «Нормы расходов» содержит рассчитанные нормы по расходу ресурсов для каждой функции и используемого оборудования. Данные шесть таблиц являются справочной составляющей информационной базой предприятия, на их основе собирается информация об уникальной продукции.

Данные таблицы «Продукция» заполняется вместе с потребителем и содержит все характеристики продукции, необходимые для разработки продукции. Таблица «Комплект» позволяет сформировать комплектацию продукции на основании характеристик и функций.

Таблица «Работа» позволяет составить план для создания уникальной продукции, а таблица «Эффект» – собрать данные от клиента и учесть не только затраты, но и пользу от применения уникальной продукции.

Предлагаемая схема данных содержит справочную и промежуточную информацию. К справочной относится информация, хранимая на предприятии независимо от данного заказа. В полученной схеме это: «Вид ресурса», «Оборудование», «Цены», «Функции», «Нормы расходов». Однако, в процессе выполнения заказа, данные таблиц могут корректироваться. Таблицы «Продукция», «Комплект», «Работы», «Эффект» относятся к промежуточной информации – они заполняются по мере создания уникальной продукции.

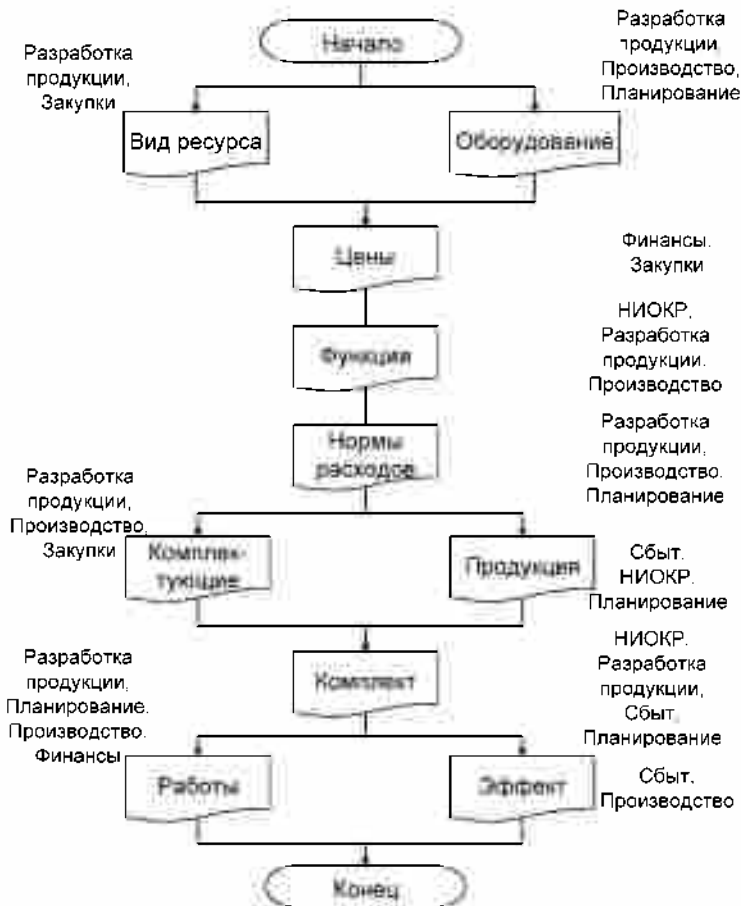


Рисунок 6 – Алгоритм заполнения таблиц исходных данных

На рисунке 6 представлен алгоритм заполнения таблиц. Данный алгоритм получен на основании типов информации (сначала справочная, потом промежуточная) и уровней зависимости таблиц друг от друга. Дополнительно на алгоритме изображены названия функциональных подразделений, отвечающие за данные. На основании рисунка видно, что большая часть таблиц заполняется совместно несколькими подразделениями, поскольку каждая таблица описывает объекты по нескольким характеристикам. При описании модели процессов таблицы данных преобразуются в вид документов. За основу видов документов была взята проектная составляющая структуры предприятия.

При распределении ответственности за документы в качестве «Подразделения – источник документа» допускается только одно подразделение. Но в частных случаях, если информацию документа можно разделить на части – ответственных несколько. На основании таблицы 2 получено, что максимальная ответственность ложится на подразделение «Разработка продукции» (три документа), так как в рамках подразделения создаются основные документы, описывающие уникальную продукцию и процесс ее производства. По два документа создают «Сбыт», «Закупки». По одному – «Производство» и «Финансы». Относительно исходящих документов сохраняется аналогичное распределение ответственности.

Таблица 2 – Описание документов для создания уникальной продукции

| Название документа    | Цели  | Подразделение – источник документа     | Задача                                      | Подразделение – приемник документа     |
|-----------------------|---|--|---|--|
| Заказ                 | Определение условий и ограничений от клиента                          | Сбыт                                   | Создание прототипа                          | НИОКР, разработка продукции            |
| Договор               | Формирование требований к уникальной продукции, предварительная цена  | Сбыт, закупки                          | Создание прототипа, расчет себестоимости    | Планирование, разработка продукции     |
| Приложение к договору | Уточнение цены и условий оплаты                                       | Закупки, финансы, разработка продукции | Расчет цены                                 | Закупки, финансы, разработка продукции |
| План выпуска          | Формирование сроков, потребностей в ресурсах и регламент производства | Производство                           | Разработка технологии, расчет себестоимости | Сбыт                                   |

На основании разработанной системы данных были предложены рекомендации по изменению планирования и учета производства сложного сборного металло-режущего инструмента и оснастки на машиностроительном предприятии Концерна ВКО «Алмаз – Антей». Основой для анализа планирования производства является форма плана производства - Таблица 3.

В связи с тем, что планово-учетной единицей является узел (заказ, если он не разбит на узлы), план производства устанавливается укрупнено в узлах.

Колонки (1-3) заполняются на основании справочника «Продукция», (4-6), (7-9) – «Комплекующие», «Комплект» и «Функции». Длительность циклов (10) и (15)



определяется на основании справочника «Нормы расходов» и данных о продолжительности выполнения работ по кооперации с учетом коэффициента соотношения производственного и технологического циклов – «Работы».

Таблица 3 – План производства

| Код контракта | Заказ      |              | Узел               |              |        | Ведущая деталь |            |                       |                        |                       |   | Дата выпуска | % готовности на конец | Цикл сборки узла, раб. дн. | Трудоёмкость узла, нормо-час. | Дата запуска | % готовности на начало | % готовности фактически |
|---------------|------------|--------------|--------------------|--------------|--------|----------------|------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---|--------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------|------------------------|-------------------------|
|               | Код заказа | Наименование | код / спецификация | Наименование | Кол-во | Наименование   | Код детали | Применяемость на узел | Производство, раб. дн. | цикл, всего, раб. дн. | Продолжительность услуг по кооперации, раб. дн. |              |                       |                            |                               |              |                        |                         |
| 1             | 2          | 3            | 4                  | 5            | 6      | 7              | 8          | 9                     | 10                     | 11                    | 12  | 13           | 14                    | 15                         | 16                            | 17           | 18                     | 19                      |
|               |            |              |                    |              |        |                |            |                       |                        |                       |   |              |                       |                            |                               |              |                        |                         |

Производственный цикл детали = Технологическая трудоёмкость детали \* 2 / 8 + Продолжительность работ по кооперации.

Цикл сборки узла = Технологическая трудоёмкость сборки узла \* 2/8.

Дата выпуска (13) указывается на основании графика прохождения контракта – таблица «Работы», а Дата запуска (17) – как разница даты выпуска и длительности производственных циклов ведущей детали и сборки узла ((17)=(13)-(10)-(15)).

С учетом фактической периодичности контроля за прохождением производства (неделя), даты запуска и выпуска ((17), (13)) должны устанавливаться с аналогичной детализацией, а не совпадать с началом и окончанием планового периода.

По комплектам деталей, запущенным в предыдущем периоде проставляется % готовности на начало из отчета предыдущего месяца (18) – если дата выпуска выходит за пределы планового периода, то указывается % готовности, определенный по количеству узлов (заказов), трудоёмкости узла и доли выполненной длительности цикла узла без учета продолжительности услуг по кооперации.

Если дата выпуска – в пределах планового периода, то процент готовности – 100%.

Для планирования производства необходимо по каждому узлу (заказу, если он не разбит на узлы) выделить ведущую деталь (сборочную единицу) с максимальной продолжительностью производственного цикла (с учетом продолжительности выполнения услуг по кооперации). Длительность цикла изготовления ведущей детали в рабочих днях определяется на основании справочника «Нормы расходов», «Работы» и данных о продолжительности выполнения работ по кооперации. Отнесение детали узла к «ведущей детали» фиксируется в справочнике «Комплект».

На основании разработанной системы данных были разработаны рекомендации по изменению планирования и учета производства сложного сборного металло-режущего инструмента и оснастки на машиностроительном предприятии по выпус-

ку оборудования для Концерна ВКО «Алмаз – Антей». Предлагаемая методика также может быть использована для построения системы данных производства единичной машиностроительной продукции с длительным циклом.

Список литературы:

- 1 Бухалков М.И. Организация производства на предприятиях машиностроения: учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 511 с.
- 2 ГОСТ 14.201-83. Обеспечение технологичности конструкции изделий.
- 3 Егорова Т.А. Организация производства на предприятиях машиностроения. – СПб.: Питер, 2014. – 304 с.
- 4 Новицкий Н.И., Пашуто В.П. Организация, планирование и управление производством: Учеб.-мет. пособие / Под ред. Н.И.Новицкого. – М.: Финансы и статистика, 2017. – 576 с.
- 5 Санников А.А., Куцубина Н.В. Системный анализ при принятии решений: учебное пособие. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. – 137 с.
- 6 Смирницкий Е.К. Экономические показатели бизнеса. – М.: Экзамен, 2022. – 512 с.
- 7 Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник / Под ред. В.Н.Волковой, А.А.Емельянова. – М.: Финансы и статистика, 2016. – 848 с.

Вихрев Иван Андреевич – инженер-конструктор 2 категории, АО «ОКБ «Новатор», г.Екатеринбург.

Область научных интересов: металлорежущий инструмент, организация производства.

E-mail: bacardivan@gmail.com

Ломов Павел Александрович – инженер-конструктор 3 категории, АО «ОКБ «Новатор», г.Екатеринбург.

Область научных интересов: металлорежущий инструмент, организация производства.

E-mail: lomov-p.a@mail.com

Блинков Олег Геннадьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой, УрФУ, г. Екатеринбург.

Область научных интересов: руководитель в управлении; теории менеджмента, организация производства.

E-mail: o.g.blinkov@urfu.ru

## SYSTEMATIZATION OF PLANNING DATA PRODUCTION OF COMPLEX PREFABRICATED METAL CUTTING TOOLS AND EQUIPMENT WITH USING SYSTEM ANALYSIS

Carrying out work to improve the efficiency of the tool economy directly when planning

the production of a tool is predetermined by its specifics. Based on system analysis, a methodology has been developed for estimating the parameters of planning data for the production of complex prefabricated metal-cutting tools and equipment. This methodology allows you to evaluate the calculated indicators and, on their basis, build a system of initial data. Based on the developed data system, recommendations were proposed for planning and accounting for the production of tools and equipment at a machine-building enterprise.

Keywords: tool economy, data system, production planning, system analysis, calculation algorithms.

Vikhrev Ivan Andreevich – design engineer of the 2nd category of JSC OKB "Novator", Yekaterinburg.

Research interests: metal-cutting tools, organization of production.

Lomov Pavel Aleksandrovich – design engineer of the 3rd category of JSC OKB Novator, Yekaterinburg.

Research interests: metal-cutting tools, organization of production.

Blinkov Oleg Gennadievich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Ural Federal University of Ekaterinburg.

Research interests: manager in management; management theory, production organization.

## РАЗВИТИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ИЗДЕЛИЙ ОБОРОННОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Афанасьев В.Б., Медведев В.М., Остапенко С.Н., Рязанский В.П.

*Многомерные статистические методы имеют важное значение в статистическом управлении качеством продукции и управления процессом производства. Применение статистических методов управления качеством изделий оборонной продукции основано на учете нескольких признаков и их взаимной связи. Это определяет актуальность применения многомерных моделей распределения. В статье кратко рассмотрены основные многомерные распределения. Важнейшим из них обоснованно является многомерное нормальное распределение. Однако, существуют наборы данных, которые неудовлетворительно описываются многомерным нормальным распределением. В статье предложено двумерное распределение. Предложенный метод построения двумерного распределения раскрывает простой и ясный смысл введенных параметров. Предложенная модель удобна для использования в приложении MATLAB и средах разработки для языка программирования PYTHON. Рассмотрено применение данной модели к наборам данных с признаками изделий оборонной продукции.*

*Ключевые слова:* статистическое управление качеством; многомерные статистические методы; многомерное нормальное распределение; многомерное распределение Гаусса-Лапласа.

Анализ литературы [1-2] показал, что на данный момент применяются следующие многомерные распределения: два дискретных – полиномиальное, многомерное гипергеометрическое и шесть непрерывных: нормальное распределение, многомерное t-распределение, распределение Дирихле на симплексе, распределение Уишарта случайной матрицы, двумерное распределение Парето, многомерное равномерное распределение.

Распределения, за исключением нормального, имеют достаточно узкое применение. Методы, основанные на многомерном нормальном распределении, нашли широкое применение. Распространение этих методов основано на фундаментальных результатах: центральной предельной теореме и обобщенной предельной теореме для многомерного нормального распределения [1]. С другой стороны, тот же автор отмечает [1], что существуют многомерные статистические проблемы, которые не могут быть описаны моделью нормального распределения.

Доказательства того, что не все совместные распределения признаков могут быть описаны при помощи многомерного нормального закона, широко представлены в работах, начиная с [Mills(1927)]. [2]. Основной вывод многих работ в том, что многомерное нормальное распределение не является хорошей моделью для описа-

ния совместного распределения многих экономических и финансовых показателей.

Проведенные исследования на выборках с несколькими признаками изделий оборонной продукции (ОП) также подтверждают выводы о том, что двумерная модель нормального распределения не всегда в полной мере объясняет эти данные.

Таким образом, вопросы построения двумерного распределения для точного описания распределения признаков изделий ОП имеют как практическое, так и теоретическое значение.

Стандартное распределение Гаусса-Лапласа имеет следующую плотность

$$\omega(x) = (b_1 + b_2)^{-1} \left\{ h(-x) \cdot \exp\left(-\left|\frac{x}{\sqrt{2}}\right|^{\beta_1}\right) + h(x) \cdot \exp\left(-\left|\frac{x}{\sqrt{2}}\right|^{\beta_2}\right) \right\}. \quad (1)$$

Распределение имеет два параметра формы  $\beta_1, \beta_2 > 0$ .

Рассмотрим двумерный случайный вектор  $X = (X_1, X_2)^T$ , где  $X_1, X_2$  – независимые СВ со стандартным  $GL$ -распределением. Перейдем от случайного вектора к случайному вектору  $Y = (Y_1, Y_2)^T$  с помощью невырожденного линейного преобразования с матрицей

$$A = \begin{bmatrix} \sigma_1 \cdot \cos \varphi & \sigma_1 \cdot \sin \varphi \\ \sigma_2 \cdot \cos(\varphi + \theta) & \sigma_2 \cdot \sin(\varphi + \theta) \end{bmatrix}$$

и вектором сдвига  $\mu = (\mu_1, \mu_2)^T$ :

$$Y = AX + \mu.$$

Тогда совместная плотность вектора  $Y = (Y_1, Y_2)^T$  такова

$$p_Y(y_1, y_2) = p_X(x_1, x_2) \cdot |J| = \omega(x_1, \beta_{11}, \beta_{12}) \cdot \omega(x_2, \beta_{21}, \beta_{22}) \cdot |J| \quad (4)$$

где  $\omega(x_1, \beta_{11}, \beta_{12}), \omega(x_2, \beta_{21}, \beta_{22})$  – одномерные плотности стандартного распределения СВ  $X_1, X_2$ ,

$|J| = 1 / (\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot |\sin \theta|)$  – Якобиан преобразования.

В исследовании использованы данные с измерениями некоторых признаков изделий ОП. В качестве модели распределения принято распределение Гаусса-Лапласа. Точечные оценки параметров распределения получены с помощью метода максимального правдоподобия. Для выборки  $(a_1, \dots, a_n)$ , где  $a_k = (y_{1k}, y_{2k})$ ,  $(k = 1, \dots, 1000)$  вычислен вектор точечных оценок параметров со значениями:

$$\mu_1 = 27,769, \mu_2 = 27,700, \sigma_1 = 0,0048, \sigma_2 = 0,0046, \varphi = -0,816, \theta = 1,304,$$

$$\beta_{11} = 3,31, \beta_{12} = 2,26, \beta_{21} = 3,51, \beta_{22} = 3,78.$$

Анализ значений оценок параметров позволяет говорить о положительной корреляции с коэффициентом  $\rho = \cos \theta = \cos 1,304 \approx 0,267$ . Значения всех оценок параметров формы  $\beta_k$ , кроме  $\beta_{12}$  достаточно сильно отличаются от двух, того значения при котором распределение следует принять нормальным.

**Выводы**

Построено одномерное стандартное распределение Гаусса-Лапласа с двумя параметрами формы. На основе стандартного распределения построено двумерное совместное распределение. При этом выявлены два параметра, имеющие простой геометрический смысл и определяющие меру зависимости компонент случайного вектора.

Рассмотрено применение статистических методов управления качеством изделий ОП на основе предложенной двумерной модели распределения. Проведено исследование данных с измерениями некоторых признаков изделий ОП. Получены точечные оценки параметров распределения методом максимального правдоподобия. Использование данного распределения позволяет инженеру-исследователю максимально точно аппроксимировать распределение реальных выборок с признаками изделий оборонной продукции предприятий.

**Литература**

1 Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. – М.: Ги Физико-математической литературы, 1963. – 500 с.

2 Айвазян С.А., Фантаццини Д. Эконометрика-2: продвинутый курс с приложениями в финансах. – М.: Магистр: Инфра-М, 2014. – 944 с.

3 Mills F.C., The Behavior of Prices, National Bureau of Economic Research, New York, 1927.

4 Афанасьев В.Б., Медведев В.М., Остапенко С.Н., Рязанский В.П. Совершенствование статистических методов исследования в системе управления качеством и надёжностью продукции предприятия // Известия ТулГУ. – 2021. – №7.

Афанасьев Виктор Борисович – кандидат технических наук, начальник отдела, АО «ГосНИИП», г.Москва.

Область научных интересов: управление качеством, организация производства.

E-mail: vicbor54@bk.ru

Медведев Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор, АО «ГосНИИП», г.Москва.

Область научных интересов: управление качеством, организация производства.

E-mail: corund@gosniip.ru

Остапенко Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, помощник генерального директора, АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»», г.Москва.

Область научных интересов: управление качеством, организация производства.

E-mail: antey@almaz-antey.ru

Рязанский Валерий Павлович – ведущий инженер-математик, АО «ГосНИИП», г.Москва.

Область научных интересов: управление качеством, организация производства.

E-mail: kot-aldo@yandex.ru

**DEVELOPMENT OF STATISTICAL METHODS FOR QUALITY MANAGEMENT OF DEFENSE PRODUCTS ON THE BASIS OF A TWO-DIMENSIONAL DISTRIBUTION MODEL**

Multivariate statistical methods are essential in statistical product quality management and process control. The application of statistical methods for quality control of defense products is based on taking into account several features and their interconnection. This determines the relevance of the application of multidimensional distribution models. The article briefly discusses the main multidimensional distributions. The most important of them is the multivariate normal distribution. However, there are data sets that are not well described by the multivariate normal distribution. The article proposes a two-dimensional distribution. The proposed method for constructing a two-dimensional distribution reveals a simple and clear meaning of the introduced parameters. The proposed model is convenient for use in the MATLAB application and development environments for the PYTHON programming language. The application of this model to data sets with features of defense products is considered.

Key words: statistical quality control, multivariate statistical methods, multivariate normal distribution, multivariate Gauss-Laplace distribution.

Afanasyev Viktor Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Head of Department, JSC “GosNIIP”, Moscow.

Area of scientific interests: quality management, production organization.

Medvedev Vladimir Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, General Director, JSC “GosNIIP”, Moscow.

Area of scientific interests: quality management, production organization.

Ostapenko Sergey Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Assistant General Director, JSC “Concern VKO “Almaz-Antey””, Moscow.

Area of scientific interests: quality management, production organization.

Ryazansky Valery Pavlovich – leading engineer-mathematician, JSC “GosNIIP”, Moscow.

Area of scientific interests: quality management, production organization.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ СЛЕДЯЩИХ ПРИВОДОВ НА УПРУГИХ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Арбиев А.К.

*Статья посвящена теории и практике применения силовых бесштоковых пневмоцилиндров (СБШЦ) типа упругого трубчатого элемента с управляемой деформацией (УТЭУД) в следящих пневмоприводах (ПП). Рассмотрены принцип действия, а также положительные и отрицательные стороны наиболее распространенных конструкций двигателей малых перемещений (ДМП). Сформулирована и рассмотрена конструкция ДМП, где в качестве силовой части используется силовой бесштоковый пневмоцилиндр типа УТЭУД и реализована замкнутая по расходу рабочего тела система питания.*

**Ключевые слова:** Силовой бесштоковый пневмоцилиндр, упругий трубчатый элемент с управляемой деформацией, двигатель малых перемещений, пневмопривод малых перемещений, замкнутая по расходу система питания пневмопривода.

### Введение

Ряд областей современного производства и научных исследований, предъявляют высокие требования к системам и к приводам малых перемещений. Первоочередной проблемой является повышение точности позиционирования. Субмикронный диапазон погрешностей линейного позиционирования и секундный диапазон для угловых перемещений характерен для современных металлообрабатывающих станков и роботов манипуляторов, внедряемых в поточное производство и сборку миниатюрных деталей (микросхем, часов и т.д.).

Еще большие проблемы возникают в системах, где наряду с точностью позиционирования предъявляются высокие требования по быстродействию. К ним относятся системы автоматической юстировки и коррекции взаимного положения оптических элементов различных оптико-механических приборов, квантовых генераторов, интерферометров и т.д. В таких системах исполнительные устройства должны иметь характеристики, при которых бы обеспечивалась полоса пропускания от 0 до 100 Гц и выше, причем обязательными условиями эффективности их применения являются обеспечение минимальных массогабаритных показателей и минимизация промежуточных кинематических связей.

Во всех перечисленных случаях, существующие задачи не могут быть решены без тщательного исследования специальных исполнительных устройств (ИУ), обеспечивающих малые линейные или угловые перемещения и воздействующих на объект управления непосредственно, без промежуточных связей.



## 1 Классификация ДМП

Традиционные способы организации малых перемещений с использованием электромеханических устройств с механическими передачами не дают желаемый результат в силу таких недостатков как наличие люфтов, зон нечувствительности, температурной погрешности, толчкообразных перемещений, сложности и высокой себестоимости ИУ. В связи с этим стало очевидно, что необходимы ИУ, выполненные на иной физической основе. Большинство из перечисленных задач решается применением специальных ИУ, работающих на пьезоэлектрическом и магнито-стрикционном (пьезомагнитном) эффектах. Такие устройства хорошо изучены и легко внедряются в системы различного назначения. Однако существует разновидность ИУ, обойденная вниманием со стороны автоматизации управления. Эти ИУ носят название упругих трубчатых элементов с управляемой деформацией (УТЭУД) и основаны на эффекте распрямления сплюсненной кривой трубки под действием давления.

Электронное приборостроение является одним из наиболее быстрых развивающихся направлений в техники. В эпоху полупроводниковых приборов было создано ряд устройств, которые позволяли эффективно автоматизировать технологические процессы в приборостроении.

### 1.1 Электромагнитные ДМП

Двигатели, выполненные как втяжные или поворотные магниты, иногда находят применение в системах, где требуется обработка медленных воздействий (например, в станкостроении для управления гидравлическими и пневматическими устройствами дроссельного регулирования). Однако сконструировать сравнительно простое электромагнитное устройство, у которого тяговое усилие слабо зависит от перемещения, невозможно. Кроме того, такой двигатель весьма инерционен из-за значительной массы тяговой катушки, а полоса пропускания управляющего сигнала составляет 0-20 Гц.

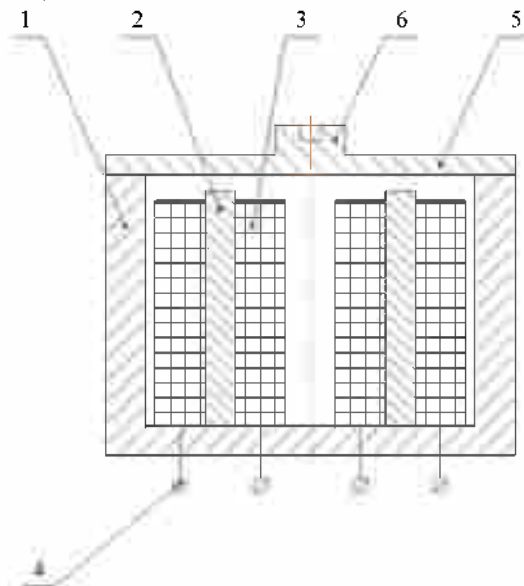


Рисунок 1 – Устройство для угловой модуляции:

1 – корпус; 2 – стержни; 3 – обмотка; 4 – выводы; 5 – подвижная мембрана; 6 – шток

Положительное качество данного ИУ – обеспечение относительно больших перемещений, определяемых ходом электромагнита (до нескольких миллиметров). В большинстве случаев в прецизионных установках наряду с малыми перемещениями необходимы и относительно большие юстировочные перемещения [6].

### 1.2 Магнитострикционные ДМП

Двигатели, основанные на магнитострикционном эффекте, обладают высокой механической прочностью, большими рабочими усилиями и высокой чувствительностью. Этот эффект заключается в изменении длины образцов из пьезомагнитных материалов в результате действия на них больших внешних магнитных полей. Такая упругая деформация является следствием движения доменов. Магнитострикционными являются ферромагнитные металлы (никель) и сплавы (на основе железа, кобальта, платины и др.), а также керамические ферриты, образцы из которых обладают наиболее выраженной способностью изменять размеры при изменении намагниченности.

Количественно эффект магнитострикции выражается в отношении приращения длины к исходной длине образца – относительной магнитострикции. Максимальное значение относительной магнитострикции (магнитострикция насыщения) для большинства пьезомагнетиков лежит в пределах  $(20-90) \cdot 10^{-6}$ . Так как силы магнитострикционной деформации уравниваются внутренними силами упругости материала, рабочий элемент ДМП может совершать движения в обоих направлениях и занимать любое промежуточное положение. Таким образом, нет необходимости в уравнивающих устройствах, без которых не обойтись в электромагнитных двигателях.

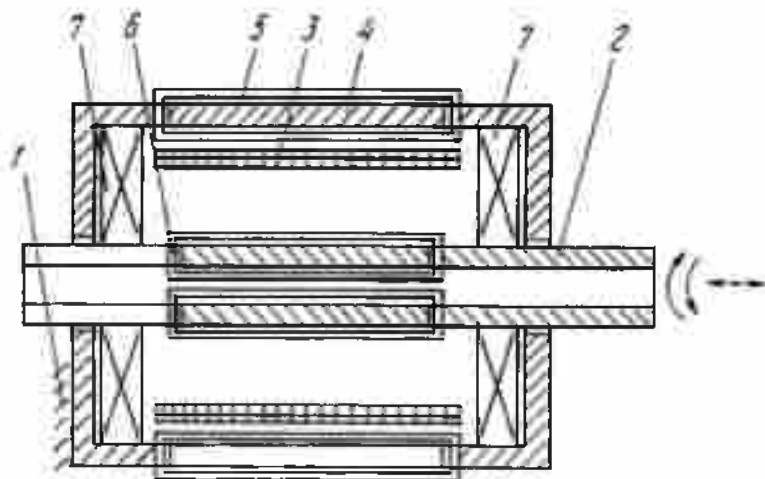


Рисунок 2 – Магнитострикционный шаговый двигатель

Устройство содержит основание 1, внутренний полый цилиндрический магнитострикционный элемент 2, обмотку продольного намагничивания 3, закрепленную в кожухе 4 из магнитострикционного материала, который жестко закреплен на основании 1, одна обмотка циркулярного намагничивания 5 охватывает кожух, а другая

6 внутренний элемент. С помощью двух зажимов 7, жестко закрепленных по концам внутри магнитоотрицательного кожуха, внутренний цилиндрический магнитоотрицательный элемент связан с кожухом 4.

К минусам магнитоотрицательных ДМП относят малую величину магнитоотрицательности, необходимость создания сильных магнитных полей, зависимость от температуры. Для устранения указанных недостатков используется термо- и кинематическая стабилизация. Суть последней заключается во взаимодействии элементов двигателя, выполненных из материалов с коэффициентами магнитоотрицательности разных знаков, при котором магнитоотрицательные перемещения складываются, а температурные вычитаются.

Кроме того, ДМП на магнитоотрицательном эффекте имеют узкую полосу пропускания (0-30 Гц), а их статические характеристики обладают явно выраженным гистерезисом [8].

### 1.3 Пьезоэлектрические ДМП

На основе пьезоэлектрических материалов строятся сейсмоприемники, реле, электропневматические устройства, дефлекторы, юстировочные устройства для оптических квантовых генераторов и интерферометров, двигатели малых перемещений в различных прецизионных станках и приборах. Популярность пьезоэлектрических устройств объясняется стабильностью свойств в широком интервале температур, высокой механической прочностью, способностью обеспечивать перемещение от долей микрона до долей миллиметра в частотном диапазоне до нескольких кГц.

Основным узлом пьезодвигателя является пьезоэлемент, который выполняется из специального материала (например, пьезокерамики). Пьезоэлектрическими материалами называют кристаллические вещества, в которых под действием механических напряжений возникает спонтанная поляризация – явление прямого пьезоэффекта. Пьезоэлектрические устройства работают на обратном пьезоэффекте, который заключается в том, что внешнее электрическое поле вызывает механические напряжения внутри материала, которые приводят к изменению его геометрических размеров.

В основу большинства пьезодвигателей заложены три базовые конструкции: составная пакетная конструкция, биморфная конструкция и дифференциальная конструкция.

Пакетная конструкция представляет собой набор из отдельных пьезоэлементов (шайб, дисков, цилиндров), число которых может находиться в пределах от 50 до 200 шт. и определяется требуемым диапазоном перемещений. Пакет формируют склеиванием однополярных поверхностей, соединяя их механически последовательно, а электрически параллельно.

Пьезопакет 2 состоит из пьезодисков и силопередающих прокладок 4. Он устанавливается в корпусе 1 между винтом 3 и штоком 7. Механический контакт штока и винта с силопередающими прокладками осуществляется через стальные центрирующие шарики 5. Тарелочная пружина 6 обеспечивает предварительное сжатие пакета при повороте винта 3. Такой двигатель способен развивать достаточно большие усилия (до 200 Н) и служит для линейных микроперемещений объектов

с достаточно большой массой (десятки кг). Его частотный диапазон ограничен собственным электромеханическим резонансом (1-2 кГц), величина которого зависит от массы перемещаемого объекта. Диапазон перемещения зависит от количества элементов и напряжения управления. Статическая характеристика имеет гистерезисный характер, значение которого находится в пределах 10-30% и определяется главным образом свойствами пьезоматериала, степенью предварительного сжатия пакета и величиной управляющего напряжения.

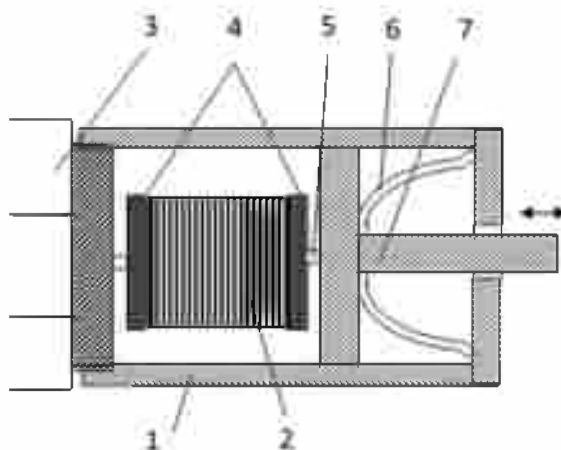


Рисунок 3 – Принципиальная схема пьезопривода пакетной конструкции

Биморфная конструкция используется для увеличения диапазона линейных перемещений (до ед. мм) и получения угловых перемещений объектов небольшой массы до десятков грамм. Простейшая биморфная конструкция представляет собой две склеенные между собой пьезоэлектрические пластины, напряжение управления на которые подается таким образом, чтобы одна из них сокращалась, а другая расширялась. При этом происходит изгиб всей конструкции (по аналогии с биметаллической пластиной).

Дифференциальная конструкция применяется при необходимости компенсировать температурную погрешность, выраженную тепловым расширением рабочего тела, и расширить диапазон перемещений без существенного увеличения управляющего напряжения и габаритов двигателя. Такая конструкция может быть построена как на элементах пакетного типа, так и на биморфных элементах.

Рабочий элемент 2 состоит из пьезоэлементов, выполненных в виде шайб, а элемент 3 – из колец. Оба элемента крепятся к подвижному основанию 1, а элемент 3 своим вторым торцом жестко закреплен на неподвижном основании 4. Свободный торец элемента 2 совершает рабочие перемещения. Управляющее напряжение подается одновременно на оба элемента так, что элемент 2 – расширяется, а 3 – сжимается. Рабочее перемещение относительно неподвижного основания будет результатом суммирования величин их деформаций. Тепловые деформации будут вычитаться. При точном расчете габаритов пьезоэлементов можно добиться полной компенсации температурной погрешности.

Следует отметить, что все существующие пьезоматериалы обладают рядом недостатков. Кроме гистерезиса, который может находиться в пределах 10-30%, керамические элементы имеют последствие, обусловленное релаксационными про-

цессами. Величина деформации последствия, пропорциональная изменению напряжения, и может достигать 20% от величины изменения длины. Из-за нарушения технологии изготовления, высокой чувствительности к малым отклонениям в химическом составе и химической неоднородности характеристики материала могут отличаться от справочных на 20-30%. Таким образом, дальнейшее совершенствование пьезоэлектрических исполнительных устройств связано с разработкой новых и повышением качества изготовления уже существующих пьезоматериалов [5, 7].

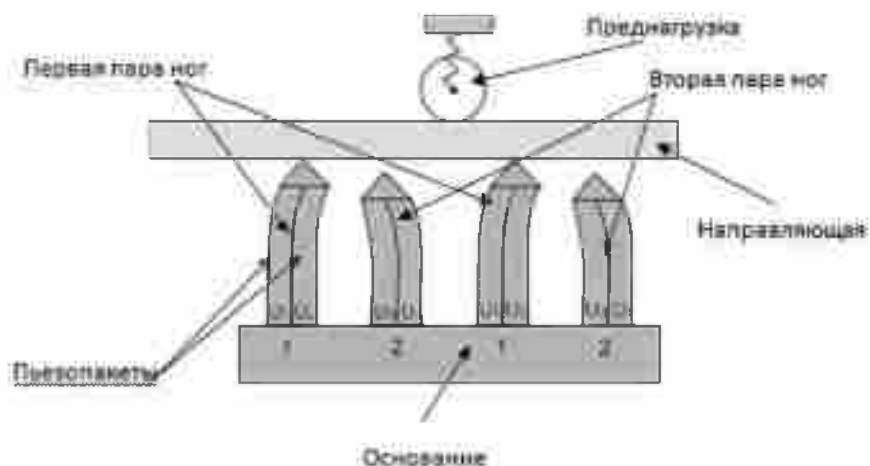


Рисунок 4 – Принципиальная схема пьезопривода биморфной конструкции «Physik Instrumente»

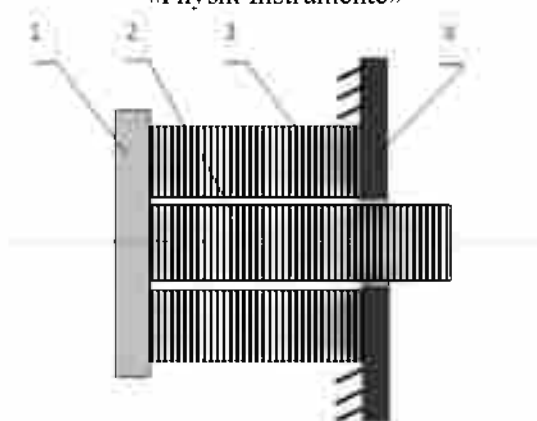


Рисунок 5 – Принципиальная схема пьезопривода дифференциальной конструкции

## 2 ДМП на упругих трубчатых элементах с управляемой деформацией

УТЭУД за долгое время своего существования применялись только для измерения давления в манометрах (откуда и получили одно из своих названий манометрических элементов). Возможность использования их в качестве ИУ появилась лишь с появлением и развитием специальных технологий и вычислительных устройств.

УТЭУД обладают выгодным сочетанием характеристик: имеют высокую прочность при достаточно больших перемещениях свободного кончика, высокую жесткость к действию внешних сил, обладают линейной характеристикой, обеспечивают высокую точность показаний во всем диапазоне измерения давления или температуры.

Наряду с традиционными требованиями прочности, долговечности и надежности к УТЭУД предъявляется ряд дополнительных и специфических требований, таких как экологическая чистота, обеспечение больших упругих перемещений при относительно малых энергозатратах. Задачи, возникающие при расчете и проектировании гибких упругих манометрических элементов, используемых в конструкциях исполнительных устройств следящих систем, во многих случаях не укладываются в рамки традиционных подходов. Эти задачи требуют использования специальных подходов, разработанных в теории управления, уточненного расчета и дополнительного анализа.

Преимущества механизмов, использующих УТЭУД:

- получение требуемого хода рабочего органа при малых габаритах;
- возможность сохранения работоспособности упругого элемента при изменении рабочего давления в широком диапазоне;
- простота конструкции механизма;
- высокая ремонтпригодность;
- возможность сохранения работоспособности в загрязненных средах;
- сохранение чистоты рабочей среды.

УТЭУД типа трубки Бурдона, которые в настоящее время наиболее востребованы в качестве исполнительного устройства измерительных приборов применяемых в различных областях техники. Максимальная величина отклонения незакрепленного конца УТЭУД сравнительно небольшая. Она составляет у серийно выпускаемых промышленностью УТЭУД для бытовых манометров ~25-30 мм. Перемещение незакрепленного конца УТЭУД через зубчатую передачу поступает на ось вращения стрелки прибора, фиксирующей величину давления по градуированной шкале. Так устанавливается связь между перемещением незакрепленного конца УТЭУД и уровнем давления воздуха, находящегося внутри УТЭУД.

Следует отметить, что УТЭУД, в отличие от других чувствительных элементов, может быть не только чувствительным элементом, но и (согласно принятой терминологии в теории пневмо- и гидродатчиков) выполнять функции силового бесштокового пневмоцилиндра (СБЩ) [1,2] как силовой части (СЧ) исполнительного двигателя (ИД), так как незакрепленный конец УТЭУД при попадании внутрь него воздуха с избыточным давлением не только перемещается, но и развивает усилие, которое через зубчатую передачу поступает на объект управления (ОУ). Эта особенность УТЭУД хорошо известна и без особого труда может быть использована при управлении перемещением незакрепленного конца УТЭУД.

Важным достоинством УТЭУД является его герметичность и отсутствие трущихся поверхностей, т.е. он, как СБЩ, не имеет объемных потерь и потерь на трение. Это означает, что при реализации в пневмоприводе с ИД на основе УТЭУД замкнутой по расходу рабочего тела системы питания, такой пневмопривод не нуждается в потреблении воздуха из атмосферы и сбросе отработанного воздуха в атмосферу, т.е. он может работать в вакууме, не ухудшая его спектрального состава и не влияя на качество обрабатываемых изделий.

Учитывая, тот факт, что технологические процессы в микроэлектронном приборостроении, в основном, осуществляются в техническом вакууме, непосредственное участие в них человека-оператора исключено. Таким образом, ДМП на основе УТЭУД как элемент системы автоматического управления технологическими про-

цессами, в наибольшей степени пригоден для обеспечения их автоматизации в современном микроэлектронном приборостроении. Отметим, что поскольку в ДМП управление процессами перемещения незакрепленного конца УТЭУД и изменения величины развиваемого им усилия происходит за счет регулирования уровня давления в полостях УТЭУД, то целесообразно эту регулировку и управление сбросом отработанного воздуха из полостей УТЭУД выполнять автоматически с помощью таких стандартных пневмоэлементов, как пропорциональный электронный регулятор давления (ПЭРД) или золотниковый пневматический дроссельный распределитель (ЗПДР), которые могут использоваться в конструкции ДМП.

Следует подчеркнуть, что совокупность факторов перечисленных выше, а так же применение ряда простых конструкторских решений и стандартных пневмоэлементов позволяет получить новый технический результат - управление перемещением и усилием незакрепленного конца УТЭУД путем автоматического регулирования величины давления сжатого воздуха, нагнетаемого в УТЭУД, и управления потоками нагнетания и сброса отработанного воздуха, т.е. создание ДМП как элемента системы автоматического управления технологическими процессами.

Конструктивно СЧ ИД пневмопривода малых перемещений (ПМП) может быть представлена либо как СБПЦ одностороннего действия с возвратной пружиной, в котором СБПЦ реализован на одном УТЭУД, а усилие возврата определяется его упругими свойствами как плоской пружины, либо как СБПЦ двустороннего действия, когда используются два УТЭУД, причем усилия и перемещения их незакрепленных концов направлены встречно.

Пневмопривод малых перемещений реализованный на замкнутой по расходу рабочего тела системе питания (рисунок 6), в котором СЧ ИД выполнена на СБПЦ двустороннего действия (рисунок 7), содержит: компрессор, связанный с ресивером высокого давления (РВД), на выходе которого установлен регулятор давления (РД); ресивер низкого давления (РНД), выход которого соединен с входом компрессора; пропорциональный электронный регулятор давления (ПЭРД), регулирующий величину давления воздуха на входе золотникового дроссельного распределителя (ЗДР), обеспечивающего подачу воздуха с требуемым уровнем давления в СБПЦ и сброс отработанного воздуха из СБПЦ в ресивер НД. Кроме этих пневмоэлементов привод имеет герметичную емкость, связанную трубопроводом с РНД, в которой размещены ЗДР и ПЭРД. Силовой вал 9, проходящий через центр трехчетвертной окружности, форму которой в исходном положении занимает УТЭУД, вращается в подшипниках качения, закрепленных на вертикальных пластинах 12, между которыми размещается СБПЦ 5, прижимными крышками 11 [3, 4].

Усилие и перемещение с выхода каждого СБПЦ одностороннего действия (с незакрепленного конца УТЭУД) через зубчатый сектор 14 передается на шестерню 15, принадлежащую силовому валу 9, а оттуда через передачу «рейка-шестерня» в виде возвратно-поступательного движения передается на объект управления (ОУ). Рейка 16 передачи «рейка-шестерня» перемещается в подшипниках скольжения 17,

закрепленных на основании 18. При необходимости вращательное движение может быть выполнено либо с рейки 16, либо с шестерни 19, установленной на силовом валу 9.

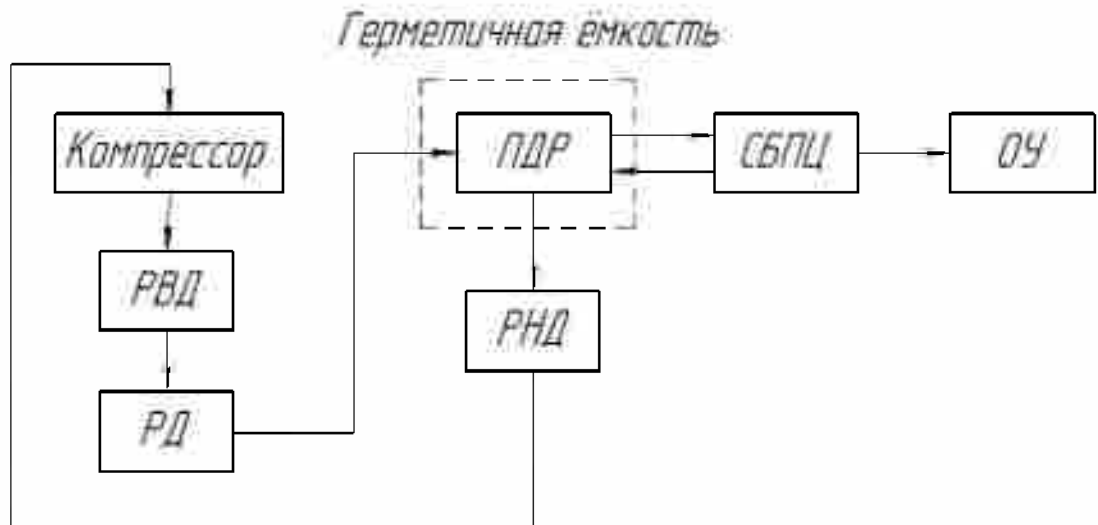


Рисунок 6 – Система питания пневмопривода на СБПЦ, замкнутая по расходу рабочего тела

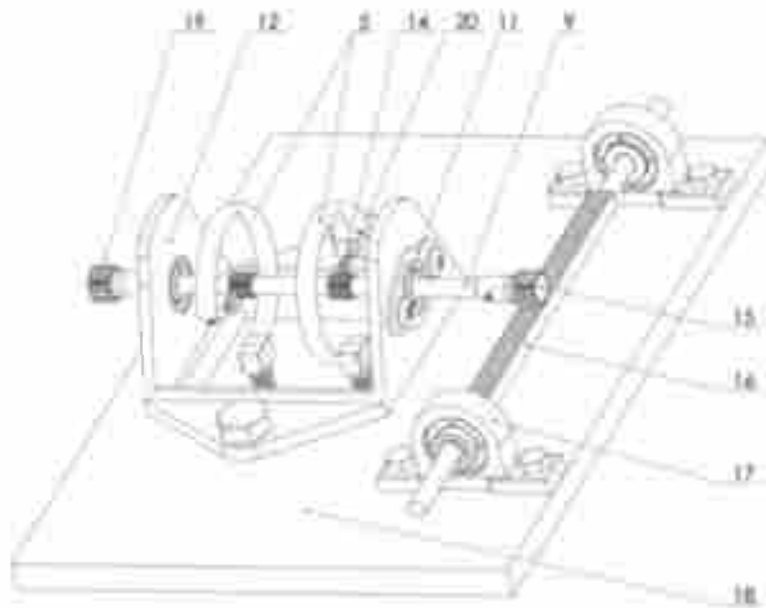


Рисунок 7 – Вариант конструкции СЧ ИД ДМП на УТЭУД двустороннего действия

В СБПЦ двустороннего действия каждый из УТЭУД является либо полостью высокого давления, либо полостью низкого давления в зависимости от того нагнетается ли в УТЭУД сжатый воздух или из него происходит сброс отработанного воздуха.

Силовая часть ИД на СБПЦ двустороннего действия представляет собой кон-



струкцию из двух УТЭУД, установленных на общем основании 18. Процедура установки ОУ в нейтральное положение перед началом работы пневмопривода осуществляется при размыкании кинематической связи между силовым валом 9 и незакрепленным концом УТЭУД дистанционно путем втягивания штока соленоида 20 в его катушку, к которому прикреплен сектор 14, передающий перемещение конца трубки на силовой вал 9 в виде вращательного движения.

Так как усилия и перемещения с выходов СБПЦ двустороннего действия (с незакрепленных концов двух УТЭУД) направлены встречно, то результирующие значения этих параметров, приведенных к ОУ, представлены их разностью, которая и определяет итоговую величину и знак как усилия, так и перемещения, передаваемых на ОУ, соответственно.

Пневмопривод малых перемещений, в котором СЧ выполнена на СБПЦ двустороннего действия, готов к работе, когда ОУ находится в нейтральном положении. Для этого нужно обеспечить величину давления  $P = 0,5 P_{зад}$ , в полостях высокого и низкого давлений СБПЦ, где  $P_{зад}$  – заданная (РД) величина давления в ресивере ВД, что достигается путем применения запорных клапанов. После установки ОУ в нейтральное положение привод готов к работе. Рейка перемещается возвратно-поступательно в подшипниках скольжения пропорционально разности перемещений незакрепленных концов УТЭУД, в направлении, которое определяется разностью давлений в полостях СБПЦ.

Передача на ОУ результирующих значений усилий и перемещений с незакрепленных концов УТЭУД в форме вращательного движения осуществляется путем снятия его с шестерни путем установки зубчатой передачи с требуемой редукцией.

ПМП на упругих трубчатых элементах с управляемой деформацией учитывающая следующие обязательные параметры:

1 ПМП базируется на применении в качестве СЧ СБПЦ, выполненных на УТЭУД типа трубки Бурдона, которые являются герметичными, а значит не имеют объемных потерь;

2 объемные потери, возникающие при работе ЗДР или ПДР, остаются в герметичной емкости, в которой эти пневмоэлементы размещены;

3 объемные потери переправляются в РНД, куда также сбрасывается отработанный воздух из полостей СБПЦ;

4 вход компрессора соединен с ресивером НД, является замкнутой по расходу рабочего тела, она не связана с потреблением воздуха из атмосферы и сбросом отработанного воздуха в атмосферу, и, следовательно, ПМП может работать в вакууме, в агрессивной и запыленной средах, применяться в современных вакуумно-технологических модульных комплексах микроэлектронного приборостроения, входит в состав оборудования научных центров по фармакологии, химии, радиологии, ядерной физики, медицины, астрономии и т.д.

Таким образом, техническим результатом решения задачи управления перемещением незакрепленного конца УТЭУД с помощью целенаправленного регулирования давления на его входе и управления потоками нагнетания и сброса воздуха в автоматических режимах является разработка ПМП, где в качестве СЧ ИД используются СБПЦ, состоящий из УТЭУД, которые не имеют объемных потерь. Это поз-

воляет, применяя простые конструкторские решения, реализовать в предлагаемом пневмоприводе замкнутую по расходу рабочего тела систему питания, которая исключает потребление воздуха из атмосферы и сброс отработанного воздуха в атмосферу, а значит, позволяет ПМП работать в вакууме, агрессивной или запыленной среде, тем самым наилучшим образом выполнять функции элемента системы автоматического управления технологическими процессами в современном микроэлектронном приборостроении. Это значительно увеличивает круг его достоинств, так как расширяет область его применения, позволяет повысить надежность, увеличить срок необслуживаемости и температурный диапазон использования, снизить уровень шума, стоимость и энергопотребление.

### Заключение

Из проведенного обзора наиболее распространенных конструкций ДМП можно сделать вывод, что в большинстве случаев магнитострикционные и в особенности пьезоэлектрические устройства вполне удовлетворяют предъявленным требованиям по точности и быстродействию. Однако в последние годы в связи с развитием технологии микроприборостроения с использованием технического вакуума и технологии классического и магнетронного напыления, перед наукой и техникой возник ряд проблем, связанных с особенностями вакуума и его воздействием на объекты обработки и эксплуатации. Технологический вакуум очень чувствителен к воздействию находящихся в нем "искусственных" объектов, может легко изменить спектральный состав остаточной газовой среды. Поддержание стабильного состава остаточной газовой среды особенно важно в тех случаях, когда она оказывает непосредственное влияние на качество получаемых изделий. В таком случае применение пьезоэлектрических или магнитострикционных устройств ухудшают качественные характеристики среды, и появляется необходимость в устройствах иной конструкции.

Практическая реализация предложенных технических решений, в которых перемещение исполнительных органов является следствием их упругого деформирования под действием внешнего, не соприкасающегося со средой энергоносителя, позволяет избегать недостатков предыдущих подходов, где в качестве исполнительных органов используются пьезоэлектрические, магнитострикционные устройства.

### Литература

1 Чернусь П.П., Арбиев А.К., Чернусь П.П., Лошидский П.А., Шароватов В.Т. Силовые оболочковые Элементы: динамические математические модели, системы питания// Справочник. Инженерный журнал. – 2021. – №6. – С.31-39.

2 Чернусь П.П., Арбиев А.К., Чернусь П.П., Лошидский П.А., Шароватов В.Т. Силовые оболочковые Элементы: динамические математические модели, системы питания// Справочник. Инженерный журнал. – 2021. – №6. – С.36-43.

3 Пат. РФ на изобретение № 2699847. Замкнутая система питания пневмопривода / Шароватов В.Т., Арбиев А.К.; опубл. 11.09.2019, Бюл. №18.

4 Арбиев А.К. Системы питания пневмоприводов // Исследования связанные с исследованием новых приборов, установок, образцов и комплексов ВВСТ. IV Всероссийской научно-практической конференции, «Российская академия ракетных и артиллерийских наук», сб. док. «Молодеж. Наука. Инновации в оборонно-промышленном комплексе», – 2020. – С.201-207.

5 Kollegen УОц, Исполнительный элемент для получения усилия и/или перемещения. Aktuator vorrichtung zur Erzeugung einer kraft und/oder einer bewegung, 19951603, Oct 26, 1999.

6 Двигатели для микроперемещений // Веб-сайт [https://studopedia.ru/2\\_47665\\_dvigateli-dlya-mikroperemeshcheniy.html](https://studopedia.ru/2_47665_dvigateli-dlya-mikroperemeshcheniy.html)

7 Емельянов А.В., Шилин А.Н. Шаговые двигатели: учеб. пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2005. – 48 с.

8 Пат. РФ на изобретение № 2074456. Магнитострикционный шаговый двигатель /Азнабаев А.Р., Тлявлин А.З., Грахов П.А., Кусимов С.Т.; опубл. 27.02.1997.

Арбиев Азамат Казбекович – начальник сектора, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: автоматизация и стандартизация технологических процессов при организации производства микроэлектронного приборостроения путем внедрения современных следящих систем, пневматические приводы технологических машин, разработка и исследование следящих пневматических систем.

Email: laimer\_of@mail.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

#### AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES BY INTRODUCING SERVICE DRIVES ON ELASTIC TUBULAR ELEMENTS

The article is devoted to the theory and practice of using power pistonless pneumatic cylinders of the elastic tubular element type with controlled deformation in servo pneumatic actuators. The principle of operation, as well as the positive and negative aspects of the most common designs of small displacement engines are considered. The design of the is formulated and considered, where a power pistonless pneumocylinder of the type is used as a power unit and a power supply system closed in terms of the consumption of the working fluid is implemented.

Key words: power pistonless pneumatic cylinder, elastic tubular element with controlled deformation, small displacement motor, small displacement pneumatic drive, pneumatic drive power supply system closed by flow.

Arbiev Azamat Kazbekovich - head of the design department sector, JSC "Obukhov Plant", St. Petersburg.

Research interests: automation and standardization of technological processes in the organization of production of microelectronic instrumentation through the introduction of modern servo systems, pneumatic drives of technological machines, development and research of servo pneumatic systems.

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОДИНОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ ОБРАТИМОГО ХАРАКТЕРА НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТЫ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ МОЩНОСТИ

Столяров И.И.

*Предметом доклада является исследование одиночных эффектов (ОЭ) обратимого характера в сложных радиотехнических устройствах на примере узкополосного синтезатора частоты с автоматической регулировкой мощности выходного сигнала. Приведен краткий обзор существующих подходов к моделированию ОЭ на физическом и схемотехническом уровне с описанием особенностей их применения. Представлена имитационная модель, позволяющая проводить исследование возникающих с заданной вероятностью ОЭ и их влияние на процесс функционирования радиотехнических устройств. Представлены результаты использования предложенной модели для оптимизации параметров работы синтезатора частоты посредством дополнительной настройки системы автоматической регулировки мощности.*

*Ключевые слова:* синтезатор частоты, имитационная модель, одиночный эффект, автоматическая регулировка мощности.

### **Введение**

Увеличение требований к срокам использования, в том числе в автономном режиме и в условиях влияния дестабилизирующих факторов внешней среды, является одной из современных тенденций развития сложных радиотехнических систем различного функционального назначения. Важным элементом таких систем могут являться синтезаторы частоты (СЧ), служащие источниками стабильных опорных сигналов в различных видах техники: в радиоприемной и радиопередающей аппаратуре, в частотомерах и других измерительных приборах [1]. На СЧ, формирующий сигнал заданной мощности, в течение срока использования могут оказывать влияние внешние воздействующие факторы (ВВФ) различной природы, вследствие чего происходит процесс деградации элементов синтезатора накопительного характера: разница между текущими и начальными значениями какого-либо параметра постепенно увеличивается. Кроме того, в узлах СЧ могут возникать одиночные эффекты (ОЭ), вызванные влиянием тяжелых заряженных частиц, высокоэнергетических протонов или различными воздействиями механической природы.

Известно большое количество работ, посвященных моделированию одиночных эффектов обратимого и необратимого характера на физическом и схемотехническом уровнях, например [2-6], описывающих процессы деградации в материалах и структурах конкретной микросхемы. Однако существует недостаток в модельных исследованиях на более высоком уровне, позволяющих определять влияние ОЭ обратимого характера на параметры работы радиотехнических устройств в целом.

В настоящем исследовании делается попытка восполнить этот недостаток посредством использования эмпирической модели ОЭ на примере узкополосного СЧ X-диапазона, предназначенного для формирования частотно-модулированного сигнала высокой стабильности и спектральной чистоты. Для такого случая важным фактором является, кроме всего прочего, стабильность мощности выходного сигнала и отсутствие амплитудной модуляции, вызванной в первую очередь нестабильностью опорных напряжений, формируемых линейными стабилизаторами напряжения (ЛСН). Для стабилизации выходной мощности синтезатора используется система автоматической регулировки мощности (АРМ), данное исследование проведено при допущении об отсутствии влияния ВВФ на систему АРМ, что возможно в той или иной степени реализовать схемотехнически [7-9] и/или конструктивно [10].

### 1 Базовая модель изменений выходной мощности синтезатора частоты

Деграционные изменения параметров радиотехнических устройств, вызванные влиянием ВВФ, таких как повышенная температура, ионизирующее излучение, различные виды атмосферных осадков, в основном имеют накопительный характер. Основной вклад для рассматриваемого случая выходной мощности СЧ вносят ЛСН, как источники опорного напряжения для всех элементов СЧ. Основываясь на данных испытаний ЛСН на стойкость к воздействию ионизирующего излучения, в качестве детерминированной составляющей модели деградации, характеризующей долгосрочный дрейф параметра, выбрана линейно убывающая во времени функция. Общая модель изменений мощности выходного сигнала СЧ во времени  $t$  в математическом виде представляет собой сумму детерминированной составляющей и кратковременных флуктуаций [11]

$$P_{сч}(t) = P_0 - kt + \delta(t),$$

где  $P_0$  – начальное значение мощности,

$k$  – угловой коэффициент функции тренда, определяющий скорость деграционных изменений,

$\delta(t)$  – стационарный случайный процесс, описывающий действие обратимых флуктуаций, вызванных внешними и внутренними факторами.

Примеры графиков изменений мощности сигнала, генерируемого посредством СЧ, для различных коэффициентов  $k$  и амплитуд случайных флуктуаций  $\delta(t)$  показаны на рисунке 1. Начальное значение выходной мощности принято равным 1 Вт.

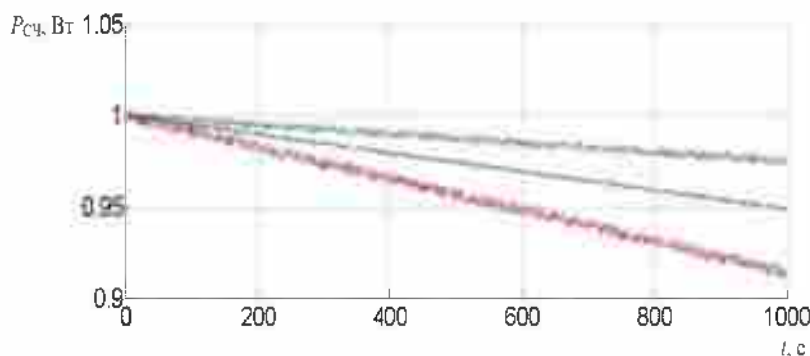


Рисунок 1 – Изменения мощности выходного сигнала СЧ во времени

В данной модели коэффициент  $k$  задается в зависимости от интенсивности ВВФ среды и стойкости используемых микросхем. Таким образом, данная модель позволяет определять изменения в параметрах работы синтезатора, с учетом процессов деградации, происходящих в узлах устройства при длительных сроках использования и в условиях среды со значительным влиянием ВВФ.

## 2 Имитационная модель одиночных эффектов обратимого характера

Кроме ВВФ, имеющих накопительный характер влияния на деградацию в узлах и элементах радиотехнических устройств, значительный негативный вклад в процесс функционирования могут оказывать ОЭ обратимого характера. При этом сложность с данным фактором состоит в том, что события, вызывающие данные эффекты, появляются в случайные моменты времени и их интенсивность заранее неизвестна, вследствие чего для определения их влияния на параметры работы систем необходимо проводить имитационное моделирование. В зависимости от условий среды функционирования могут быть различные факторы случайного характера, вызывающие ОЭ в радиотехнических системах, такие как механические и гидравлические удары, сейсмическое воздействие и механические колебания. Данное же исследование базируется на рассмотрении примеров влияния ОЭ, вызванных воздействием тяжелых заряженных частиц.

В моделировании ОЭ подобного характера основным подходом является дополнение в процессе разработки конкретной микросхемы в специализированном программном обеспечении функциональной схемы источниками тока ионизационного отклика. Для изделий с проектными нормами 180 нм и более успешно используется двухэкспоненциальная модель источника тока, как, например, представлено в работе [3]:

$$I(t) = \begin{cases} 0, & t < t_1 \\ I_{max} \left( 1 - e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_\alpha}} \right), & t_1 \leq t < t_2, \\ I_{max} e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau_\beta}}, & t \geq t_2 \end{cases}$$

где  $I_{max}$  – максимальное значение тока,  
 $t_1$  – время начала фронта импульса,  
 $t_2$  – время начала спада импульса,  
 $\tau_\alpha$  – постоянная времени собирания заряда,  
 $\tau_\beta$  – постоянная времени распространения.

Для моделирования ОЭ в микросхемах меньших проектных норм (суб-100-нм) применяется более сложная двойная двухэкспоненциальная модель [4], использующая два источника тока, формирующих импульсы различной длительности, в совокупности представляющие собой быстро возрастающий короткий импульс с длительным плато меньшей амплитуды. Также для данной цели может быть использован аппроксимированный кусочно-линейной функцией источник тока со сглаживающим линейным фильтром, данный метод представлен в работе [6].

В рассматриваемом СЧ использованы отечественные ЛСН субмикрометровых проектных норм. Для целей проведения имитационного моделирования в условиях отсутствия детальных данных о схематехническом устройстве и особенностях конструкции конкретных моделей ЛСН использованы данные испы-

таний микросхем на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц для разработки эмпирической модели влияния ОЭ на выходной сигнал ЛСН и соответственно выходную мощность синтезатора. Поскольку типичные проявления ОЭ в данных и подобных им ЛСН представляют собой 1-2 полных периода синусоидального сигнала, модулированных по амплитуде двухэкспоненциальной функцией, разработанная на основе анализа этих характеристик модель в аналитическом виде выражается следующим образом

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t < t_1 \\ U_{max} \sin \omega t \left( 1 - e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_1}} \right), & t_1 \leq t < t_2, \\ U_{max} \sin \omega t e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau_2}}, & t \geq t_2 \end{cases}$$

где  $U_{max}$  – максимальное значение выходного напряжения,

$\omega$  – угловая частота синусоидальных колебаний ОЭ,

$\tau_1$  и  $\tau_2$  – постоянные времени, определяющие скорость нарастания и убывания экспоненциальной функции.

Необходимо добавить, что данная модель соответствует не только воздействию ОЭ на выходной сигнал ЛСН, но и, например подобным явлениям в операционных усилителях [12] и может быть применена при условии достаточно точного подбора параметров.

Структурная схема модели изменений мощности выходного сигнала СЧ, дополненная имитационной моделью ОЭ, представлена на рисунке 2.

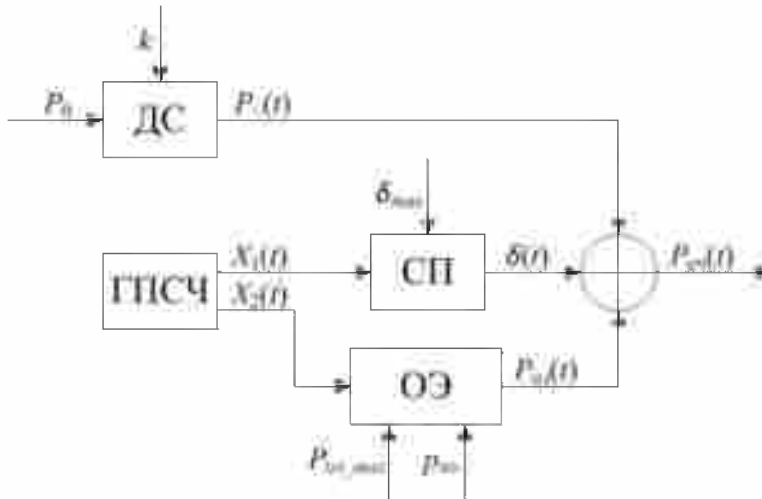


Рисунок 2 – Структурная схема дополненной модели влияния ВВФ

Начальное значение мощности  $P_0$  и угловой коэффициент  $k$  детерминированной составляющей ДС задаются статически. Максимальное значение амплитуды случайных флуктуаций  $\delta_{max}$  задается в зависимости от шумовых характеристик ис-

пользуемого ЛСН. Генератор ГПСЧ псевдослучайных чисел  $X_1$  и  $X_2$  применяется для генерирования случайной составляющей  $\delta(t)$  изменений мощности, а также для формирования импульсов, вызванных ОЭ. Вероятность  $p_{оэ}$  возникновения ОЭ и их максимальная амплитуда  $P_{оэ\ max}$ , используемые в качестве ограничений выходного сигнала  $P_{оэ}(t)$  имитационной модели, задаются в зависимости от условий среды функционирования устройства.

Пример работы модели показан на рисунке 3: на графике видно характерный импульс, происходящий в микросхемах при воздействии тяжелых заряженных частиц. Параметры моделирования, такие как максимальная амплитуда, длительности фронта и спада импульсов и угловая частота  $\omega$  синусоидальных колебаний ОЭ заданы в соответствии с данными испытаний микросхем на стойкость к воздействию ВВФ.

Преимуществом усовершенствованной модели изменений выходной мощности СЧ является возможность полнее оценить работу АРМ не только в процессе компенсации негативного влияния деградации элементов синтезатора, но и при возникновении ОЭ, задавая вероятность и максимальную амплитуду подобных событий в зависимости от условий среды функционирования устройства.



Рисунок 3 – Пример работы имитационной модели ОЭ

### 3 Влияние одиночных эффектов на синтезатор частоты с автоматической регулировкой мощности

Рассмотрим подробно негативное влияние деградационных изменений и ОЭ, вызванных ВВФ, на параметры работы СЧ и возможность их компенсации посредством системы АРМ. На рисунке 4 приведена структурная схема одной из возможных реализаций системы регулирования, основной принцип работы которой заключается в следующем. В качестве объекта управления ОУ используется управляемый аттенуатор, который в соответствии с управляющим напряжением  $U_{упр}(t)$  ослабляет входной сигнал мощностью  $P_{сч}(t)$  до требуемого значения  $P_{сч}^*(t)$ . Часть мощности



при этом отводится делителем мощности ДМ на датчик Д, измерения которого относительно опорного напряжения  $U_0(t)$  поступают в управляющий вычислитель УВ для обработки и последующей выдачи управляющего сигнала на элемент управления ЭУ, в качестве которого выступает цифро-аналоговый преобразователь, формирующий управляющее напряжение  $U_{упр}(t)$ .

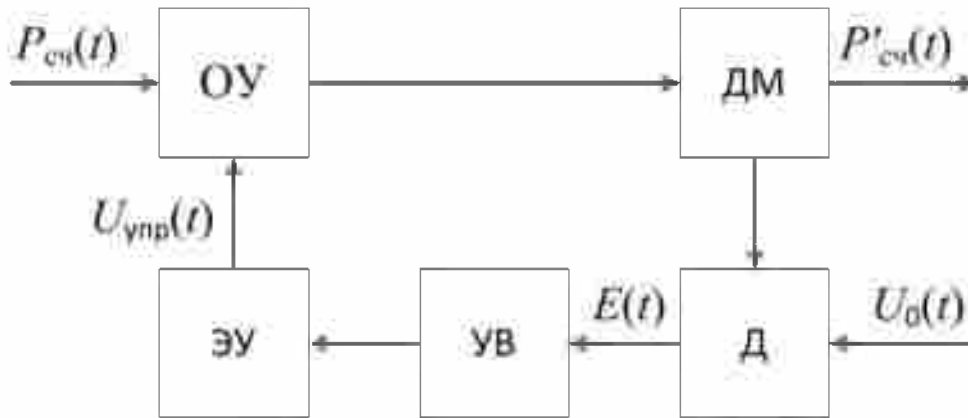


Рисунок 4 – Структурная схема системы АРМ.

Передаточная функция объекта управления (управляемого напряжением аттенюатора) может быть выражена как сумма передаточных функций, характеризующих его динамические свойства по входной мощности  $W_{ВХ}(s)$  и по управляющему напряжению  $W_{УПР}(s)$ , как предложено в работе [13],

$$W_{ОУ}(s) = W_{ВХ}(s) + W_{УПР}(s) = \frac{(T_1s+1)(-T_2s+1)}{(T_3s+1)(T_4s+1)} + \frac{k_{УПР}(T_5s+1)}{T_6s+1},$$

где  $k_{УПР}$  – коэффициент передачи по управляющему напряжению,

$T_1$ - $T_6$  – постоянные времени, определяемые экспериментально для конкретной модели аттенюатора.

Для улучшения переходного процесса системы в УВ используется ПИД-регулятор, передаточная функция которого равняется сумме передаточных функций пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих

$$W_{ПИД}(s) = k_p + k_i/s + k_d s,$$

где  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  – коэффициенты передачи пропорционального, интегрального и дифференцирующего звеньев соответственно, в рассматриваемом случае коэффициенты регулятора были настроены по методу Циглера-Никольса. При выключенном блоке ОЭ ошибка системы регулирования на всем интервале моделирования составляет не более 1 %. В то время как при включенном ОЭ превышает 2 %, пример чего можно видеть на рисунке 5 (график 1) – здесь показан участок с ОЭ наибольшей возможной амплитуды.

Цифрой 2 обозначен график для системы после дополнительной настройки параметров регулятора по импульсу, сгенерированному блоком ОЭ, в качестве за-

дающего воздействия – изменен коэффициент передачи дифференциального звена регулятора. Ошибка системы не превышает 1 %, в том числе во время одиночных эффектов в СЧ, для наглядности сигнал ошибки для случая 2 задержан на  $10^{-4}$  с. Таким образом результаты моделирования показывают, что дополнительная настройка регулятора позволила уменьшить ошибку регулирования без потерь в устойчивости – на всем интервале моделирования система работает устойчиво.

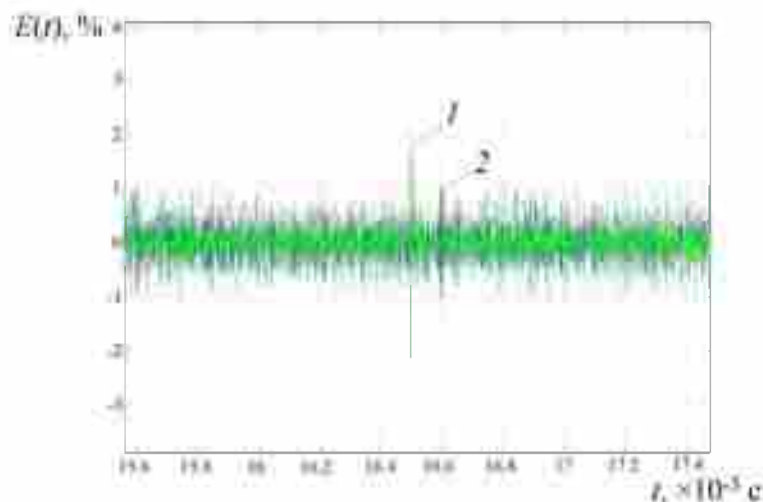


Рисунок 5 – Ошибка системы АРМ

### Заключение

Для обеспечения стабильности долговременного функционирования радиотехнических систем в условиях агрессивной внешней среды одним из важных факторов является учет влияния ОЭ обратимого характера на параметры работы систем. Представленная эмпирическая модель ОЭ, позволяющая генерировать импульсы различной длительности и амплитуды с вероятностью, соответствующей условиям среды, может быть успешно применена для решения данной задачи, что показано на примере узкополосного СЧ с системой АРМ.

Наряду со схемотехническими методами парирования и конструктивными решениями по защите от ВВФ в радиотехнической аппаратуре реализуют различные системы регулировки целевых параметров, настраиваемые для минимизации ошибки с достаточной степенью быстродействия и устойчивости. По результатам проведенного модельного исследования сделан вывод о том, что при настройке параметров систем компенсации негативных эффектов разработанная модель может быть использована в качестве генератора задающего воздействия. Кроме того, интерес представляет также вопрос о зависимости параметров (амплитуды и длительности) импульсов, вызванных ОЭ, от общей степени деградации узлов системы и дополнение представленной модели в соответствии с этой особенностью.

## Литература

- 1 Chenakin A. - Frequency synthesizers: Concept to product / A. Chenakin. – Norwood: Artech House, 2011. – 214 p.
- 2 Physically based predictive model for single event transients in CMOS gates / M. Saremi, A. Privat, H. J. Barnaby, L. T. Clark // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2016. – Vol. 63, № 6. – P. 2248-2254.
- 3 A novel modeling approach of single event transients for particle strikes / X.-B. Cao, L.-Y. Xiao, J. Li [et al.] // 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). – 2018. – P. 1-3.
- 4 Modeling of single event transients with dual double-exponential current sources: implications for logic cell characterization / D. A. Black, W. H. Robinson, I. Z. Wilcox [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2015. – Vol. 62, № 4. – P. 1540-1549.
- 5 Detection and correction methods for single event effects in analog to digital converters / H. Venkatram, J. Guerber, M. Gande, U. -K. Moon // IEEE Transactions on circuits and systems I: Regular papers. – 2013. – Vol. 60, № 12. – P. 3163-3172.
- 6 Efficient modeling of single event transients directly in compact device models / A. M. Francis, M. Turowski, J. A. Holmes, H. A. Mantooth // 2007 IEEE International Behavioral Modeling and Simulation Workshop. – 2007. – P. 73-77.
- 7 Zhou Q. Transistor sizing for radiation hardening / Q. Zhou, K. Mohanram // 2004 IEEE International Reliability Physics Symposium. – 2004. – P. 310-315.
- 8 Жданкин В. Радиационно-стойкие линейные стабилизаторы напряжения со сверхнизким падением напряжения для ракетно-космической техники / В. Жданкин // Компоненты и технологии. – 2011. – № 7(120). – С. 124-128.
- 9 Схематические методы обеспечения стойкости источников опорного напряжения к полной поглощённой дозе излучения / В. Е. Шунков, О. Н. Кусь, В. Ю. Прокопьев [и др.] // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 97-101.
- 10 Эффективность применения специализированных металлических корпусов для защиты радиоэлектронных компонентов от воздействия протонов радиационных поясов земли / А.С. Якушевич, Ю.В. Богатырев, Н.А. Василенков [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 14-й Международной конференции, посвященной 100-летию Белорусского государственного университета. – 2021. – С. 114-118.
- 11 Подмастерьев К.В. Прогнозирующий контроль радиоэлектронной аппаратуры с адаптивными интервалами времени часть 1. Теоретические основы и модели, характеристики дрейфа параметров / К.В. Подмастерьев, С.А. Моисеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 3-2(293). – С. 135-144.
- 12 Прогнозирование локальных радиационных эффектов в ИС при воздействии факторов космического пространства / А.И. Чумаков, А.Л. Васильев, А.А. Козлов [и др.] // Микроэлектроника. – 2010. – Т. 39, № 2. – С. 85-90.
- 13 Демьянович Д.Н. Исследование СВЧ-тракта синтезатора и разработка его модели при проектировании системы АРУ / Д.Н. Демьянович, О.С. Вадутов, А.И. Солдатов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 4 (34). – С. 120-126.

14 Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления / В.А.Бесекерский, Е.П.Попов. – СПб: Профессия, 2003. – 752 с.

Столяров Игорь Игоревич – Старший инженер, АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург.  
Область научных интересов: радиофизика, схемотехника.  
Email: I.Stolyarov@rirt.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

#### **SIMULATION OF THE IMPACT OF NON-DESTRUCTIVE SINGLE EVENT EFFECTS ON THE OPERATION PARAMETERS OF THE FREQUENCY SYNTHESIZER WITH AUTOMATIC POWER CONTROL**

The subject of the report is the study of non-destructive single event effects (SEE) in complex radio-technical systems using the example of a narrow-band frequency synthesizer with automatic power control of the output signal. A brief overview of the existing approaches to modeling SEE at physical and circuitry levels is provided with description of the peculiarities of their application. A simulation model that allows to conduct a study of SEE influence on functioning of radio-technical systems is presented. Simulation results of using the proposed model for optimizing the operation parameters of the frequency synthesizer by means of additional adjustment of the automatic power control system are presented.

Keywords: frequency synthesizer, simulation model, single event effects, automatic power control.

Stolyarov Igor Igorevich - Senior Engineer, JSC "RIRV", St. Petersburg.  
Research interests: radiophysics, circuitry

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭМП ОТКРЫТЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Крячко А.Ф., Ревунов Г.М., Беляков Н.И.

*Приближенные модели открытых структур с плазменным включением достаточно грубо описывают спектральные характеристики таких электродинамических объектов. В связи с этим представляет интерес проведение их исследования на базе строгой модели, с целью выяснения особенностей их поведения от различных геометрических и электродинамических параметров. Представлены аналитические физико-математические модели спектральных характеристик резонатора на основе вычисления матричной оператор-функции случае неоднородного диэлектрического включения. Для различных областей физики плазмы, биофизики большой интерес представляют исследования спектральных и дифракционных характеристик открытых резонаторов, содержащих внутри себя различные неоднородные включения, материальные параметры которых зависят от пространственных координат либо от частотных параметров структуры. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании свойств таких объектов.*

*Ключевые слова:* Открытый резонатор; плазменное включение; спектральные характеристики; длинноволновая область; матричная оператор-функция.

### Введение

При изучении колебательных и волновых процессов, самостоятельное значение имеют исследования физической природы и закономерностей реализации различных резонансных и аномальных эффектов, проявляющихся при дифракции, распространении и излучении электромагнитных волн. Результаты, полученные в этой области, важны не только для развития теоретических представлений о колебательных и волновых процессах для соответствующих структур, но и для правильного выбора адекватных принципов работы и способов технической реализации, создаваемых новых функциональных элементов и устройств. Достоверность и полнота получаемых сведений о дифракции, распространении и излучении электромагнитных волн во многом определяются эффективностью и обоснованностью того математического аппарата и той физической концепции, которые используются для количественных и качественных исследований этих процессов. Результативность анализа существенно возрастает, когда математический аппарат и физические представления максимально учитывают специфику изучаемых объектов и того частотного диапазона, в котором они используются. Поэтому взаимосвязанное развитие математически обоснованных методов моделирования и физических представлений о возможных и наблюдаемых волновых процессах является актуальной задачей [1–4].

В радиофизике и электронике находят широкое применение открытые резонансные системы: открытые резонаторы (ОР), открытые волноводные резонаторы, открытые волноводы и т.д. Они используются в квантовой и дифракционной элек-

троники при создании генераторов и усилительных устройств. С помощью ОР изучают поверхностные свойства металлов, определяют степень поглощения энергии в газах, осуществляют диагностику плазмы и электронных потоков, измеряют диэлектрические свойства твердых веществ и жидкостей и т.д. Но, несмотря на столь разнообразное применение открытых структур, их теоретическое исследование длительное время проводилось на основе асимптотических и эвристических методов: геометрической оптики, лучевого метода, метода параболического уравнения и др. [5,6].

Цель работы – предложить методику моделирования спектральных и дифракционных характеристик открытых резонаторов, содержащих внутри себя неоднородные включения, позволяющих обеспечить единый подход к исследованию электродинамических характеристик при их создании.

Рассмотрим построение матричной оператор-функции в случае, когда диэлектрическое включение в открытом резонаторе представляет собой круговой цилиндр, заполненный неоднородной изотропной средой, для которой  $\varepsilon = \varepsilon(r)$  и  $\mu = \mu(r)$  – аналитические комплекснозначные функции, когда  $0 \leq r \leq b$ , где  $b$  – радиус включения.

$$\text{Пусть } \alpha(r) = \frac{\gamma(r)}{\gamma(r)}, \beta(r) = \varepsilon(r)\mu(r), \text{ где } \gamma(r) = \begin{cases} \varepsilon(r), & H\text{-случай;} \\ \mu(r), & E\text{-случай.} \end{cases}$$

Тогда с учетом условий сопряжения на границе включения, Мейкснера и уходящего излучения Рейхарда [7] можно рассмотреть дифференциальный оператор вида

$$Bu(x, y) = \begin{cases} \Delta u(x, y) - \alpha(r) \frac{\partial u(x, y)}{\partial r}, & 0 \leq r \leq b \\ \Delta u(x, y), & r > b; \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа в полярных координатах.

Разделяя переменные  $u(r, \varphi) = R(r)\Phi(\varphi)$  в дифференциальном уравнении

$$u_{rr}'' + \left( \frac{1}{r} - \alpha(r) \right) u_r' + \frac{1}{r^2} u_{\varphi\varphi}'' + k^2 \beta(r) u = 0; \quad (2)$$

получим

$$\begin{cases} R_{rr}'' + \left( \frac{1}{r} - \alpha(r) \right) R_r' + \left( \beta(r)k^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) R = 0, \\ \Phi_{\varphi\varphi}'' + m^2 \Phi = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число,  $0 \leq r \leq b$ ,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ .

Решением второго уравнения (3) будет система функций  $\{\exp(imr)\}_{m=-\infty}^{\infty}$ , которая является полной и ортогональной в пространстве функций  $L^2(0, 2\pi)$ . Выполнив замену переменных  $\xi = \frac{r}{b}$ ,  $0 \leq \xi \leq 1$  и переписав первое уравнение (3) с учетом:

$u = u(\xi)$ ,  $\frac{du}{dr} = \frac{1}{b} \frac{du}{d\xi}$ ,  $\frac{d^2u}{dr^2} = \frac{1}{b^2} \frac{d^2u}{d\xi^2}$ ,  $\alpha(r) = \frac{1}{b} \alpha(\xi)$  получим дифференциальное уравнение вида

$$\xi^2 \frac{d^2u}{d\xi^2} + \xi(1 - \xi\alpha(\xi)) \frac{du}{d\xi} + (\kappa^2 \xi^2 \beta(\xi) - m^2)u = 0, \quad (4)$$

где  $\kappa = kb = \frac{2\pi b}{\lambda}$  – безразмерный спектральный параметр. Решение уравнения (4)

можно провести двумя способами: представлением искомой функции  $u(\xi)$  обобщенным степенным рядом

$$u_m(\xi) = \sum_{n=0}^{\infty} F_n \xi^{n+m} \quad (n \neq 0) \quad (5)$$

где коэффициенты  $F_n$  ( $n \neq 0$ ) определяются из следующих рекуррентных соотношений

$$n(n+2m)F_n + \sum_{j=0}^{\infty} [\beta_{n-j-2} \kappa^2 - \alpha_{n-j-1}(j+m)] F_j = 0 \quad (6)$$

или методом последовательных приближений, разработанным в [8].

Для  $E$  – случая задача на собственные двумерные колебания открытого резонатора с неоднородным диэлектрическим включением сводится к решению однородной системы линейных алгебраических уравнений второго рода:

$$z_m^p = \sum_{j=1}^3 \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_{nm}^{pj}(k) z_m^j, \quad p=1, 2, 3 \quad (7)$$

$$P_{nm}^{31}(k) = \frac{\mu(1) - \mu_0}{\mu(1) + \mu_0} \frac{J_{m-n}(kl_{31})}{J_m(k\alpha_1) H_n^{(1)}(kb)} e^{i(m-n)\psi_{13}}$$

$$P_{nm}^{32}(k) = \frac{\mu(1) - \mu_0}{\mu(1) + \mu_0} \frac{H_{m-n}^{(1)}(kl_{32})}{H_m^{(1)}(k\alpha_2) H_n^{(1)}(kb)} e^{i(m-n)\psi_{23}}$$

$$P_{nm}^{33}(k) = \left[ 1 - \frac{\mu(1) - \mu_0}{\mu(1) + \mu_0} \Pi_n(kb, u) \right] \delta_m^n$$

$$\Pi_n(kb, u) = \frac{\kappa w_0 \mu(1) \frac{H_n^{(1)'}(kb)}{H_n^{(1)}(kb)} - \frac{u_n'(1)}{u_n(1)}}{\frac{u_n'(1)}{u_n(1)} - \kappa w_0 \mu(1) \frac{J_n'(kb)}{J_n(kb)}}$$

В  $H$ -случае аналогичная система уравнений имеет вид:

$$x_n^p = \sum_{j=1}^3 \sum_{m=-\infty}^{\infty} B_{nm}^{pj}(k) x_m^j, \quad p=1,2,3 \quad (8)$$

$$B_{nm}^{33}(k) = \left[ 1 - \frac{\varepsilon(1) - \varepsilon_0}{\varepsilon(1) + \varepsilon_0} \Pi_n(kb, u) \right] \delta_m^n;$$

$$B_{nm}^{3j}(k) = \frac{\varepsilon(1) - \varepsilon_0}{\varepsilon(1) + \varepsilon_0} \frac{R_m(ka_j) T_{m-n}(kl_{3j})}{H_m^{(1)}(kb)} e^{i(m-n)\psi_{j3}}, \quad (j=1,2),$$

$$\Pi_n(kb, u) = \frac{\frac{\kappa\varepsilon(1)}{w_0} \frac{H_n^{(1)}(kb)}{H_n^{(1)}(kb)} - \frac{u'_n(1)}{u_n(1)}}{\frac{u'_n(1)}{u_n(1)} - \frac{\kappa\varepsilon(1)}{w_0} \frac{J_n(kb)}{J_n(kb)}}$$

В [9] доказано, что  $P(k)$  — ядерная оператор-функция, конечномероморфно зависящая от  $k \in R_k$ . Из ядерности оператор-функции  $P(k)$  следует, что  $k_0$  является характеристическим числом оператор-функции, тогда и только тогда, когда  $I - P(k)$  удовлетворяет уравнению  $\det(I - P(k)) = 0$ , где  $\det(I - P(k))$  — бесконечный характеристический определитель оператор-функции  $I - P(k)$ . Таким образом спектры комплексных собственных частот исследуемых электродинамических структур являются дискретными и имеют конечную кратность и могут быть проанализированы с помощью численных методов в резонансной области частот.

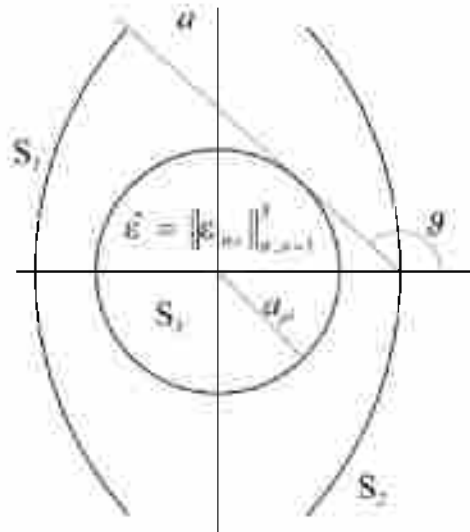


Рисунок 1 – Геометрия задачи

Рассмотрим в качестве открытого резонатора один круговой цилиндр радиуса  $a$ , с продольной щелью  $2g$ . Поместим внутрь этого ОР, сместив от его центра на



расстояние  $l_{12}$  плазменный цилиндр радиуса  $a_{pl}$ , у которого следующие плазменные параметры:  $k_p$  – плазменная частота,  $k_c$  – электронная циклотронная частота,  $\nu$  частота столкновения электронов,  $\mu = \|\mu_{ns}\|_{n,s=1}^3$   $S_1$  и  $S_2$  – зеркала открытого резонатора,  $S_3$  – поперечное сечение кругового цилиндра с границей  $\partial S_3$ , заполненного средой, диэлектрическая и магнитная проницаемость которой описываются соответственно тензорами  $\varepsilon = \|\varepsilon_{ns}\|_{n,s=1}^3$  и  $\mu = \|\mu_{ns}\|_{n,s=1}^3$ . Будем рассматривать длинноволновую область  $ka_1 < 1$ . Эта область характерна тем, что, как следует из формул (7), (8) в длинноволновой области сам плазменный цилиндр обладает поверхностным собственным колебанием, действительная часть собственной частоты которого приближенно равна так называемой предельной частоте поверхностной волны [10]  $k = k_p / \sqrt{2}$ .

С другой стороны, в случае  $H$ -поляризованных электромагнитных колебаний одиночный цилиндр с продольной щелью также обладает в длинноволновой области собственным колебанием, собственная частота которого определяется по формуле

$$k = \frac{\sqrt{-2 \ln(\sin(0.5\vartheta_1))}}{a_1}$$

В связи с этим представляет интерес поведение этих собственных частот в системе ОР с плазменным включением при изменении параметров плазменного включения. На рисунках 2 и 3 представлены зависимости действительных частей этих собственных частот и десятичных логарифмов добротностей  $\log Q$ , соответствующих им собственных колебаний, от плазменной частоты  $k_p$  для различных значений циклотронной частоты  $k_c$  в случае, когда половина щели в цилиндре  $\vartheta_1 = 10^\circ$  и центр плазменного цилиндра, радиус которого  $a_{pl} = 0,2a_1$ , смещен от центра металлического цилиндра на величину  $l_{12} = 0,15$  (рисунок 2 – для собственного колебания плазменного цилиндра, рисунок 3 – для длинноволнового собственного колебания щелевого цилиндра).

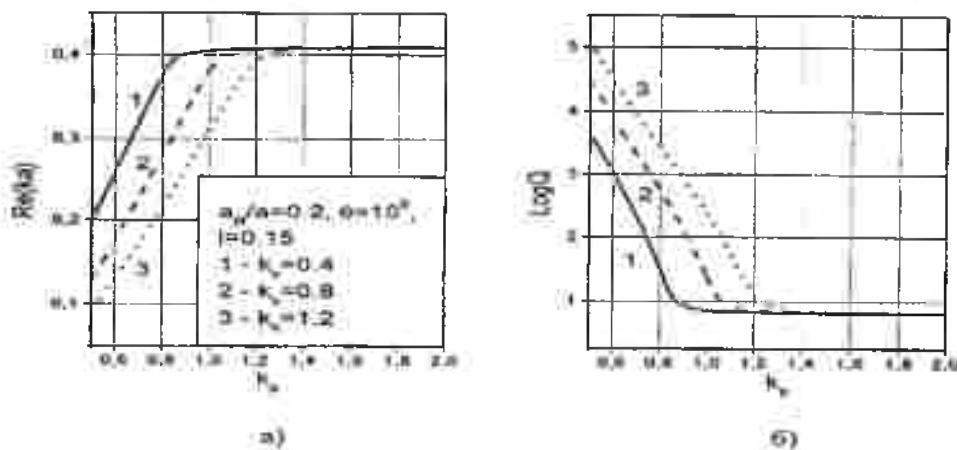


Рисунок 2 – Зависимости действительных частей собственных частот и десятичных логарифмов добротностей собственных колебаний от плазменной частоты

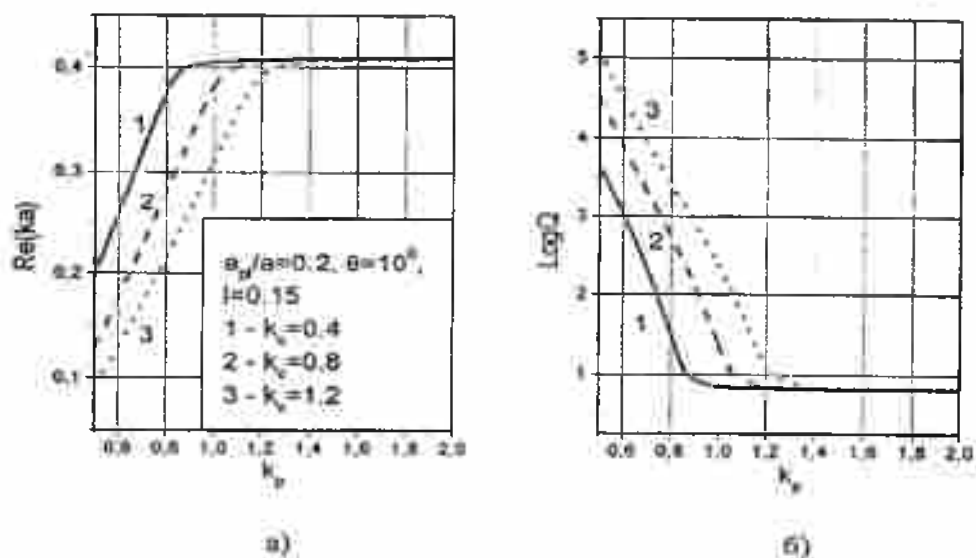


Рисунок 3 – Зависимости действительных частей собственных частот и десятичных логарифмов добротностей собственных колебаний от плазменной частоты

Особенностью поведения как  $Re(ka)$ , так и  $\log Q$  для этих собственных колебаний является то, что для каждого заданного значения  $k_c$  существует три диапазона изменения  $k_p$ , назовем их условно диапазоны I, II, III, в каждом из которых  $Re(ka)$  и  $\log Q$  имеют характерное поведение. Объясним это на примере, когда циклотронная частота  $k_c = 0,4$  (на рисунках 2 и 3 соответствующие кривые являются линиями из точек):

- диапазон I – это  $0,5 \leq k_p \leq 0,8$ , для плазменного цилиндра  $Re(ka)$  монотонно и почти линейно возрастает, а  $\log Q$  также монотонно убывает, для щелевого цилиндра  $Re(ka)$  и  $\log Q$  практически не зависят от изменения  $k_p$ ;

- диапазон II –  $0,8 \leq k_p \leq 1,2$ , в этом диапазоне как для плазменного цилиндра, так и для щелевого цилиндра  $Re(ka)$  и  $\log Q$  резко изменяют характер своего поведения;

- диапазон III –  $1,2 \leq k_p \leq 2,0$ , в этом диапазоне для щелевого цилиндра  $Re(ka)$  монотонно и почти линейно возрастает и  $\log Q$  также растет, а для плазменного цилиндра  $Re(ka)$  и  $\log Q$  практически не зависят от изменения  $k_p$  [11].

Аналогичное поведение в диапазонах I, II и III  $Re(ka)$  и  $\log Q$  имеют как для

$k_c = 0,8$  так и для  $k_c = 1,2$ . При всех заданных значениях  $k_c$  для плазменного цилиндра в диапазоне III (а для щелевого цилиндра в диапазоне I)  $\text{Re}(ka)$  и  $\log Q$  имеют одни и те же значения, практически не зависящие и от  $k_p$ . Такое поведение действительных частей собственных частот и добротностей собственных колебаний плазменного и щелевого цилиндров дает основание утверждать, что при изменении  $k_p$  в диапазоне II происходит взаимодействие этих собственных колебаний, т.е. они вступают в междутиповую связь.

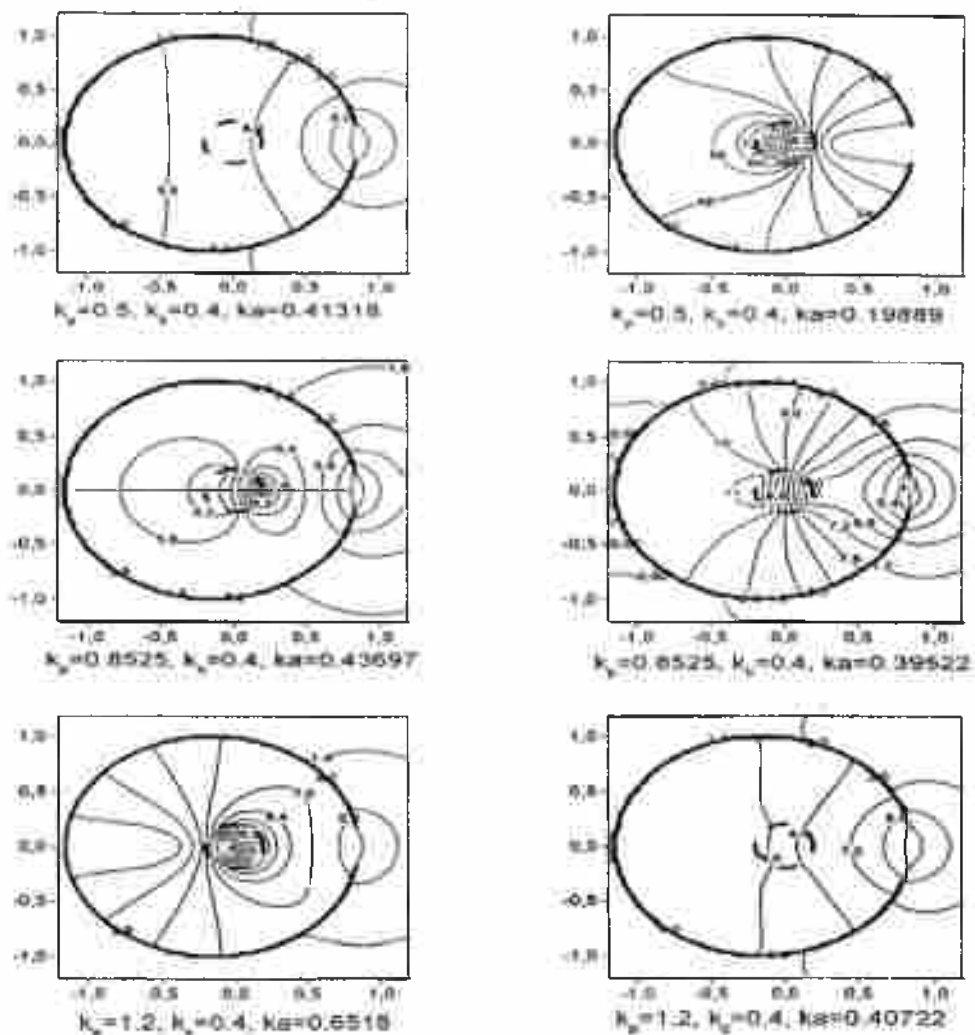
В диапазоне II изменения параметра  $k_p$  происходит не только резкое изменение характера поведения действительных частей собственных частот и добротностей собственных колебаний плазменного и щелевого цилиндров, но и обмен типами колебаний соответствующих зависимостей  $\text{Re}(ka)$ .

Это показано на рис.4 а) и б), на которых представлены линии равных значений модуля  $|\dot{H}_z|$  полного магнитного поля  $\dot{H}_z$  (единственной отличной от нуля компоненты), которое возбуждается в резонаторе  $H$ -поляризованной плоской электромагнитной волной на действительных частотах собственных частот для щелевого цилиндра и плазменного цилиндра при  $k_c = 0,4$  и значениях  $k_p$  из диапазонов I, II, и III. Из рис. 4 а) видно, что когда  $k_p = 0,5$  принадлежит диапазону I, поле, возбуждаемое в открытом резонаторе, является «чистым» полем щелевого цилиндра; когда  $k_p = 0,8525$  принадлежит диапазону II, поле, возбуждаемое в ОР, является «гибридным» и имеет компоненты собственных полей щелевого и плазменного цилиндров; а когда  $k_p = 1,2$  принадлежит диапазону III, поле, возбуждаемое в открытом резонаторе, является уже «чистым» полем плазменного цилиндра. И наоборот, как видно из рис. 4 б), когда  $k_p = 0,5$  принадлежит диапазону I, поле, возбуждаемое в открытом резонаторе, является «чистым» полем плазменного цилиндра; когда  $k_p = 0,8525$  принадлежит диапазону II, поле, возбуждаемое в открытом резонаторе, является «гибридным» и имеет компоненты собственных полей щелевого и плазменного цилиндров; а когда  $k_p = 1,2$  принадлежит диапазону III, поле, возбуждаемое в открытом резонаторе, является уже практически «чистым» полем щелевого цилиндра.

### Заключение

Таким образом, установлено, что в открытом резонаторе с плазменным включением в длинноволновой области существуют такие диапазоны изменения плазменной частоты  $k_p$ , в которых вступают в междутиповую связь собственные колебания, имеющие разную физическую природу, а именно: собственные колебания открытого резонатора и собственные колебания плазменного образования. При

этом, как было показано выше, в этом диапазоне вариации  $k_p$  существенно изменяются спектральные свойства (поведение собственных частот и добротностей собственных колебаний) этих электродинамических объектов.



А)

Б)

Рисунок 4 – Поле, возбуждаемое в резонаторе  $H$ -поляризованной плоской электромагнитной волной на действительных частях собственных частот для щелевого цилиндра и плазменного цилиндра

#### Литература

- 1 Белостоцкий В.В., Васильев Е.Н. Интегральное уравнение открытого резонатора с диэлектрическим диском / В кн.: VIII Всес. симпозиум по дифракции и распространению волн. Тезисы докл. Т. 1. – М., 1981. – С.205-208.
- 2 Бровенко А.В., Мележик П.Н., Панин С.Б., Поединчук А.Е. Дифракция волн на ленточной решетке, расположенной на границе слоисто-неоднородной среды:

метод аналитической регуляризации // Изв. вузов. Радиофизика. – 2013. – т.56, № 4. – С. 265–276.

3 Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. – М.: Сов. радио, 1966. – 465 с.

4 Войтович Н. Н. и др. Опыт исследования резонаторов сложной формы обобщенным методом собственных колебаний / В кн.: VIII Всес. симпозиум по дифракции и распространению волн. Тезисы докл. Т. 1. – М., 1981. – С.201-204.

5 Ильинский А. С., Шестопапов Ю. В. О спектре нормальных волн шелевых линий передачи // Радиотехн. и электроника – 1981. – т. 26, № 10. – С.2064-2073.

6 Ковалев И.П., Кузикова Н.И. Дополнительные сферические экраны // Антенны. – 2021. – №2. – С.48-55.

7 Кошпаренок В.Н., Мележик П.Н., Поединчук А.Е., Шестопапов В.П. Спектральная теория открытых двумерных резонаторов с диэлектрическими включениями // ЖВМ и МФ. – 1985. – 25:4. – С.562-577.

8 Крячко А.Ф., Ковалев М.А., Ревунов Г.М., Тюрина А.И. Диагностика гиперзвуковой плазмы методом собственных электромагнитных колебаний открытого резонатора с неоднородными включениями // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2021. – Т. 26. № 1. – С.13-20.

9 Майков А.Р., Поезд А.Д., Свешников А.Г., Якунин С.А. Нелокальные условия излучения для нестационарной системы уравнений Максвелла // ЖВМ и МФ. – 1990. – т.30, №12.

10 Селезов Н.Т., Яковлев В.В. Дифракция волн на симметричных неоднородностях. – Киев: Наук. думка, 1978. – 148 с.

11 Шестопапов Ю. В. К обоснованию спектрального метода расчета собственных волн микрополосковых линий // Дифф. ур. – 1980. – т. 16, № 8. – С.1504-1512.

Крячко Александр Федотович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, ГУАП, г.Санкт-Петербург.

Область научных интересов: радиотехнические и оптоэлектронные комплексы.

Email: alex\_k34.ru@mail.ru

Ревунов Глеб Михайлович – аспирант, ГУАП, г.Санкт-Петербург.

Область научных интересов: радиотехнические и оптоэлектронные комплексы.

Email: revunpank@gmail.com

Беляков Никита Иванович – аспирант, ГУАП, г.Санкт-Петербург.

Область научных интересов: радиотехнические и оптоэлектронные комплексы.

Email: nikit175@mail.ru

## LIMITING PROPERTIES OF DIFFRACTION OPEN RESONATORS

Approximate models of open structures with plasma inclusion describe the spectral characteristics of such electrodynamic objects rather roughly. In this connection it is of interest to study them on the basis of a rigorous model in order to find out the peculiarities of their behavior on various geometrical and electrodynamic parameters. Analytical physical and

mathematical models of the spectral characteristics of the resonator on the basis of the matrix operator-function calculation in the case of an inhomogeneous dielectric inclusion are presented. For various fields of plasma physics and biophysics, the studies of the spectral and diffraction characteristics of the open resonators containing various inhomogeneous inclusions, whose material parameters depend on spatial coordinates or on the frequency parameters of the structure, are of great interest. The results obtained can be used in the study of the properties of such objects.

**Keywords:** Open resonator, plasma inclusion, spectral characteristics, long-wave region, matrix operator-function

**Kryachko Alexander Fedotovitch** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, SUAI, St. Petersburg.

Area of scientific interests: radio engineering and optoelectronic complexes.

**Revunov Gleb Mikhailovich** – graduate student, SUAI, St. Petersburg.

Area of scientific interests: radio engineering and optoelectronic complexes.

**Belyakov Nikita Ivanovich** – graduate student, SUAI, St. Petersburg.

Area of scientific interests: radio engineering and optoelectronic complexes.

УДК 006.924.4

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПАКТНЫХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ В КОМПЛЕКСАХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ТАКТИЧЕСКОГО ЗВЕНА**

Михайлов С.В., Исаев С.Д., Пальгин Н.И., Шмелев А.А.

*В работе описаны предпосылки создания единой системы управления (ЕСУ) войсками и оружием в тактическом звене (ТЗ), в структуре которой одну из важных ролей играет система единого времени (СЕВ). Учитывая реалии современной политической обстановки в мире, показавшей недостаточный уровень предоставления временной информации для использования аппаратными и программными средствами программно-технических комплексов в рамках функционирования в цикле единого времени, необходима разработка нового подхода, позволяющего обеспечить более высокую точность синхронизации информации от различных источников к единому моменту времени.*

*Ключевые слова:* система единого времени, спутниковая навигация, PPS-сигнал, протокол NTP, клиент-сервер, КМОП уровень, интерфейсная микросхема, синхронизация.

### **Введение**

В результате военных конфликтов в конце XX века с участием вооруженных сил (ВС) РФ начала нарастать неудовлетворенность состоянием и низкой эффективностью систем управления войсками. Указом Президента Российской Федерации от 2000 года перед оборонно-промышленным комплексом (ОПК) была поставлена задача по созданию ЕСУ войсками и оружием в ТЗ, в результате чего к 2010 году ожидался выход средств, комплексов и систем управления ТЗ на самый передовой уровень. Центром формирования соответствующих компетенций стало ОАО «Концерн «Созвездие», образованное в 2004 году на базе Воронежского научно-исследовательского института (НИИ) связи, что дало одноименное название всей системе – ЕСУ ТЗ «Созвездие» [1, 2].

ЕСУ ТЗ представляет собой взаимосвязанную и унифицированную совокупность интегрированных программно-технических комплексов, систем связи и обмена данными органов управления, пунктов управления и комплексов вооружения (оружия, боевых средств) типовых тактических воинских формирований (ТВФ). Задача ЕСУ ТЗ – обеспечение управления (в автоматизированном и неавтоматизированном режимах) войсками в мирное время, при переводе войск с мирного на военное положение, а также в военное время при подготовке и в ходе ведения боевых действий.

В ЕСУ ТЗ реализован сетевый принцип управления. В общие контуры управления включаются как командные пункты разного уровня, так и отдельные

подразделения, машины и т.д. Каждый элемент такой системы решает свои задачи и взаимодействует с другими, на своем уровне или выше. При помощи ЕСУ ТЗ в реальном едином времени формируется максимально подробная карта поля боя с различными объектами противника и выявленными целями. Благодаря этому командование получает возможность видеть всю ситуацию в зоне операции и максимально эффективно использовать вверенные силы и средства [3].

Одну из важных ролей в структуре ЕСУ ТЗ играет СЕВ. Ее программно-технические средства выполняют следующие функции:

- функционирование объектов ЕСУ соединения в шкале единого времени;
- предоставление временной информации для использования должностными лицами органов управления, а также аппаратными и программными средствами унифицированных программно-технических комплексов (УПТК);
- автоматическое формирование даты и времени во всех передаваемых и получаемых сообщениях на средствах типовых систем управления ТВФ;
- функциональный контроль за работой средств единого времени и выдачи его результатов в программные средства системы контроля и управления функционированием (СКУФ).

Для обеспечения функционирования элементов ЕСУ ТЗ в системе единого времени разработано программное обеспечение временного обеспечения (ПО ВО), которое предназначено для обеспечения должностных лиц и технических средств тактического звена управления единым временем.

ПО ВО обеспечивает автоматизированное выполнение следующих функций:

- поддержка получения единого времени от спутниковой радионавигационной системы;
- поддержка получения времени от средств государственной службы времени и частот;
- автоматическая синхронизация полученного времени и системного времени операционной системы;
- централизованная и децентрализованная установка, ведение и индикация единого времени;
- поддержка различных вариантов представления времени;
- предоставление временной информации для использования должностными лицами органов управления, а также аппаратными и программными средствами УПТК в рамках функционирования в шкале единого времени;
- синхронизация и привязка к единому времени процессов и функций, выполняемых средствами УПТК, комплексов средств автоматизации (КСА) пунктов управления (ПУ) ТВФ.

### **1 Необходимость приведения информации от различных источников к единому моменту времени**

Для удовлетворения современных требований к эффективности работы сетей устройств – источников информации пакеты данных должны доставляться максимально быстро и с минимальными потерями. Из-за влияния недетерминированных и неограниченных задержек сообщений синхронизация внутри сети может быть



нарушена. Соответственно, для постоянной доступности устройств и программных средств, а также их высокой производительности необходимо разворачивать и поддерживать системы сетевого мониторинга, которые помогают не допускать появления нарушений работы сети, впоследствии приводящие к ошибкам и прекращению работы всей системы [4, 5].

В процессе работы таких систем должна осуществляться синхронизация временных меток, добавляемых к пакетам данных. Синхронизация времени также необходима для реализации алгоритмов временного разделения каналов передачи сообщений, для объединения данных с разных адресов и формирования единого результата, а также для локализации и навигации автономных транспортных средств [6].

## 2 Принцип построения СЕВ в изделиях разработки АО «НПП «Рубин»

Все составные части ЕСУ ТЗ получают временную информацию от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) типа ГЛОНАСС и GPS, взаимодействие с которыми осуществляется посредством применения специализированной аппаратуры спутниковой навигации (АСН). Космические навигационные аппараты (КНА) ГНСС оснащены атомными часами, в которых используются внутренние высокостабильные генераторы опорной и тактовой частот для измерения временных характеристик.

В изделиях разработки АО «НПП «Рубин», в том числе в опытных образцах, входящих в состав ЕСУ ТЗ «Созвездие», применяется несколько разновидностей АСН, передающей высокоточную временную информацию объектам-носителям. К ним относятся АСН 14Ц821СЖ ЦДКТ.464316.597-01, 14Ц825 ЦДКТ.464316.031 производства АО «ОРКК «НИИ КП», а также помехозащищенная навигационная аппаратура потребителей (НАП) для оснащения мобильных наземных объектов сухопутных войск (СВ) и воздушно-десантных войск (ВДВ) 14Ц8023 (НАП «Потребитель-ПН») ТДЦК.461513.141 производства АО «КБ НАВИС». Внешний вид АСН приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид АСН

СЕВ в изделиях реализована на основе протокола Network Time Protocol (NTP), который синхронизирует устройства относительно времени, выданного АСН. NTP использует иерархическую систему источников точного времени. На клиентах запускается NTP-демон, устанавливающий и поддерживающий системное время, а также использующийся для синхронизации серверами точного времени, в качестве которых выступают время первого автоматизированного места (АРМ) изделия, полученное от АСН, и локальные часы клиента. Для мониторинга операций NTP-

демона и определения точности синхронизации применяется утилита «ntpq -p». Клиент NTP с определенной периодичностью вычисляет смещение времени (параметр «offset»), которое представляет собой разницу времени между часами сервера и клиента. Полученные значения смещения пропускаются через фильтры и подвергаются статистическому анализу. Выбросы из общей выборки отбрасываются, и оценка временного смещения производится на основе оставшихся значений. В ходе синхронизации величина параметра «offset» должна понижаться (приближаться к нулю), указывая на то, что часы локальной машины идут все точнее. Наиболее высокая точность синхронизации в этом случае достигается, когда величины задержек при пересылке пакетов в обоих направлениях одинаковы. Загруженность каналов передачи данных и коммутирующего оборудования, а также использование сложной системы маршрутизации могут значительно ухудшить точность. В случае превышения погрешности синхронизации часов сервера и клиента на величину более 50 мс происходит отключение NTP-демона, после чего синхронизация часов выполняется командой «ntpddate», которая устанавливает системное время с сервера времени NTP. Далее происходит повторный запуск NTP-демона с последующим мониторингом и определением точности синхронизации времени. Фрагмент описанного алгоритма синхронизации времени в ОС Astra Linux 1.6 приведен на рисунке 2.

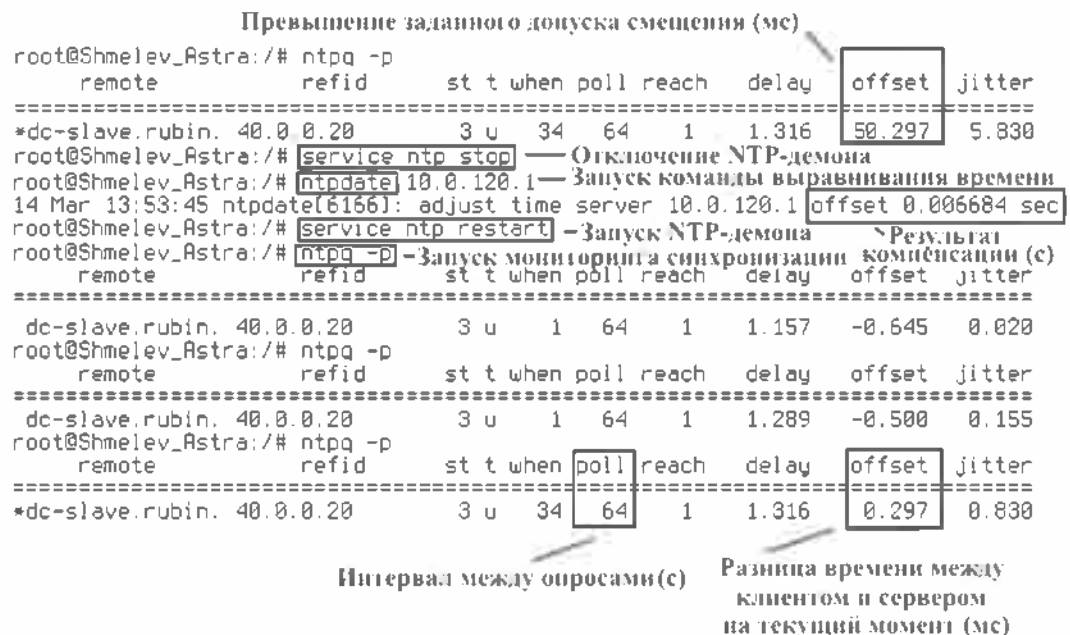


Рисунок 2 – Синхронизация часов клиента и сервера в ОС Astra Linux 1.6

Работа NTP в изделиях возможна также в режиме широковещательной рассылки. В этом случае сервер передаёт пакеты данных, предназначенные определённым устройствам, входящим в логическую группу. Для включения клиентов в такую группу им всем присваивается один и тот же групповой IP-адрес из специального

диапазона. При получении коммутатором пакета, предназначенного для группы, он будет передан на все устройства, которые были зарегистрированы как участники этой группы. На устройства, подключенные к коммутатору, но не входящие в группу, этот пакет не передаётся. Такой режим позволяет уменьшить нагрузку на пропускную способность сетевого оборудования, поскольку данные передаются только в одном направлении – от сервера клиентам, и только тем устройствам, которые являются участниками группы [7, 8].

### 3 Повышение точности синхронизации времени

Применение технологии NTP – это хороший выбор в тех случаях, когда достаточно точности синхронизации в диапазоне миллисекунд. Для таких применений NTP является самым простым и экономичным решением. Он надежен, стабилен и прост в настройке, а также не требует каких-либо специальных конфигураций или оборудования в базовой сети. Однако для удовлетворения современных требований к эффективности работы КСА и систем управления ТЗ, а также для их выхода на передовой уровень, учитывая современную политическую обстановку в мире, целесообразно применение NTP совместно со специализированным оборудованием, способным аппаратно выставлять метки времени в передаваемых пакетах непосредственно перед моментом отправки их в канал связи, что позволит обеспечить более высокую точность синхронизации [9, 10]. В качестве такого оборудования возможно применение АСН, изображенной на рисунке 1. При этом следует отметить, что функционал НАП «Потребитель-ПН» обладает самостоятельной возможностью выдачи метки времени по интерфейсу RS-422 и её синхронизации с системными шкалами ГНСС ГЛОНАСС, GPS или со шкалами времени UTC (SU) и UTC с проверкой достоверности, в то время как функционал АСН 14Ц821СЖ, 14Ц825 обеспечивает выдачу импульса метки времени (PPS сигнал) с характеристиками, приведенными на рисунке 3.

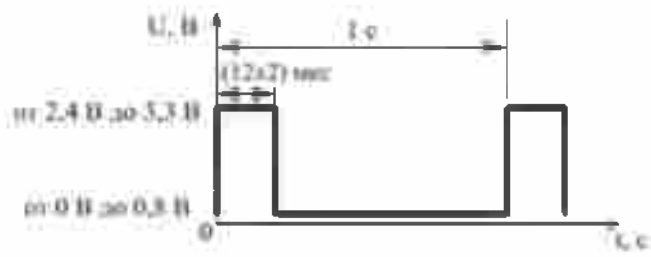


Рисунок 3 – Оциллограмма метки времени АСН 14Ц821СЖ, 14Ц825

АСН 14Ц821С, 14Ц825 обеспечивают выработку метки времени с погрешностью не более 200 нс, а выдачу её кода оцифровки и значения поправки на расхождение шкалы времени АСН относительно шкалы времени UTC (SU) с округлением до 10 нс. Выходной импульс секундной метки времени длительностью 12±2 мкс выводится КМОП уровнем, оцифровка осуществляется по протоколам BINR и NMEA.

Пространственно-временная информация от АСН 14Ц821СЖ, 14Ц825 передается в БВК изделия по интерфейсу RS-232. Уровни напряжений, соответствующие

логическому нулю и единице для управляющих сигналов стандарта RS-232, приведены на рисунке 4.

Анализируя рисунки 3 и 4 видно, что сигнал метки времени АСН попадает в зону неопределенности, которая является недопустимым уровнем интерфейса RS-232. Поэтому напрямую вывести PPS сигнал от АСН по данному стандарту не получится из-за специфики сигнала. Отдельной линией выводить метку времени не всегда возможно и целесообразно. В этом случае на БВК изделия необходимо наличие свободного порта способного отождествить данный вид сигнала, поскольку напрямую он не воспринимается вычислителем.

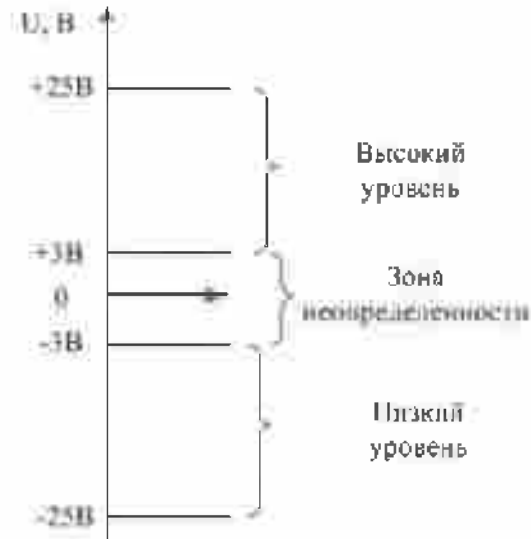


Рисунок 4 – Уровни сигналов стандарта RS-232 для приемного устройства

При достаточно высокой стоимости НАП «Потребитель-ПН» относительно других рассматриваемых АСН, её применение во всех разрабатываемых изделиях специального назначения в некоторых случаях выходит слишком затратным и нерациональным. В связи с этим становится актуальным применение технического решения, позволяющего при необходимости использования АСН 14Ц821СЖ, 14Ц825 осуществить преобразование сигнала метки времени, выдаваемого данной аппаратурой, в сигнал корректно воспринимаемый БВК.

#### 4 Применение преобразователя метки времени

Учитывая, что в большинстве случаев при работе по интерфейсу RS-232 задействованы линии RXD, TXD и GND, для решения поставленной задачи в качестве согласующего устройства между АСН и БВК КСА возможно применение преобразователя, реализованного на основе микросхемы 5559ИН4У ТСКЯ.431323.001, которая имеет в своем составе передатчики RS-232, представляющие собой инвертирующие трансляторы уровней, преобразующие логические показатели сигнала PPS в  $\pm 5$  В до необходимых значений в соответствии со стандартом EIA/TIA-232. Выходной импульс метки времени АСН выводится КМОП уровнем на интерфейсную микросхему и после преобразования поступает на свободный входной контакт разъема БВК (например, CTS), программно задаваемый для работы на прием по интерфейсу RS-232 с использованием линии GND. Питание микросхемы обеспечивается за счет

передатчика вспомогательного сигнала в качестве которого выступает выходной контакт разъема БВК (например, RTC), на который программно устанавливается логический ноль с уровнем сигнала данных от 5 до 15 В. Проходя через стабилизатор, сигнал понижается до уровня 5 В, достаточного для питания микросхемы. Использование режима MegaBaud позволяет повысить скорость передачи данных до 1 Мбит/с. Обработанная временная информация по протоколу RS-232 далее может восприниматься аппаратурой и свободно передаваться по сети. Схема подключения преобразователя и его структурная схема приведены на рисунках 5 и 6 соответственно.

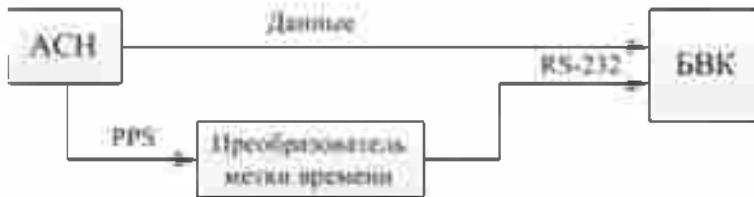


Рисунок 5 – Схема подключения преобразователя метки времени

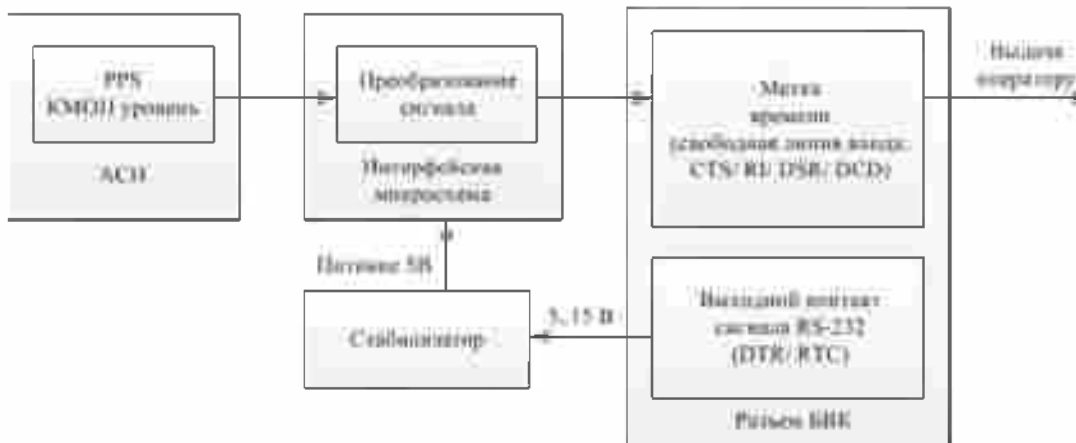


Рисунок 6 – Структурная схема преобразователя метки времени

Простота предлагаемого решения позволяет осуществить конструктивное встраивание преобразователя в жгут подключения АСН к БВК и не использовать для этих целей отдельное корпусное устройство, монтируемое на изделии-носителе. Предполагаемый внешний вид и конструкция преобразователя изображены на рисунке 7.



Рисунок 7 – Внешний вид и конструкция преобразователя

Результаты тестирования показали, что погрешность синхронизации часов клиента и сервера при использовании протокола NTP составила 0,218 мс, в то время как применение NTP с коррекцией сигналом PPS, выдаваемым АСН, позволило уменьшить погрешность до 0,00117 мс или 1,17 мкс.

### Выводы

Возможность синхронизации временной информации в сетях и возможность ее корректировки являются важными инструментами во многих сферах, особенно в навигации. Применение предлагаемого технического решения позволит повысить точность синхронизации и привязки к единому времени основных процессов и функций, выполняемых средствами специализированных программно-технических комплексов и КСА пунктов управления в ЕСУ ТЗ «Созвездие», а также в изделиях разработки АО «НПП «Рубин».

### Литература

1 Соколов А.В. От «Ясеня» до «Акации» и «Созвездия». Создание и совершенствование отечественных автоматизированных систем управления войсками и оружием // Военно-исторический журнал. – 2021. – №2. – С.4-10.

2 Безяев В.С., Зябиров Э.В., Михайлов С.В., Филюшкин И.П. РИ-обеспечение подсистемы ПВО ЕСУ ТЗ и пути его совершенствования // Сборник научных статей. - ЦНИИ ВВС. – 2017. – С.46-49.

3 Окунев В. К вопросу о формировании единого информационного пространства тактического звена // Армейский сборник. – 2016. – №4. – С.3-6.

4 Успенский М.И. Оценка воздействия космической погоды на синхронизацию времени в системе мониторинга переходных режимов // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2018. – №3 (35).

5 Мейта Р.В. Синхронизация времени во встраиваемых системах / Р.В. Мейта, Е.А. Першин, А.А. Шамин, М.А. Сонькин // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIII Международной НПК. – Томск: ТПУ, 2016. – С.26-27.

6 Алджиязна В.К.М., Плотников Д.А. Особенности реализации протокола NTP для микропроцессорных систем с ограниченными вычислительными ресурсами / Фундаментальные основы, теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики. Материалы 19-ой Международной молодежной научно-практической конференции. 2018. С. 178-183.

7 Vermeij A. A robust, opportunistic clock synchronization algorithm for ad hoc underwater acoustic networks / Vermeij A., Munafo A. // IEEE Journal Of Oceanic Engineering, vol. 40 – 2015 – №4.

8 Mills, David L. Computer Network Time Synchronization: the Network Time Protocol on Earth and in Space, Second Edition, CRC Press 2017, 494 pp.

9 Канаев А.К., Тощев А.К. Построение сети синхронизации с использованием протокола NTP / сборник трудов Юбилейной 70-й всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню радио – 2015. С. 271-273.

10 Семенов С.А. Повышение точности сравнения шкал времени в сети связи интернет на базе NTP серверов уровня Stratum 1 / Метрология в XXI веке. Доклады научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов. Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-

исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений». 2014. С. 107-114.

Михайлов Сергей Владимирович – начальник сектора, АО «НПП «Рубин», г.Пенза.  
Область научных интересов: компактные схемотехнические решения, синхронизация, средства автоматизации.  
E-mail: ntc2@npp-rubin.ru

Исаев Сергей Дмитриевич – инженер-электроник, АО «НПП «Рубин», г.Пенза.  
Область научных интересов: компактные схемотехнические решения, синхронизация, средства автоматизации.  
E-mail: ntc2@npp-rubin.ru

Пальгин Никита Игоревич, заместитель начальника отдела, АО «НПП «Рубин», г.Пенза, .  
Область научных интересов: компактные схемотехнические решения, синхронизация, средства автоматизации.  
E-mail: ntc2@npp-rubin.ru

Шмелев Александр Анатольевич – инженер-программист, АО «НПП «Рубин», г.Пенза.  
Область научных интересов: компактные схемотехнические решения, синхронизация, средства автоматизации.  
E-mail: ntc2@npp-rubin.ru

Почтовый адрес: 440015, Пенза, ул. Байдукова, д. 2.

#### APPLICATION OF COMPACT CIRCUIT SOLUTIONS FOR INCREASING THE ACCURACY OF TIME SYNCHRONIZATION IN TACTICAL EQUIPMENT AUTOMATION COMPLEXES

The paper describes the prerequisites for the creation of a unified control system (UCS) for troops and weapons at the tactical level (TZ), in the structure of which the unified time system (STS) plays an important role. Taking into account the realities of the modern political situation in the world, which has shown an insufficient level of provision of time information for the use of hardware and software of software and hardware systems within the framework of functioning on a single time scale, it is necessary to develop a new approach to ensure higher accuracy of synchronization of information from various sources to a single moment time.

Key words: unified time system, satellite navigation, PPS signal, NTP protocol, client-server, CMOS level, interface chip, synchronization.

Mikhailov Sergey Vladimirovich – head of the sector, JSC NPP Rubin, Penza.  
Area of scientific interests: compact circuit solutions, synchronization, automation tools.  
E-mail: ntc2@npp-rubin.ru

Isaev Sergey Dmitrievich – electronics engineer, JSC NPP Rubin, Penza.  
Area of scientific interests: compact circuit solutions, synchronization, automation tools.

Palgin Nikita Igorevich, deputy head of department, JSC NPP Rubin, Penza, .  
Area of scientific interests: compact circuit solutions, synchronization, automation tools.

Shmelev Alexander Anatolyevich – software engineer, JSC NPP Rubin, Penza.  
Area of scientific interests: compact circuit solutions, synchronization, automation tools.

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ВИНТА МАЛЫХ РАЗМЕРОВ

Макеев А.А., Мамчиц А., Шувалов С.Е.

*Статья описывает подход к оценке параметров работы воздушного винта малых размеров с помощью методов вычислительной гидро-газодинамики. Работа направлена на оптимизацию размеров исследуемой области для уменьшения требуемых вычислительных ресурсов при проведении расчетов работы воздушного винта в нестационарной постановке. В качестве исследуемого тела взят трехлопастной воздушный винт диаметром 0,254 м. Контрольными параметрами являются сила тяги и распределение векторов скоростей в плоскости расчетной области. Воздушный винт вращается со скоростью 5000 об./мин. Проведено сравнение результатов виртуального эксперимента в зависимости от характеристического размера расчетной области и различных типов граничных условий.*

*Ключевые слова:* воздушный винт, газодинамика, численное моделирование, CFD.

### Введение

В последние годы отдельный толчок в развитии получили беспилотные летательные аппараты, а вместе с этим появилась потребность в разработке и тестировании тягового оборудования.

Для испытания винтов для воздушных судов используется экспериментальное оборудование типа аэротруб, однако, для воздушных винтов беспилотных летательных аппаратов небольших размеров используются испытательные стенды другого типа [1].

Данные стенды позволяют оценивать зависимость параметра тяги воздушного винта от числа оборотов, которая будет близка к реальным условиям работы изделия, так как испытание проводится на открытом пространстве.

Использование методов численного моделирования при разработке воздушных винтов позволяет сократить количество необходимых натурных испытаний.

Основное количество методик численного моделирования воздушных винтов предполагает проведение расчетов в стационарной постановке. Связано это с тем, что данная постановка требует значительно меньших вычислительных ресурсов, однако, она не позволяет оценивать динамические нагрузки на изделие в процессе изменения скорости вращения.

Для возможности оценки динамических нагрузок необходимо использовать нестационарную постановку задачи, но в таком случае задача требует оптимизации с точки зрения вычислительных мощностей.

Цель статьи заключается в поиске минимального характеристического размера расчетной области, который позволит корректно оценивать параметры воздушного винта при нестационарной постановке задачи и тем самым позволит эффективно использовать вычислительные мощности.



## 1 Модель пропеллера

Для верификации и отработки подхода за основу взят распространенный воздушный винт для квадрокоптеров HQProp10X5X3R [2] диаметром 0,254 м. На рисунке 2 представлена 3D CAD геометрия пропеллера, использованная для построения цифровой модели.



Рисунок 2 – 3D CAD геометрия пропеллера

Для данного винта рассчитаны значения числа Рейнольдса на относительном радиусе в 75%, необходимые для корректного выбора модели турбулентности. Зависимость чисел Рейнольдса от скорости вращения винта представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость числа Рейнольдса от скорости вращения винта

| Скорость вращения, об./мин. | 1000 | 2500  | 3800  | 5000  | 6500  | 8000  | 10000 |
|-----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Число Рейнольдса            | 9337 | 23342 | 35480 | 46684 | 60690 | 74695 | 93369 |

Число Рейнольдса определялось по формуле [3]

$$Re = \frac{0,75 * \pi * D_B * \bar{b}_{0,75} * n_B}{60\nu}$$

где  $\bar{b}_{0,75} = \frac{b_{0,75}}{D_B}$  – относительная хорда лопасти,

$n_B$  – частота вращения винта,

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,

$D_B$  – диаметр пропеллера.

На основе полученной зависимости и согласно исследованию [4] в качестве модели турбулентности выбрана модель *k-omega*.

## 2 Постановка задачи

Исходные данные:

- геометрия воздушного винта;

- скорость вращения – 5000 об./мин.;

- свободный объем заполнен воздухом (теплоемкость воздуха – 1006,43 Дж/(кг·К);

- теплопроводность воздуха – 0,0242 Вт/(м·К);

- вязкость воздуха – 0,0000179 кг/(м·с)).

Допущения (упрощения): чтобы смоделировать работу воздушного винта в сжимаемой среде, в расчетах примем зависимость плотности воздуха от динамического давления, создаваемого изделием, как у идеального газа;

Ограничения: границы расчетной области составляют цилиндр диаметром 10 диаметров воздушного винта, как показано на рисунке 3.

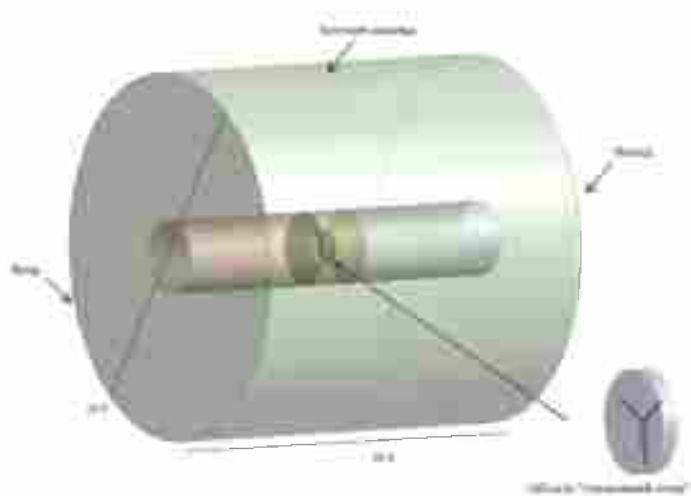


Рисунок 3 – Границы исследуемой области и граничные условия

Цель: оценить методом конечных объемов силу тяги воздушного винта.

### 3 Решение задачи

Для задания вращения воздушного винта используется метод скользящей сетки: выделяется пространство вокруг винта, для которого задается скорость вращения. Данный способ позволяет не перестраивать КЭ модель на каждом временном шаге. Модель построена в программном комплексе *Ansys*. Полная КЭ модель имеет 1497224 узла и 2819744 ячейки. Полная КЭ модель и КЭ модель скользящей сетки представлена на рисунке 4.

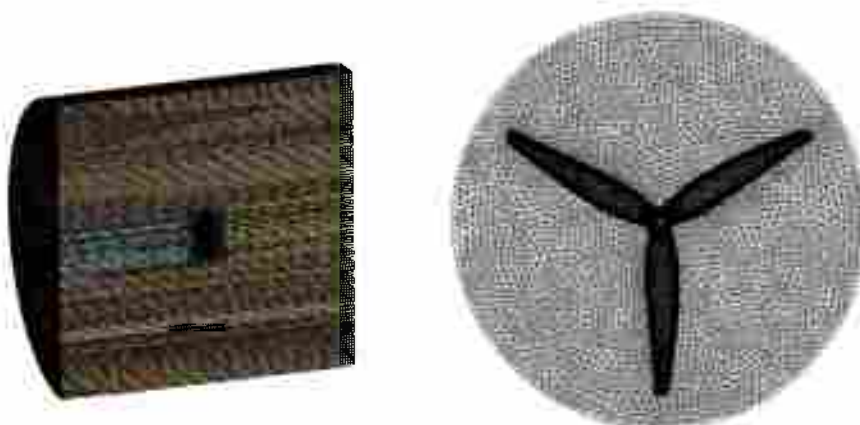


Рисунок 4 – Полная КЭ модель (слева); КЭ модель скользящей области (справа)

#### 4 Граничные условия

В силу того, что испытательный стенд работает в условиях открытого пространства, то по границам расчетной области необходимо задать соответствующие условия. В основе условий на границе лежат уравнения[5]:

- для расчета динамического давления

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2,$$

- для расчета статического давления

$$p_s = (\rho - \rho_0) |\vec{g}| (\vec{g} \cdot (\vec{b} - \vec{a})),$$

где  $\vec{b}$  – радиус-вектор центра грани;

$\vec{a}$  – радиус-вектор любой точки на свободной поверхности;

$|\vec{g}|$  – значение гравитации по модулю,

$\vec{g}$  – единичный вектор гравитации,

$V$  – значение скорости по модулю,

$\rho$  и  $\rho_0$  – значения плотности смеси в расчетной ячейке и исходное значение плотности.

Для описания открытых условий на границе расчетной области зададим значение статического давления равного нулю. Вектора скоростей на боковой границе могут быть заданы несколькими способами:

- общий вектор по компонентам задается вручную;
- вектора строятся по нормали к боковой границе;
- вектора скоростей вычисляются на основе значений статического давления в ячейках, соседних к границе расчетной области.

На «входе» расчетной области зададим граничные условия, где вектор строится по нормали к боковой границе. На «выходе» значение статического давления берем из соседней к границе расчетной ячейки. Для работы с «боковой границей» рассмотрим оба варианта использованных граничных условий.

#### 5 Результаты расчетов и анализ результатов

Для исследуемой области проведен расчет в нестационарной постановке вплоть до получения установившегося режима работы. На рисунке 6 представлено распределения векторов скоростей и их значений по модулю: на рисунке 6(а) – при условии, что на боковой границе вектора строятся по нормали к поверхности, а на рисунке 6(б) - значение статического давления берется из соседней к границе расчетной ячейки.

Для обоих расчетов вычисленный параметр тяги составляет 4,44 Н. Совпадение результатов вычисленной тяги для случаев а) и б) объясняется достаточным удалением границ расчетной области от исследуемого тела. При приближении границы области к исследуемому изделию направленность векторов по нормали к поверхности расчетной области должно влиять на результат расчета. По этой причине предлагается оценить возможность приближения границы расчетной области с условием, что значение статического давления на границе будем брать из соседней ячейки. Для анализа проведен перечень расчетов с уменьшением характеристического размера исследуемой области до 8, 6, 4, 3 и 2 диаметров соответственно. Распределения векторов скоростей для областей с различными характеристическими размерами представлены на рисунках 7(а,б), 8(а,б).

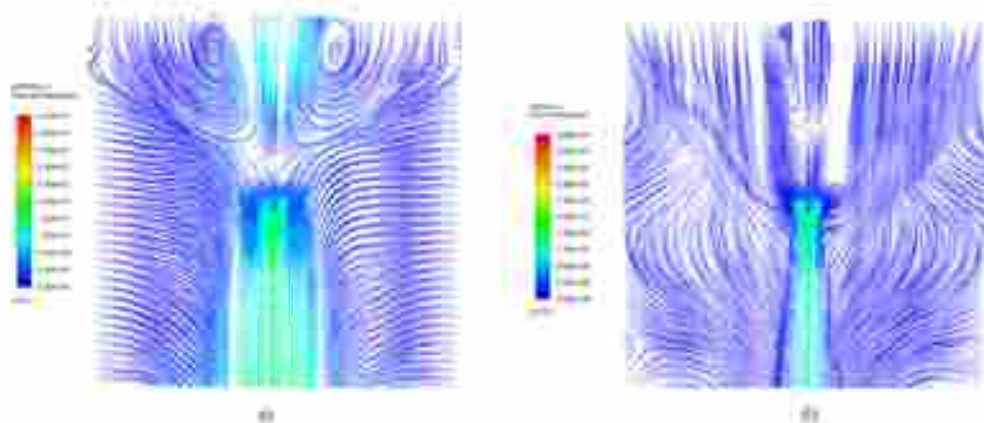


Рисунок 6 – Распределения векторов скоростей

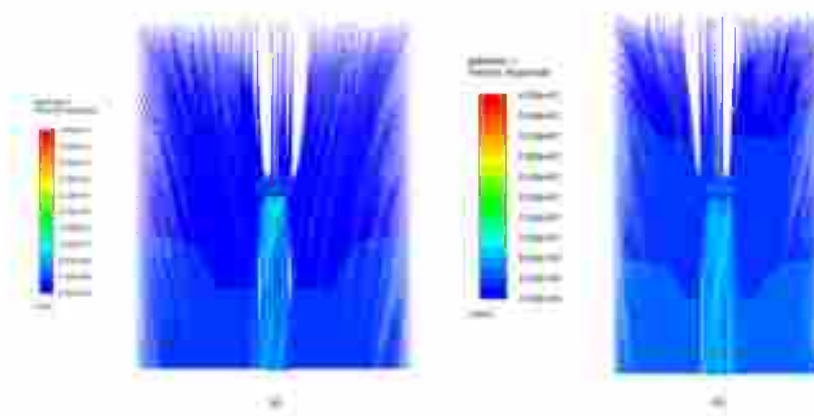


Рисунок 7 – Распределения векторов скоростей для характеристических размеров 8 диаметров (а), 6 диаметров (б)

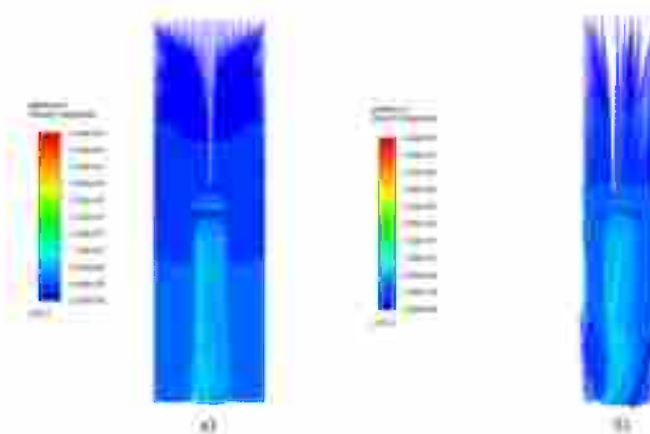


Рисунок 8 – Распределения векторов скоростей для характеристических размеров: 3 диаметра (а), 2 диаметра (б)

Результаты проведения численных экспериментов приведены в таблице 2 и на рисунке 9.

Таблица 2 – Результаты проведения численных экспериментов

| Хар. размер области, число диаметров | 10          | 8           | 6           | 4           | 3           | 2           |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Значение силы тяги, Н                | 4,44        | 4,44        | 4,45        | 4,49        | 4,23        | 3,96        |
| Число элементов расчетной области    | 281974<br>4 | 247024<br>5 | 219235<br>3 | 200136<br>3 | 194428<br>2 | 189818<br>5 |
| Число узлов в расчетной области      | 149722<br>4 | 114125<br>8 | 855378      | 663584      | 599247      | 558169      |

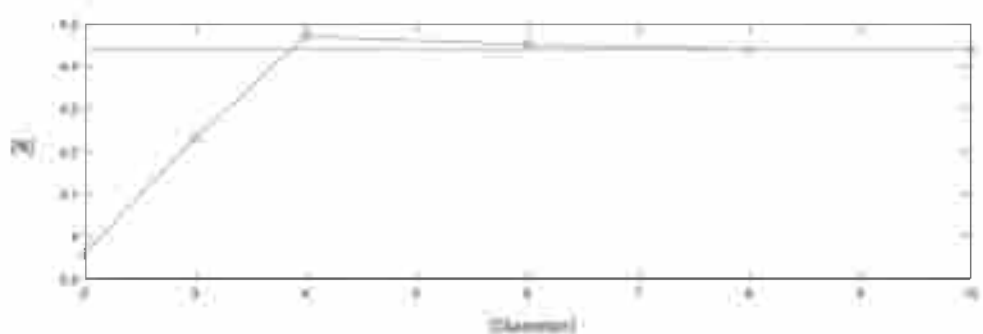


Рисунок 9 – Зависимость силы вычисленной тяги от характеристического размера области

По результатам расчетов можно сделать вывод, что использование характеристического размера в 3 диаметра и более с соответствующим граничным условием позволяет получить результат в границах 5% от целевого. Это позволило уменьшить число необходимых расчетных ячеек на 31% и число узлов на 60%.

### Заключение

Найден минимальный характеристический размер расчетной области, который составляет от 3 до 4 диаметров воздушного винта, и который позволяет численно оценивать параметры воздушного винта при нестационарной постановке задачи в пределах 5%.

Условие, при котором значение статического давления берется из соседней к границе расчетной ячейки, можно использовать для имитации открытых границ пространства без серьезных погрешностей по отношению к целевым параметрам.

Полученные результаты соответствуют числам Рейнольдса в районе 46,7 тыс. при скорости вращения воздушного винта 5000 об./мин. Для больших скоростей вращения или чисел Рейнольдса рекомендуется проводить аналогичный анализ характеристического размера отдельно.

Литература

- 1 Kosa P., Kisev M., Vacho L. and other. Experimental Measurement of a UAV Propeller's Thrust // Technical Gazette. – 2022. – 29, №1. – P.73-80.
- 2 Интернет сайт «HQProp» // www.hqprop.com
- 3 Липин А.В., Остроухов С.П., Серохвостов С.В., Устинов М.В., Факсман Я.Ш., Шустов А.В. Экспериментальное исследование зависимости характеристик воздушного винта от числа Рейнольдса // Ученые записки ЦАГИ, 2007 – № 3- 4.
- 4 Kuttv H.A., Rajendran P. 3D CFD Simulation and Experimental Validation of Small Arc Slow Flyer Propeller Blade // Aerospace. – 2021. – №.4(1), P.10.
- 5 Ansys inc., Ansys Fluent Theory Guide. Realease 2022R2

Макеев Артём Андреевич – главный специалист, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.  
Область научных интересов: гидро-газодинамика, МКЭ.  
Email: a.makeev@goz.ru

Мамчиц Алексей – инженер, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.  
Область научных интересов: гидро-газодинамика, МКЭ.  
Email: a.mamchits@goz.ru

Шувалов Станислав Евгеньевич – инженер-конструктор, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.  
Область научных интересов: CAD, CAM, МКЭ.  
Email: s.shuvalov@goz.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

#### ESTIMATION OF THE COMPUTATIONAL DOMAIN CHARACTERISTIC DIMENSIONS FOR SMALL-SIZED PROPELLER MODELING

The article describes an approach to estimating the small-sized propeller parameters using CFD methods. The work is aimed at optimizing the size of the fluid domain area to reduce the required computing resources when calculating the propeller movement parameters in transient formulation. A three-bladed propeller with a diameter of 0.254 m was taken. The control parameters are the lift force and the distribution of velocity vectors in the plane of the fluid domain. The propeller rotates at a speed of 5000 rpm. The results of the virtual experiment are compared depending on the characteristic size of the fluid domain and various types of boundary conditions

Keywords: propeller, fluid dynamics, CAE, CFD.

Makeev Artyom Andreyevich – Chief Specialist, JSC «Obuhovskiy plant», St. Petersburg.  
Research interests: CFD, CAE.

Mamchic Alexey – category Engineer, JSC «Obuhovskiy plant», St. Petersburg.  
Research interests: CFD, CAE.

Shuvalov Stanislav Evgenyevich –Design Engineer, JSC «Obuhovskiy plant», St. Petersburg.  
Research interests: CAD, CAM, CAE.

## АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФИНАНСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛУЧАЙНЫХ МАРКОВСКИХ ЦЕПЕЙ

Галеев Э.Е.

*В статье предложен подход к прогнозированию финансовой устойчивости предприятия через показатель рентабельности собственного капитала. Разработанный алгоритм с двухконтурным использованием генератора случайных чисел (ГСЧ), позволяет определить математическое ожидание рентабельности собственного капитала.*

*Ключевые слова:* финансовая устойчивость, математический аппарат случайных Марковских цепей.

### Введение

В условиях рынка, когда хозяйственная деятельность предприятия и его развитие осуществляется как за счет собственных средств, так и за счет заемных средств, важной характеристикой финансовой устойчивости предприятия, становится финансовая независимость предприятия от внешних заемных источников. Запас источников собственных средств – это запас финансовой устойчивости предприятия, при условии, что его собственные средства превышают заемные.

Анализ финансовой устойчивости предприятия позволяет сформировать представление о его истинном финансовом положении и оценить финансовые риски, сопутствующие его финансовой деятельности.

Для исследования проблем прогнозирования финансовой устойчивости, в статье предложено использовать формулу, разработанную компанией «Du Pont»: зависимость показателя рентабельности собственного капитала от следующих факторов: рентабельности реализованной продукции по чистой прибыли  $\rho_{Qp \text{ чп}}$ , ресурсоотдачи (коэффициента оборачиваемости активов)  $K_{об \text{ А}}$  и финансового левериджа  $\mu_{K_{соб}}$  [1].

Рентабельность собственного капитала по чистой прибыли определяется как трехфакторная мультипликативная модель

$$\rho_{соб.кап.} = \rho_{Qp \text{ чп}} \cdot K_{об \text{ А}} \cdot \mu_{K_{соб}} \quad (1)$$

### 1 Прогнозирование финансовой устойчивости предприятия

Прогнозирование финансовой устойчивости предприятия на будущие периоды осуществляется в условиях неопределенности и зависит от многих факторов.

Для прогнозирования финансовой устойчивости предприятия ОПК был использован математический аппарат случайных Марковских цепей.

Исходная информация, необходимая для оценки финансовой устойчивости предприятия:

- прогнозные значения рентабельности собственного капитала;
- вероятности начальных состояний системы;
- матрица переходных вероятностей.

Рассмотрим алгоритм оценки финансовой устойчивости промышленного предприятия ОПК. В качестве внешних и внутренних рисков, как правило, можно рассматривать риски производственной, финансовой и инвестиционной деятельности. Так как модель «Du Pont» используется для оценки инвестором, влияние какого фактора трехфакторной мультипликативной модели на рентабельность собственного капитала имеет наибольшее значение, то в качестве риска будем рассматривать только инвестиционную деятельность.

В статье предлагается, без потери общности, прогнозируемый период разделить 5 этапов, продолжительность каждого этапа составляет 1 год.

Пусть, например, руководство предприятия ОПК устанавливает следующие плановые значения рентабельности собственного капитала (табл. 1).

Таблица 1 – Прогнозируемая рентабельность собственного капитала

| Год           | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 |
|---------------|------|------|------|------|------|
| $\mu_{Ксобр}$ | 1,3  | 8,1  | 9,1  | 9,4  | 9,6  |

В качестве риска инвестиционной деятельности будем рассматривать существенное изменение факторов  $K_{об.А}$ ,  $R_{Qp}$ ,  $\mu_{Ксобр}$ , при этом целесообразно обозначить следующие шесть возможных состояний предприятия:

$S_1$  – предприятие работает стабильно, реализованных рисков нет;

$S_2$  – на предприятии реализован один риск существенного снижения объема гособоронзаказа и существенное изменение показателя  $Q_p$ ;

$S_3$  – в результате неудачной инвестиционной деятельности предприятия реализован риск существенного изменения показателя рентабельности активов  $R_A$ ;

$S_4$  – для осуществления инвестиционной деятельности предприятия привлечено значительное количество заемных средств, тем самым реализован риск существенного изменения показателя финансового левериджа  $\mu_{Ксобр}$ .

$S_5$  – реализованы два риска в любых сочетаниях;

$S_6$  – реализованы три риска соответственно.

Матрица переходных вероятностей состояний предприятия имеет вид

$$P_{[6,6]} = \|P_{ij}\|_6^6, \quad (2)$$

где  $P_{ij}$  – вероятность перехода предприятия из предшествующего состояния  $i$  в возможное, в последующий момент, состояние  $j$ .

Размеченный граф состояний предприятия представлен на рисунке 1

Зададим начальное состояние как вектор  $S_1 = \langle 1, 0, 0, 0, 0, 0 \rangle$ , то есть предприятие гарантированно находится в устойчивом состоянии, реализовавшиеся риски отсутствуют.

В соответствии с теорией марковских цепей [2] для того, чтобы получить вектор последующего состояния предприятия необходимо вектор текущего состояния перемножить на матрицу переходных вероятностей.

В условиях неопределенности, когда получить точечные оценки значений переходных вероятностей не представляется возможным, исследователи переходят к использованию случайных переходных матриц [3]. В этом случае используется ими-



тационное моделирование с многократным повторением процедур расчета случайных вероятностей для  $i+1$  переходной матрицы и умножения вектора  $j$ -го состояния на матрицу переходных вероятностей, при этом значения  $P_{ij}$  выбираются от датчика случайных чисел, границы значений вероятностей нахождения в «положительном» состоянии  $S_1$  и возврат из «негативных» состояний  $S_2$ - $S_4$  в  $S_1$  выбирают исходя из знаний руководства предприятия текущей финансовой ситуации, а также компетентности менеджмента по антикризисному управлению.

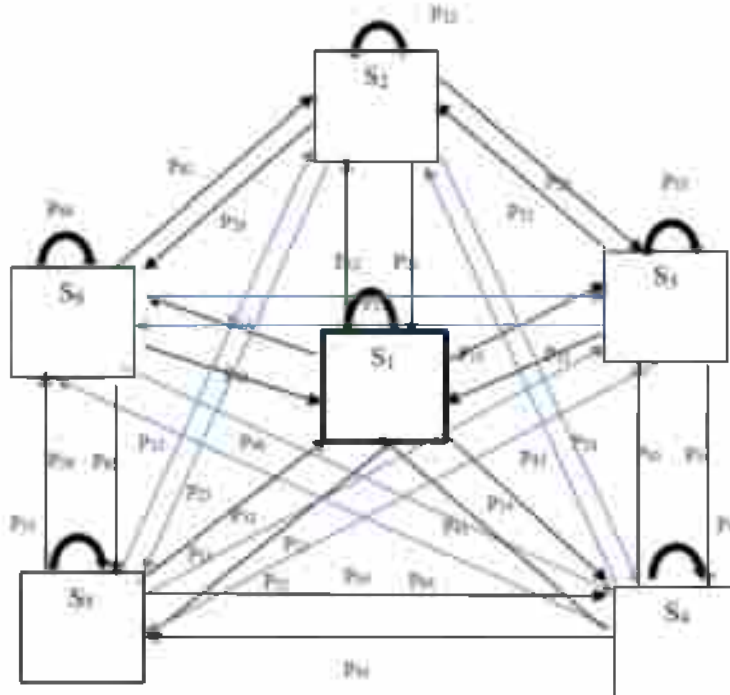


Рисунок 1 – Размеченный граф состояний предприятия

Будем считать, что события переходов в негативные состояния «2», «3» и «4» являются независимыми. Это позволит определить вероятности переходов в графе состояний предприятий через вероятности событий в более простых системах, которые, к тому же, проще оценить в действительности. Вследствие этого обозначенную выше систему можно представить в виде совокупности трех независимых (но при этом одновременно выполняющихся) подсистем с бинарным состоянием у каждой (рисунок 2).

Каждая такая подсистема характеризуется четырьмя вероятностями событий: сохранение положительного состояния, переход в негативное состояние, сохранение негативного состояния, возврат к положительному состоянию (представлены в таблице 2). Очевидно, что указанные события являются попарно полными группами.

Так как нас больше интересует вероятность того, что предприятие останется в стабильном состоянии  $S_1$ , а так же что вернется из состояний  $S_2$ - $S_4$  в стабильное состояние  $S_1$ , то зададим значения вероятностей  $P_{11}$ ,  $P_{21}$ ,  $P_{31}$ ,  $P_{41}$  как случайное число, соответственно зависимые события перехода в «негативные» состояния зададим как  $1 - P_{11}$  ( $P_{21}$ ,  $P_{31}$ ,  $P_{41}$ )

При оценке финансовой устойчивости предприятия ОПК, руководство и менеджмент обладает данными по всем факторам трехфакторной мультипликативной модели и предполагаемой динамикой изменения факторов в ближайшее время, а так же должно владеть механизмами устранения возникших кризисных ситуаций. Для более точного прогнозирования финансовой устойчивости предприятия, предложено ввести элемент адаптации модели, который состоит в том, что в зависимости от внешних и внутренних факторов, мы можем установить пределы изменения случайной величины  $P_{ij}$  в каждой из трех независимых групп событий (таблица 3)

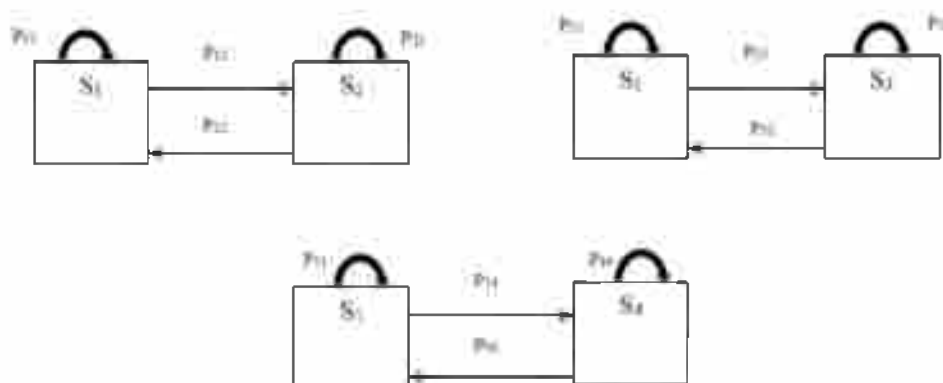


Рисунок 2 – Совокупность из трех независимых групп событий

Таблица 2 – Вероятности событий в узле перехода

| «Негативное» состояние $S_2$ |                 | «Негативное» состояние $S_3$ |                 | «Негативное» состояние $S_4$ |                 |
|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|
| $P_{11}$                     | Случайное число | $P_{11}$                     | Случайное число | $P_{11}$                     | Случайное число |
| $P_{12}$                     | $1 - P_{11}$    | $P_{13}$                     | $1 - P_{11}$    | $P_{14}$                     | $1 - P_{11}$    |
| $P_{21}$                     | Случайное число | $P_{31}$                     | Случайное число | $P_{41}$                     | Случайное число |
| $P_{22}$                     | $1 - P_{21}$    | $P_{33}$                     | $1 - P_{31}$    | $P_{44}$                     | $1 - P_{41}$    |

Таблица 3 – Шкала вероятности события

| Шкала | Вероятность         | Вероятность события % |      |
|-------|---------------------|-----------------------|------|
|       |                     | мин                   | макс |
| 1     | Невероятно          | 0                     | 10   |
| 2     | Низкая вероятность  | 10                    | 30   |
| 3     | Вероятно            | 30                    | 50   |
| 4     | Высокая вероятность | 50                    | 70   |
| 5     | Почти наверняка     | 70                    | 90   |
| 6     | Наверняка           | 90                    | 100  |

Инвестор экспертно может оценить вероятность возникновения риска и занести данные в имитационную модель (таблица 4).

Таблица 4 – Пример заполнения данных имитационной модели

| Оценка устойчивости «позитивного» состояния по паре событий $\langle S_1, S_2 \rangle$ |                      |
|--|----------------------|
| Период   | Вероятность $P_{11}$ |
| Первый год   | Наверняка            |
| Второй год   | Высокая вероятность  |
| Третий год   | Высокая вероятность  |
| Четвертый год  | Высокая вероятность  |
| Пятый год  | Почти наверняка      |
| Оценка возврата в «позитивное» состояние по паре событий $\langle S_1, S_2 \rangle$    |                      |
| Период   | Вероятность $P_{21}$ |
| Первый год   | Наверняка            |
| Второй год   | Высокая вероятность  |
| Третий год   | Высокая вероятность  |
| Четвертый год  | Высокая вероятность  |
| Пятый год  | Почти наверняка      |

Алгоритм вычисления представлен на рисунке 3.

После проведения многократных итераций средний вектор состояния системы примет вид, иллюстрируемый таблицей 5.

Таблица 5 – Средний вектор состояния предприятия

| Период        | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ | $S_5$ | $S_6$ |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Первый год    | 0,85  | 0,05  | 0,05  | 0,04  | 0,01  | 0     |
| Второй год    | 0,56  | 0,34  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0     |
| Третий год    | 0,27  | 0,14  | 0,36  | 0,01  | 0,20  | 0,01  |
| Четвертый год | 0,09  | 0,04  | 0,05  | 0,35  | 0,38  | 0,09  |
| Пятый год     | 0,01  | 0     | 0,03  | 0,11  | 0,69  | 0,16  |

Определим математическое ожидание показателя рентабельности собственного капитала

$$M(j) = \sum_{i=1}^m Q_j(i) \cdot P_j(i), \quad (3)$$

где  $Q_j(i)$  – значение показателя рентабельности на  $i$  этапе в  $j$  состоянии без учета вероятности реализации состояния;

$P_j(i)$  – вероятность нахождения предприятия на  $i$  этапе в  $j$  состоянии.

Тогда математическое ожидание этапа будет иметь значения, представленное в таблице 6.

Таблица 6 – Прогнозное значение рентабельности собственного капитала и его математическое ожидание

| Период                                 | прогноз | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ | $S_5$  | $S_6$ |
|--|---------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Первый год                             | 1,3     | 1.108 | 0.065 | 0.062 | 0.055 | 0.010  | 0     |
| Второй год                             | 8,1     | 4.565 | 2,794 | 0.231 | 0,220 | 0.283  | 0.007 |
| Третий год                             | 9,1     | 2.487 | 1.238 | 3.311 | 0.128 | 1.854  | 0.082 |
| Четвертый год                          | 9,4     | 0.813 | 0.416 | 0.450 | 3.302 | 3.611  | 0.807 |
| Пятый год                              | 9,6     | 0.053 | 0,013 | 0.322 | 1,023 | 6.611  | 1.577 |
| Математическое ожидание рентабельности |         | 9.026 | 4.526 | 4.377 | 4.728 | 12.369 | 2.474 |

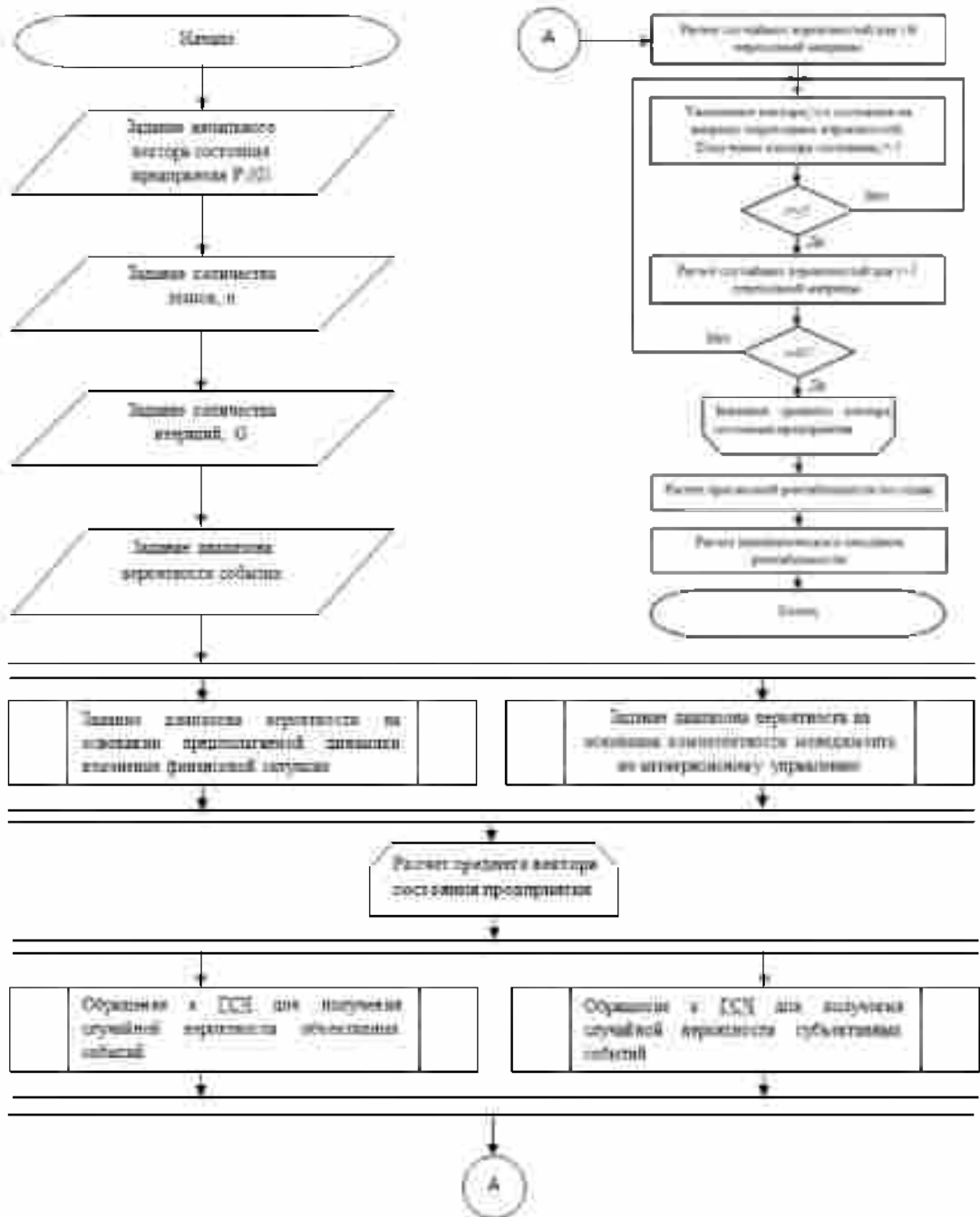


Рисунок 3 – Алгоритм вычисления прогнозной рентабельности собственного капитала

**Заключение**

В результате проведенного автором исследования:

- предложены виды рисков для трехфакторной мультипликативной модели для оценки финансового состояния предприятия по формуле «Du Pont»;
- разработана имитационная модель расчета математического ожидания рен-

табельности собственного капитала по чистой прибыли;

- предложены возможные варианты состояния предприятия, разработан граф состояний;

- предложена совокупность из трех независимых групп событий для расчета вероятностей нахождения предприятия в «позитивном» состоянии и возврат из «негативного» в «позитивное» состояние;

- предложен двухконтурный механизм определения вероятности на основании объективных и субъективных данных;

- разработана и внедрена в имитационную модель шкала пределов изменения случайной величины;

- разработан двухконтурный алгоритм вычисления прогнозной рентабельности собственного капитала с параллельным обращением к ГСЧ для объективных и субъективных событий одновременно;

- выполнены расчеты значений рентабельности собственного капитала и его математического ожидания;

#### Литература

1 Лебедев В.Г., Кадырова О.В., Синцова Е.А. Анализ деятельности производственных систем. Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятия. – СПб.: СПбГИЭУ, 2010. – 200 с.

2 Казаков В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. – М.: Сов. радио, 1973. – 232 с.

3 Шмидт А.В. Применение цепей Маркова при определении стратегии функционирования и развития предприятия по критерию экономической устойчивости // Вестник ЮУрГУ. – 2011. – № 8. – С. 145-153.

Галеев Эдуард Евгеньевич – аспирант, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: организация производства, оптимизация сложных системы, классификация сложных структур.

Email: nos.mv@goz.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

#### AN ALGORITHM FOR PREDICTING THE FINANCIAL STABILITY OF AN ENTERPRISE USING RANDOM MARKOV CHAINS

The article proposes an approach to forecasting the financial stability of an enterprise through the return on equity indicator. The developed algorithm with two-circuit use of a random number generator (RNG), allows you to determine the mathematical expectation of return on equity.

Key words: financial stability, mathematical apparatus of random Markov chains.

Galeev Eduard Evgenievich – post-graduate student, Obukhov Plant JSC, St. Petersburg.

Research interests: financial stability, mathematical apparatus of random Markov chains.

## МЕЖГРУППОВАЯ РАНГОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ В СИСТЕМАХ МЕЖСАМОЛЁТНОЙ НАВИГАЦИИ

Липаков Н.Е., Сайбель А.Г.

*В работе рассмотрены особенности ранговой синхронизации при организации взаимодействия по единому радиоканалу между группами летательных аппаратов, независимо осуществляющих решение задач группового самолётовождения.*

Ключевые слова: межсамолётная навигация (МСН), ранговая синхронизация, определение взаимных координат (ОВК), групповое самолётовождение (ГСВ)

Традиционная тактика применения объектов государственной авиации [1, 2] включает способы применения летательных аппаратов (ЛА) организованными группами вида «пара», «звено» или «эскадрилья», осуществляющих полёт в режиме группового самолётовождения (ГСВ), выполняемого в ручном или автоматическом режиме [3]. При решении задач ГСВ один из ЛА в группе выступает в качестве «ведущего», выполняя полёт по заданному маршруту, а остальные ЛА в группе – «ведомые» формируют строй, занимая в локальной системе координат (ЛСК) «ведущего» заданное местоположение (ЗМП), характеризуемое тремя параметрами: удаление, высота и пеленг. Для решения задачи ГСВ ЛА осуществляют обмен собственными географическими координатами, определение взаимных координат (ОВК) с помощью соответствующей бортовой аппаратуры локальной радиотехнической системы межсамолётной навигации (ЛРТС МСН) и на основании полученной информации поддерживают заданное местоположение в системе координат «ведущего» ЛА по командам пилота или системы автоматического управления. Организация информационного обмена между ЛА поддерживается при этом аппаратурой ОВК с использованием принципов ранговой синхронизации [4] для обеспечения доступа к единому радиоканалу.

Развитие государственной авиации привело к появлению концепции крупномасштабных авиационных систем (АС), включающих группы пилотируемых (ПЛА) и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) различного назначения [5], а также разработке моделей и алгоритмов совместных действий групп ПЛА и БПЛА различного назначения [6], являющихся частным выражением разработанной концепции.

Концепция АС БПЛА применительно к принципам построения ЛРТС МСН [4] подразумевает как увеличение общего числа ЛА-абонентов, так и числа отдельных групп (подгрупп) ЛА, участники которых связаны задачами ГСВ в пределах своих подгрупп. Простейшим примером такого взаимодействия, показанным на рисунке 1, является совместное дежурство двух пар ЛА – (1; 2) и (3; 4), каждый из которых имеет своего «ведущего» и «ведомого», следующего за своим «ведущим» на посто-

янным удалении  $r_1$  и  $r_2$  соответственно, а расстояние между «ведущими» ЛА  $d_{1,2}(t)$  меняется в процессе работы, при этом для ЛА, выполняющих полёт строем при  $r_1, r_2 \in [0,1; 1,0]$

$$r_1, r_2 \ll d_{1,2}(t) \leq d_{max} \approx 100 \dots 150 \text{ км.} \quad (1)$$

где  $d_{max}$  – максимальная дальность взаимодействия между ЛА в аппаратуре ОВК.

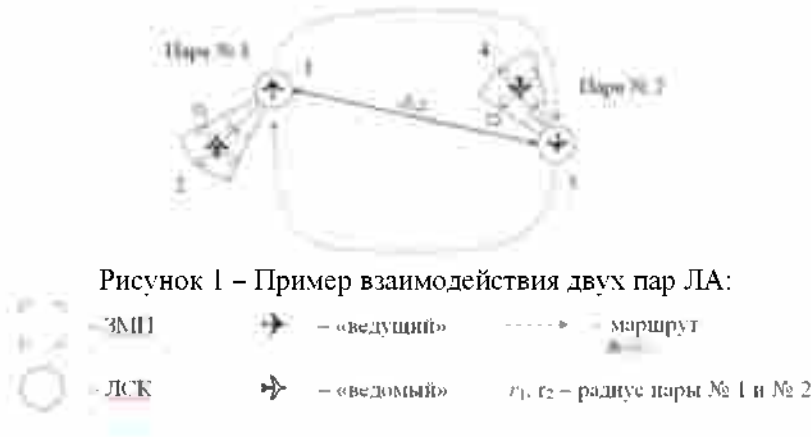


Рисунок 1 – Пример взаимодействия двух пар ЛА:

Поскольку вероятность обнаружения сигналов  $p_{o,min} = p_o(d_{max})$  в аппаратуре зависит от отношения сигнал/шум и задаётся при её проектировании для ЛА, взаимодействующих на удалении  $d_{max}$ , приём сигналов синхронизации и информационных посылок от взаимодействующего ЛА, находящегося в плотном строю осуществляется с большим энергетическим запасом

$$\Delta_p = 10 \cdot \lg \frac{P_{прм}(d_{min})}{P_{прм}(d_{max})} = 10 \cdot \lg \frac{K_n/d_{min}^2}{K_n/d_{max}^2} = 20 \cdot \lg \frac{d_{max}}{d_{min}} \quad (2)$$

где  $K_n = \frac{P_{изл} \cdot K_{изл}}{4\pi} \cdot \frac{\lambda_p}{4\pi} \cdot K_{прм}$  (3)

$P_{изл}$  – мощность излученного сигнала,

$K_{изл}$  – коэффициент усиления излучающей антенны,

$K_{прм}$  – коэффициент усиления принимающей антенны,

$\lambda_p$  – длина волны радиоизлучения.

Для  $d_{min}=1,0$  км и  $d_{max} = 100$  км величина  $\Delta_p$  будет составлять

$$\Delta_p = 20 \cdot \lg \frac{100,0}{1,0} = 40 \text{ дБ,} \quad (4)$$

при этом вероятность  $p_o(d_{min})$  для отношения сигнал/шум с таким запасом, определяемая характеристиками обнаружения сигналов в аппаратуре ОВК, будет максимально близка к единице [7, с.93].

Таким образом, граф связей, показанный на рисунке 2 и описывающий радиоканалы взаимодействия между ЛА, характеризуется матрицей связей

$$E = \{e_{i,j}\} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & p_o(d_{1,2}) & p_o(d_{1,2}) \\ 1 & 1 & p_o(d_{1,2}) & p_o(d_{1,2}) \\ p_o(d_{1,2}) & p_o(d_{1,2}) & 1 & 1 \\ p_o(d_{1,2}) & p_o(d_{1,2}) & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

где  $e_{i,j}$  – вероятность передачи сигналов от ЛА  $i$  к ЛА  $j$ , при этом  $e_{i,i} = 1, i = 1 \dots 4$ .

При осуществлении ранговой синхронизации между абонентами ЛА1 будет выступать первичным синхронизатором для всех прочих ЛА, при этом для синхронизации между парами будет достаточно приёма сигналов синхронизации хотя бы по одному из радиоканалов от любого ЛА из пары №1 к любому ЛА из пары №2, а принимающий ЛА из пары №2 будет ретранслировать сигналы синхронизации другому ЛА в своей паре, независимо от роли, выполняемой при решении задач ГСВ.

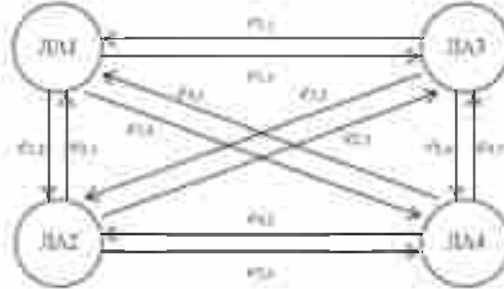


Рисунок 2 – Граф связей между ЛА

Исходя из допущения о равенстве вероятностей передачи сигналов между парами ЛА

$$e_{1,3} = e_{1,4} = e_{2,3} = e_{2,4} = p_o(d_{1,2}), \quad (6)$$

для рассматриваемого примера можно определить надежность  $p_s$  составного канала синхронизации, образованного отдельными радиоканалами между парами, как вероятность правильного приёма сигналов синхронизации хотя бы одним из ЛА пары №2

$$p_s = 1 - (1 - p_o(d_{1,2}))^2. \quad (7)$$

Обобщая указанный пример на две группы БПЛА произвольной численности  $m$  и  $n$  можно преобразовать выражение (7) к виду

$$p_s = 1 - (1 - p_o(d_{1,2}))^{m \cdot n}, \quad (8)$$

из которого можно определить вероятность  $q_s$  отсутствия синхронизации между группами как

$$q_s = 1 - p_s = (1 - p_o(d_{1,2}))^{m \cdot n} = q_o^{m \cdot n}(d_{1,2}), \quad (9)$$

где  $q_o(d_{1,2})$  – вероятность пропуска сигнала одним ЛА.

Из выражения (9) следует, что даже для групп БПЛА небольшой численности, находящихся на максимальном удалении при  $d_{1,2} = d_{max}$  и низкой вероятности обнаружения сигналов  $p_{o,min} = p_o(d_{max})$ , надежность составного канала синхронизации будет значительно выше, например, при  $m = 4$ ,  $n = 4$  и  $p_{o,min} = 0,9$ , вероятность отсутствия синхронизации будет равна

$$q_s = (1 - 0,9)^{4 \cdot 4} = 10^{-16}, \quad (9)$$

что позволяет осуществлять синхронизации между группами ЛА даже при низком отношении сигнал/шум.

Вторым важным следствием полученного соотношения (9) является возможность адаптивного изменения алгоритмов информационного взаимодействия между



группами ЛА при решении задач относительной навигации. Группа из  $m$  БПЛА, координаты каждого из которых занимают объём в 124 бита [8], после объединения в плотный строй в режиме ГСВ, может быть описана следующим образом:

- координатами «ведущего» БПЛА или геометрического центра группы;
- признака принадлежности БПЛА к группе, например в виде номера «ведущего», передаваемого в дополнительном поле объёмом 4-8 бит;
- также максимального радиуса группы объёмом 8-10 бит, в пределах которого «ведущий» устанавливает ЗМП для всех «ведомых» [3].

Поскольку при передаче абсолютных координат БПЛА в плотном строю значения их текущей широты и долготы будут отличаться только лишь младшими разрядами, БПЛА из группы  $n$ , принимающий эти координаты на значительном удалении от группы  $m$ , может рассматривать их как повторяемую информацию, передаваемую с точностью до младших разрядов. Таким способом за счёт уменьшения темпа обновления информации о координатах отдельных БПЛА в группе  $m$ , что является допустимым при значительных удалениях между группами, и небольшого расширения объёма передаваемой информации, БПЛА из состава группы  $n$  может обеспечить более высокую надёжность контроля местоположения группы  $m$  в целом.

#### Литература

- 1 Бабич В.К. и др. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / Под ред. Е.А.Федосова. – М.: Дрофа, 2004. – 815 с.
- 2 Антонов Д.А. и др. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / Под ред. Е.А.Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 732 с.
- 3 Гусев Д.И. Решение задач автоматизации полёта группы самолётов. // Труды МАИ. – 2012. – № 51.
- 4 Орлов В.К., Липаков Н.Е., Рамаданов В.С., Шанин Е.Г. Синхронизация и многостанционный доступ в локальных радиотехнических системах относительной навигации. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 129 с.
- 5 Кутахов В.П., Титов А.Е. Крупномасштабные авиационные системы с беспилотными летательными аппаратами – новая парадигма боевых действий // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2021. – № 19. – С.212-221.
- 6 Ананьев А.В., Филатов С.В. Модель и алгоритм совместных действий смешанного авиационного полка и разведывательно-ударных групп беспилотных летательных аппаратов малого класса при поражении высококомобильных резервов противника // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2019. – №10. – С.34-41.
- 7 Бердышев В.П., Гарин Е.Н., Фомин А.Н. и др. Радиолокационные системы: Учебник / Под общ. ред. В.П.Бердышева. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. – 2011.
- 8 Липаков Н.Е. Организация сети взаимодействия группы летательных аппаратов средствами бортовой аппаратуры межсамолётной навигации // Радионавигация и время: Труды СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2021. – № 7(15) – С.85-97.

Липаков Николай Евгеньевич – аспирант, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: самолетовождение, радионавигация.

Email: lipakov\_nikolai@mail.ru

Сайбель Алексей Геннадиевич – доктор технических наук, доцент, профессор, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: радиокоординатометрия, моделирование и оптимизация сложных системы.

Email: saybel\_ag@mail.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

## INTER-GROUP RANK SYNCHRONIZATION IN INTER-AIRCRAFT NAVIGATION SYSTEMS

*Article describe rank synchronization features in case of organization of interaction via unified radio channel between group of aircraft, independently performing the task solution of inter-aircraft navigation.*

*Keywords:* inter-aircraft navigation, rank synchronization, mutual coordinates, group air navigation

Lipakov Nikolay Evgenievich - chief of bureau of flight control systems and avionics, JSC "Obukhov plant", St.Petersburg city.

Research interests: aircraft navigation, radio navigation.

Saybel Aleksey Gennadievich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Scientific and Educational Center, St. Petersburg.

Research interests: radio coordinateometry, modeling and optimization of complex systems

## ПРОВЕРКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ПРОХОДНОЙ ФАР

Жизневский А.К.

*Сформулированы основные положения расчетно-экспериментального метода калибровки радиотехнических параметров проходной фазированной антенной решетки (ФАР). Дано общее описание алгоритма пересчета с плоскости сканирования на плоскость раскрыва облучателя ФАР.*

*Ключевые слова:* фазированная антенная решетка; плоскость раскрыва; облучатель; система координат.

### Введение

Описанный в статье математический аппарат разработан в рамках создания экспериментально-расчетной методики настройки фазированной антенной решетки (ФАР) проходного типа с применением амплифазометрических измерений характеристик ФАР. По сравнению с работой [1] в данной работе добавлен расчет поля на входе фазовращателей при известном поле на выходе (гексагональная решетка фазовращателей интерполирована на прямоугольную решетку скана). Для пересчета электрического поля с плоскости на плоскость не параллельную исходной используется модернизированный метод трансформации спектра плоских волн (МПТСПВ) описанный в [2] и проверенный экспериментально в [1]. В качестве экспериментальной установки для проверки работоспособности математического аппарата использовался стенд (рисунок 1) для настройки и измерения радиотехнических характеристик (РТХ) антенного устройства (АУ) ФАР. В процессе настройки таких АУ, представляющих собой проходную ФАР, возникает вопрос совмещения фокуса ФАР с фазовым центром облучателя в трехмерном пространстве в целях обеспечения заданных требований к РТХ АУ. Облучатель в антенной решетке проходного типа представляет собой рупор, регулирующийся по шести степеням свободы.

Из-за погрешности установки фазы антенными элементами АУ и погрешности изготовления и установки облучателя в несущей раме, фиксирующей все конструктивные элементы ФАР в пространстве, процесс нахождения оптимального положения облучателя приобретает итерационный характер и занимает длительное время.

Ускорение процесса регулировки АУ, заключающегося в поиске пространственного положения облучателя, близкого к оптимальному, при котором все РТХ ФАР удовлетворяют требованиям технических условий (ТУ), может быть достигнуто путем замены ряда промежуточных экспериментов расчетами, осуществляемыми по специально разработанным алгоритмам.

### 1 Описание измерительного стенда

Измерительный стенд, представленный на рисунке 1, состоит из планарного сканера с плоскостью сканирования  $P_{скан}$  и фермы, на которой размещаются ФАР с плоскостями входов  $P_{вх}$  и выходов  $P_{вых}$ , фазирующих антенных элементов (АЭ), а также облучателя с плоскостью апертуры  $P_{обт}$ .

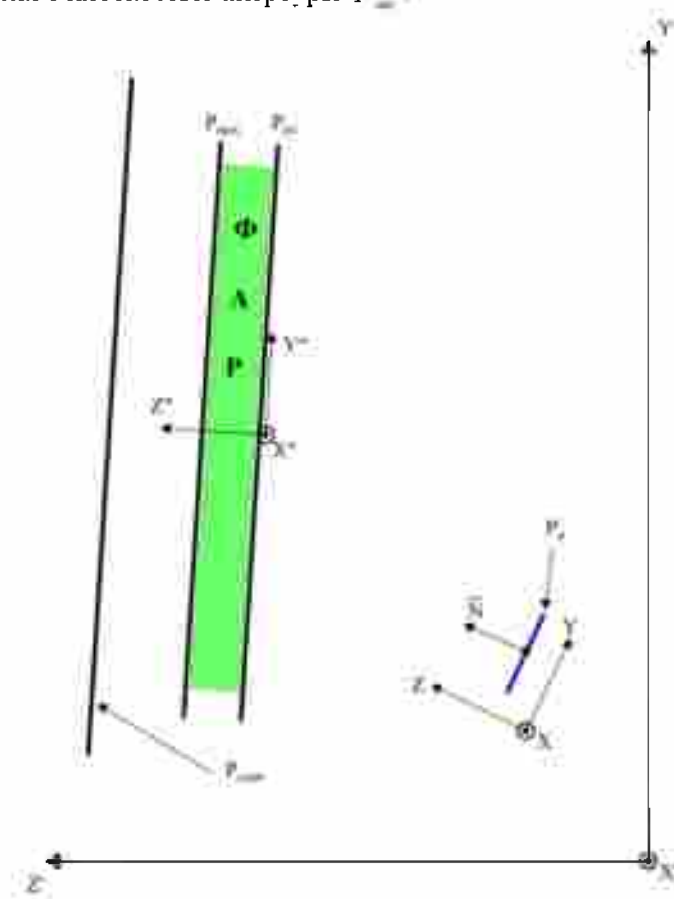


Рисунок 1 – Схематическое изображение измерительного стенда

Расстояние  $d_{скан}$  между  $P_{скан}$  и  $P_{вых}$  выбирается из расчета 3-5 длин волн  $\lambda$ , что является общепринятой величиной для апертурных антенн для достоверного восстановления диаграммы направленности по результатам измерения электрического поля на плоскости сканирования  $P_{скан}$ . Расстояние  $d_{обт}$  между плоскостью  $P_{вх}$  и геометрическим центром апертуры облучателя  $C_{обт}$  и направление нормали к апертуре облучателя относительно входной плоскости  $P_{вх}$  задается в соответствии с конструкторской документацией.

### 2 Общее описание алгоритма расчетов

С помощью планарного сканера производится измерение амплитудно-фазового распределения (АФР) поля  $E_{скан}$ , формируемого ФАР на плоскости  $P_{скан}$ .

1) Производится пересчет поля  $E_{с\text{лнн}}$  с плоскости  $P_{с\text{лнн}}$  на плоскость  $P_{в\text{ых}}$  согласно теории плоских волн [3-5]. Это позволяет получать АФР поля  $E_{в\text{ых}}$  на плоскости выходов фазирующих АЭ.

2) Для расчета АФР поля  $E_{в\text{ых}}$  на плоскости  $P_{в\text{ых}}$  принимается допущение, что АФР полей  $E_{в\text{ых}}$  и  $E_{с\text{лнн}}$  различаются только фазовой добавкой, создаваемой фазовращателями АЭ, согласно заданному распределению. Данное распределение позволяет компенсировать сферичность падающего фронта волны, осуществлять смещение диаграммы направленности (ДН) на заданный угол и формировать специальные режимы излучения. Геометрия антенных элементов  $d_{\text{ФАР}}$  не учитывается в виду их одинаковой геометрической длины.

3) С помощью МПТСПВ производится пересчет поля  $E_{в\text{ых}}$  на плоскость апертуры облучателя  $P_{\text{ат}}$ .

На рисунках 2 и 3 изображены амплитудные диаграммы направленности (АДН) и фазовые диаграммы направленности (ФДН) соответственно. Данные диаграммы направленности облучателя получены с помощью измерения облучателя на измерительном стенде дальней зоны и с помощью производимых расчетов описанных в данной статье.

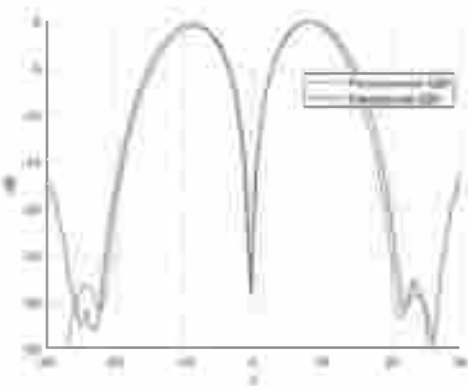


Рисунок 2 – АДН облучателя  
рассчитанная и измеренная

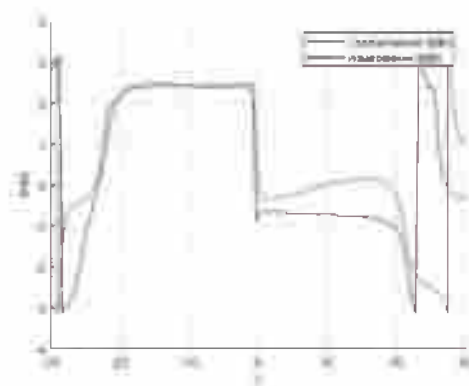


Рисунок 3 – ФДН облучателя  
рассчитанная и измеренная

### Заключение

В данной статье произвели проверку метода МПТСПВ на реальном изделии.

Было обнаружено смещение центра апертуры рупора по осям ОХ и ОУ относительно его расчетного положения согласно конструкторской документации.

Проверенный алгоритм пересчета, проверенный на натурном эксперименте с изделием, является частью метода, который позволяет моделировать изменения пространственного положения облучателя по шести степеням свободы, осуществляемые с целью настройки, что в свою очередь позволит значительно сократить временные затраты на регулировку АУ.

Литература

1 Жизневский А.К. Экспериментальная проверка модернизированного метода поворотной трансформации спектра плоских волн // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2022. – №4. – С.25-29.

2 Жизневский А.К. Сравнительный анализ численных методов пересчета электрического поля на плоскость непараллельную исходной // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2022. – №1. – С.25-32.

3 Kalashnikov V. S. et al. Near-Field Antenna Measurements. – Springer Singapore, 2021.

4 Evans G. E. Antenna measurement techniques // Norwood. – 1990.

5 Slater D. Near-field antenna measurements. – Artech House, 1991.

Жизневский Александр Константинович – аспирант, АО «Обуховский завод», г.Санкт-Петербург.

Область научных интересов: измерения в ближней зоне, настройка антенных решёток.

e-mail: zhak.a@yandex.ru

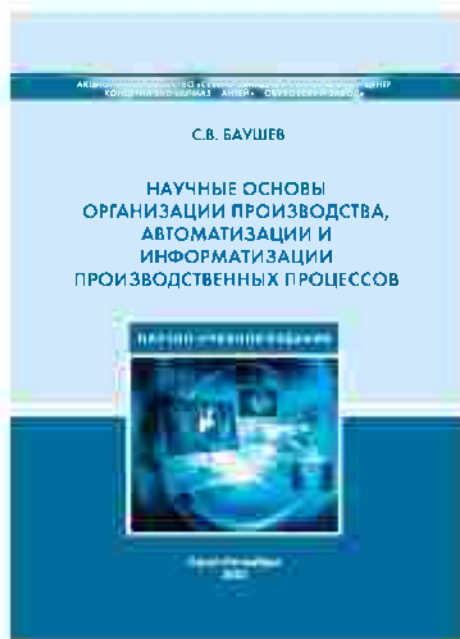
Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, дом 120.

#### VERIFICATION THE MATHEMATICAL APPARATUS OF AUTOMATIC CALIBRATING A PASS-THROUGH PHASED ARRAY

The main provisions of the computational-experimental method for calibrating the radio engineering parameters of a phased antenna array (PAA) are formulated. There is an overview of the numerical methods of electrical field calculation from the near-field scanning plane to the nonparallel plane of horn.

Zhiznevsky Alexander Konstantinovich – graduate student, JSC “Obukhov Plant”, St. Petersburg.

Area of scientific interests: near-field measurements, tuning antenna arrays.



Издание носит междисциплинарный научный и учебный характер и ориентировано, прежде всего, на аспирантов по научной специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Может быть полезным аспирантам по научным специальностям 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика и 5.2.6. Менеджмент, студентам, обучающимся по направлениям 38.03.01 «Экономика» (направленность 38.03.01\_05 «Экономика и управление на предприятии») и 38.03.02 «Менеджмент» (направленность 38.03.02\_05 «Производственный менеджмент»), а также педагогическим, научным и инженерно-техническим работникам соответствующих областей деятельности.

Автор: Баушев Сергей Валентинович – доктор военных наук, кандидат технических наук, профессор.

Рецензент: Фролова Елена Александровна – доктор технических наук, доцент, директор института фундаментальной подготовки и технологических инноваций, заведующая кафедрой «Инноватики и интегрированных систем качества» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

В совокупности с занятиями, проводимыми в рамках учебной программы, настоящее пособие обеспечит аспиранта минимумом знаний и пониманий, необходимых для подготовки к кандидатскому экзамену по специальности, подтверждающему наличие требуемых компетенций для обоснованной претензии на степень кандидата наук по выбранной научной специальности.

### **Баушев С.В.**

Научные основы организации производства, автоматизации и информатизации производственных процессов: Научно-учебное издание / С.В.Баушев – СПб.: «Издательство «Балтийская печать», 2023. – 152 с. : с илл.

**РАДИОНАВИГАЦИЯ  
И ВРЕМЯ**

№12 (20) – 2023

Подписано в печать 12.12.2023, Формат 84×108 1/16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Объем 15,96 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 236-2023.

АО «Обуховский завод»  
191124, Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, дом 120, литера Е.

Отпечатано в ООО «Издательство «Балтийская печать».  
191119, Санкт-Петербург, ул. Звенигородская, д. 9-11, лит. К, пом. 17Н, ком. 130.