

# **DSPA:**

**Вопросы применения  
цифровой обработки сигналов**

**№3**

**2025**



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Мельников Н.В., Шевченко В.В., Тришина С.В., Гадасин Д.В. ПРИМЕНЕНИЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАБОТЫ С БОЛЬШИМИ ОБЪЕМАМИ ДОКУМЕНТОВ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ</b>	<b>4</b>
<b>Попов О.Б., Чернышева Т.В., Борисов А.А., Волчков Д.А. КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ ТРАКТОВ КАНАЛА ЗВУКОВОГО ВЕЩАНИЯ, СФОРМИРОВАННЫЙ ПО РЕАЛЬНОМУ СИГНАЛУ</b>	<b>13</b>
<b>Романец А.В., Астапенков А.А., Вдовин В.С., Конарев А.Н., Смирнов Н.В. РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ИЗ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ</b>	<b>23</b>
<b>Саломатина Е.В., Сарьян В.К. НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ПОДХОДЫ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ МОНИТОРИНГУ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ</b>	<b>38</b>
<b>Аладин Г.А., Осетрова К.И., Микенин А.Э., Прокурат Г.А. РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ</b>	<b>44</b>
<b>Малахов Д.Ю., Васильев А.В., Талдыкин Д.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АМФИБИЙНОЙ ШНЕКОРОТОРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО СУШЕ</b>	<b>50</b>

## ПРИМЕНЕНИЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАБОТЫ С БОЛЬШИМИ ОБЪЕМАМИ ДОКУМЕНТОВ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

**Мельников Николай Владимирович**

*МТУСИ, студент гр. БСТ2203, Москва, Россия*

[fireminergoodplay@gmail.com](mailto:fireminergoodplay@gmail.com)

**Шевченко Виктория Васильевна**

*МТУСИ, студент гр. БСТ2203, Москва, Россия*

[viktoriavarsava21632@gmail.com](mailto:viktoriavarsava21632@gmail.com)

**Тришина Светлана Викторовна**

*МТУСИ, ассистент кафедры СИТус, Москва, Россия*

[trishina@rambler.ru](mailto:trishina@rambler.ru)

**Гадасин Денис Вадимович**

*МТУСИ, доцент кафедры СИТус, к.т.н., доцент, Москва, Россия*

[d.v.gadasin@mtuci.ru](mailto:d.v.gadasin@mtuci.ru)

### **Аннотация**

*В работе рассматривается применение больших языковых моделей (LLM) для обработки больших объемов документов на русском языке. Основной проблемой является недостаток специализированных моделей, адаптированных для работы с русским языком, что требует внедрения дополнительных подходов. Для повышения точности и актуальности ответов исследуется совместное использование методов Retrieval-Augmented Generation (RAG) и Supervised Fine-Tuning (SFT). Проведен эксперимент с использованием модели Saiga-Llama3 8B и эмбединговой модели USER BGE-M3, подтверждающий эффективность предложенного подхода. Эксперимент показал, что использование RAG позволяет извлекать релевантные данные и формировать более точные ответы на запросы, что делает данный метод перспективным для внедрения в автоматизированные системы обработки данных на русском языке.*

### **Ключевые слова**

*Большие языковые модели, машинное обучение, большие массивы данных, обработка данных, эмбединги, генерация текста*

### **Введение**

LLM (Large Language Model) – крупная языковая модель, предназначенная для понимания человеческого языка и генерирования осмысленного текста на основе запросов пользователя и обученная на больших объемах текстовых данных для обработки естественного языка. С помощью таких моделей возможно генерировать текст, вести диалог, отвечать на вопросы, писать код и даже создавать творческие тексты. LLM используют современные архитектуры, такие как нейронные сети на основе трансформеров – архитектуру глубокого обучения, включающую в себя механизм внимания (Attention) для работы с последовательностями данных (текст, аудио, видео), обработки длинных контекстов, определения наиболее важных частей данных и кластеров данных [1-4, 24-29]. Основой трансформеров является механизм Self-Attention (внимание к самому себе), который определяет важность слов в предложении и позволяет модели выявить те слова или элементы последовательности, которые наиболее важны в текущем контексте.

Среди особенностей LLM можно выделить: обучение на крупных датасетах (наборы данных, состоящие из миллиардов и триллионов слов из разнообразных источников), генерация связного и осмысленного текста и адаптация к разным задачам (перевод, анализ тональности, написание кода и др.)

Использование LLM позволяет обрабатывать большие объемы данных, автоматизируя рутинные задачи и улучшая взаимодействие с клиентами, что в конечном итоге должно повысить эффективность и конкурентоспособность компаний [5-8]. Внедрение генеративного ИИ в бизнес-процессы на

настоящем этапе развития компаний способствует росту выручки, снижению издержек и улучшению клиентского опыта [9]. Исходя из этого основная проблема, которая рассматривается в данной работе является интеграция LLM в существующую информационную систему в целях автоматизации обработки документов, резюмирования, поиска информации в большом объеме данных и генерирования документации.

## Результаты исследований

### 1. Проблематика

На данный момент использование LLM стало особенно актуальным по нескольким причинам, основными из которых являются:

#### 1. Растущий объем данных и сложность их обработки.

Современные компании и организации сталкиваются с экспоненциальным ростом текстовых данных, включая договоры, отчеты, переписки, судебные решения, научные статьи и другие документы. Их обработка вручную становится практически невозможной, особенно при необходимости анализа содержимого, поиска закономерностей и извлечения ключевой информации [10-12].

#### 2. Нехватка специализированных инструментов для работы с программно-техническими средствами посредством русского языка.

Большинство существующих инструментов машинного обучения и языковых моделей разрабатываются преимущественно для английского языка. Работа с русским языком сталкивается с рядом проблем:

- морфологическая сложность: словоизменение, синтаксическая гибкость, особенности падежей;
- семантические нюансы: высокий уровень многозначности слов и контекстная зависимость;
- диалекты и профессиональная терминология: специализированные тексты, такие как юридические или медицинские документы, требуют адаптированных моделей.

#### 3. Качество и разнородность данных.

Документы на русском языке часто представлены в разных форматах (сканы, PDF, изображения, электронные таблицы). Неоднородность данных создает дополнительные сложности для их автоматической обработки классическими алгоритмами.

#### 4. Культурно-языковая специфика русского текста

Работа с русскими документами часто связана с учетом уникальных культурных и языковых особенностей, таких как:

- употребление метафор, идиом;
- формализм деловой документации;
- влияние исторического контекста на содержание документов.

Обозначенные проблемы подчеркивают необходимость разработки и внедрения более точных, устойчивых и интерпретируемых моделей машинного обучения и LLM, способных учитывать специфику русского языка и контекста применения.

### 2. Способы решения

Для решения выявленных проблем можно предложить два способа. Если предполагается наличие больших ресурсов, то создается оригинальная модель, путем обучения её на нужных датасетах (наборах данных, в формате подходящем для обучения языков моделей) с нуля. В таком случае необходимы крупные вложения в разработку и техническое оснащение, а также большие временные затраты. Данный вариант решения находит применение в крупных компаниях, однако даже они предпочитают брать за основу уже готовые модели и дообучать их на своих данных.

Второй вариант – использование SFT – supervised fine-tuning. Метод заключается в использовании уже обученных заранее моделей в открытом доступе и дообучении их на меньшем датасете с нужным для задачи набором данных при этом не требуется таких больших затрат, как обучение модели с нуля и достигается более высокое качество ответов модели в конкретных сферах применения более чем на 50% [13]. SFT используется всеми крупными компаниями, которые берут за основу готовые модели. Для данного метода методом первоначального обучения модели могут быть как RAG (Retrieval-Augmented Generation), так и LoRA – метод адаптации больших языковых моделей, позволяющий эффективно обучать их на новых задачах с минимальным количеством параметров. Основная идея

метода заключается в том, чтобы не изменять веса оригинальной модели, а добавлять дополнительные матрицы, которые обновляются во время обучения что позволяет уменьшить объем вычислений и памяти, требуемых для fine-tuning.

При осуществлении обучения должны выполняться следующие требования для:

– Базовой модели:

- доступ к предобученной модели (например, из Hugging Face Transformers);
- модель должна поддерживать добавление дополнительных параметров, таких как LoRA.

– Данных для обучения:

- Набор данных, соответствующий целевой задаче (например, текстовые пары для задач в формате вопрос-ответ или классификации);
- Данные должны быть предварительно обработаны и форматированы для обучения.

– Инфраструктура:

- Вычислительные ресурсы: GPU или TPU для ускорения вычислений.
- Достаточное количество оперативной памяти (RAM) и видеопамати (VRAM), так как LoRA уменьшает требования к ресурсам, но они всё ещё зависят от размера модели.

Метод RAG (Retrieval-Augmented Generation) объединяет поиск информации и генерацию текста с помощью языковых моделей, что позволяет создавать более точные и релевантные ответы. Метод работает в соответствии со следующим алгоритмом: сначала система поиска извлекает релевантные данные из внешних источников, таких как базы знаний, документы или веб-страницы. Затем полученные данные передаются в генеративную модель, которая использует их как контекст для создания ответа. Таким образом, модель может предоставлять актуальную информацию, даже если она не была частью её изначального обучения. Сами данные представляются в формате эмбедингов – векторов со значениями, которые модель интерпретирует и переводит в текст [14-16].

Главное преимущество RAG – доступ к обновляемой и точной информации, что делает ответы более обоснованными и снижает вероятность "галлюцинаций", когда модель придумывает факты. Кроме того, RAG позволяет использовать более компактные модели, так как специфическая информация предоставляется через поиск, а не хранится в модели что делает подход гибким и позволяет его применять в различных областях, таких как чат-боты, поиск по документации, персонализированные приложения и научные исследования.

Архитектура RAG включает три ключевых компонента: механизм векторного представления текста, поисковую систему и генеративную модель. Эффективность метода зависит от качества поиска и актуальности базы данных. Если предоставленные данные нерелевантны или устарели, качество ответа снижается. Также база данных должна быть отформатирована определенным образом для разбиения на удобные для получения вектора.

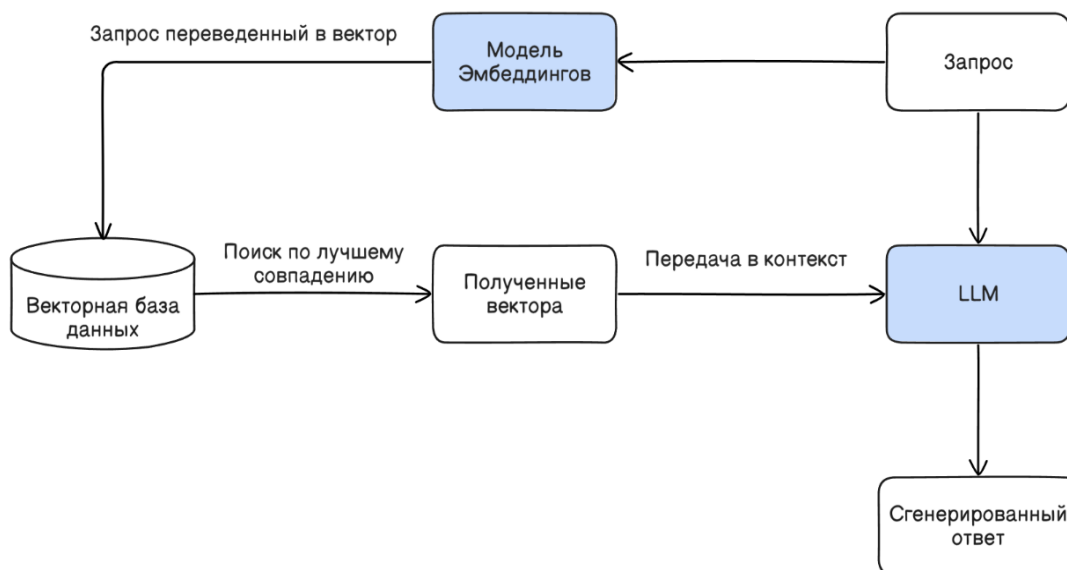


Рис. 1. Архитектура RAG

Основным инструментом для осуществления поиска по базе и создания эмбедингов является LangChain – библиотека с открытым исходным кодом, предназначенная для создания приложений на основе больших языковых моделей. Она упрощает интеграцию LLM в сложные приложения, такие как чат-боты, системы вопросов и ответов (Q&A), генераторы текста, обработки документов и другие интерактивные системы. LangChain объединяет возможности LLM с внешними источниками данных, инструментами и вспомогательными модулями и позволяет моделям работать с актуальной информацией, управлять сложными процессами, выполнять вычисления или взаимодействовать с базами данных. Библиотека поддерживает как локальные модели (например, GPT, BERT), так и API облачных провайдеров (например, OpenAI, Cohere), используя при этом модульный подход [17].

Для хранения эмбедингов используются векторные базы, такие как FAISS или Chroma. В зависимости от требований (количество и размер запрашиваемой информации, интеграция с используемыми инструментами и т.д.) выбирается нужный фреймворк.

Обучение моделей на наборах данных, включающих в себя русский язык, осуществляется с помощью нейронных сетей. Основными крупными разработчиками являются СБЕР, Яндекс и Т-Банк со своими моделями YandexGPT, GigaChat, T-lite и T-Pro. Также можно выделить независимого разработчика, Илья Gusev с моделью Saiga и VikhrModels с семейством моделей Vikhr. Данные модели показывают хорошие результаты при работе с русским языком, однако некоторые из них не находятся в открытом доступе и могут быть использованы только через платное API. Для перевода данных из обычного текста в вектора с определенными значениями и загрузка их в векторную базу, и передачу в модель по запросу в RAG используется отдельная модель эмбедингов.

Таким образом наиболее предпочтительным выбором являются использование комбинации RAG и SFT, что должно позволить не только получать актуальную информацию, но и качественные ответы по специфике выбранной предметной области.

### 3. Определение эффективности использования RAG

Для подтверждения эффективности использования RAG проведем эксперимент, в основе которого лежит алгоритм, состоящий из следующих шагов:

#### 1. Выбор модели

Используется языковая модель Saiga-Llama3 8B и модель эмбедингов USER BGE-M3.

#### 2. Сбор документов

Загружаются документы в формате Markdown. В качестве примера использовался Таможенный кодекс Российской Федерации.

#### 3. Предобработка данных

– Текстовые документы разбиваются на строки или абзацы.

– Каждая строка подготавливается для дальнейшего преобразования в векторные представления.

#### 4. Генерация эмбедингов

– Каждая строка из загруженных документов обрабатывается моделью эмбедингов USER BGE-M3.

– Полученные эмбединги сохраняются в векторной базе данных с помощью FAISS.

#### 5. Создание базы данных

Векторная база данных организуется для быстрого поиска релевантной информации.

#### 6. Получение запроса от пользователя

Пользователь задает вопрос системе через интерфейс, разработанный на основе фреймворка Gradio.

#### 7. Поиск релевантных данных

– на первом шаге система ищет релевантные данные в векторной базе с помощью алгоритма ближайших соседей;

– на втором, найденные данные передаются в основную модель.

#### 8. Генерация ответа

– основная модель Saiga-Llama3 8B использует найденные данные для формирования ответа;

– ответ отображается пользователю через интерфейс.

#### 9. Сравнение ответов модели

– оцениваются ответы модели с доступом к Таможенному кодексу и без него;

– анализируется точность и релевантность предоставленных ответов.

#### 4. Принцип работы программы

Для проведения эксперимента взята языковая модель от Илья Gusev Saiga Llama3 8B, созданная на основе Llama3 и имеющая 8 миллиардов параметров, что позволяет получать высокое качество ответов при наименьших затратах на оборудование. Модель находится в открытом доступе и имеет большое количество вариантов квантизации (сжатия) что позволяет подобрать подходящий вариант для локального разворота. Модель для эмбедингов была выбрана с помощью бенчмарка по моделям для русского языка. [18]. По результатам представленным в бенчмарке наиболее подходящей стала модель USER bge-m3, которая показала лучшее соотношение качества ответов и количества параметров и имеет версии, подходящие для локального разворота.

Для локального запуска LLM необходимы специальные утилиты, дающие возможность работать с моделью используя ресурсы устройства, на котором она развернута. В нашем случае мы хотим получить готовый продукт, с возможностью разворота на любом устройстве, подходящим требованиям, для чего будет использован Ollama – инструмент созданный на основе llama.cpp. библиотеки для языка программирования C++/C с открытым исходным кодом. Ollama позволяет быстро разворачивать локальные модели со своей API, что устраняет необходимость отправки данных на сторонние серверы и дает возможность тестировать LLM без оглядки на возможные лимиты.

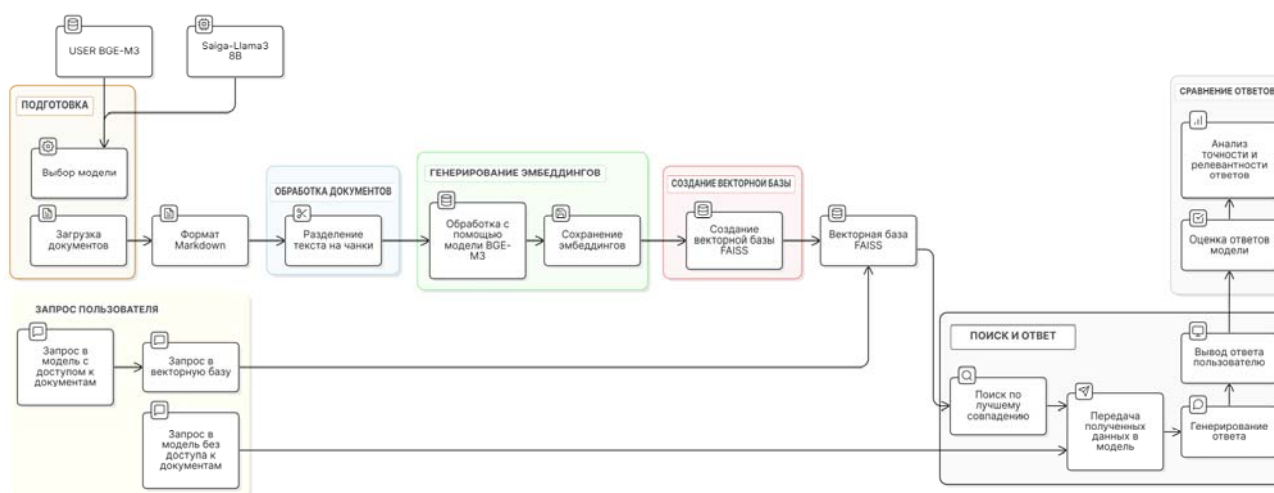


Рис. 2. Схема эксперимента

Для работы с Ollama модель должна иметь формат GGUF – бинарный формат, который содержит информацию о тензорах (многомерная структура данных, которая обобщает понятия скаляров, векторов и матриц) и метаданных (описание модели), используемых в моделях машинного обучения [19-21]. Он структурирован следующим образом:

##### 1. Основные поля заголовка

– GGUF magic number – (4 байта) фиксированная последовательность байт 0x47 0x47 0x55 0x46, которая идентифицирует файл как GGUF.

– GGUF version – (4 байта) версия формата файла.

– tensor\_count – (8 байт) количество тензоров в файле

– metadata\_kv\_count – (8 байт) количество ключ-значений в метаданных.

##### 2. Тензоры (tensor info)

– name – строка в формате GGUF, обозначающая название тензора (например, blk.0.ffn\_gate.weight).

– n\_dimensions – (4 байта) количество измерений тензора.

– dimensions – массив значений, описывающий размеры тензора (например, [4096, 32000]).

– type – (4 байта) тип тензора. Например, 10 обозначает формат GGML\_TYPE\_Q2\_K.

– offset – (8 байт) смещение тензора в файле относительно начала.

##### 3. Метаданные (metadata)

После секции с тензорами идет блок с метаданными, представленными в виде пар ключ-значение. Количество пар определяется значением metadata\_kv\_count. Примеры метаданных:



- general.architecture: 'Llama' – архитектура модели.
- general.name: 'LLama v2' – название модели.
- llama.context\_length: 4096 – длина контекста.
- general.file\_type: 10 – тип файла.
- tokenizer.ggml.model: 'llama' – используемая модель токенизатора.
- tokenizer.ggml.tokens: [...] – список токенов в формате токенизатора.

После метаданных следует секция, содержащая бинарные данные тензоров. Положение каждого тензора определяется значением offset, указанным в описании тензоров.

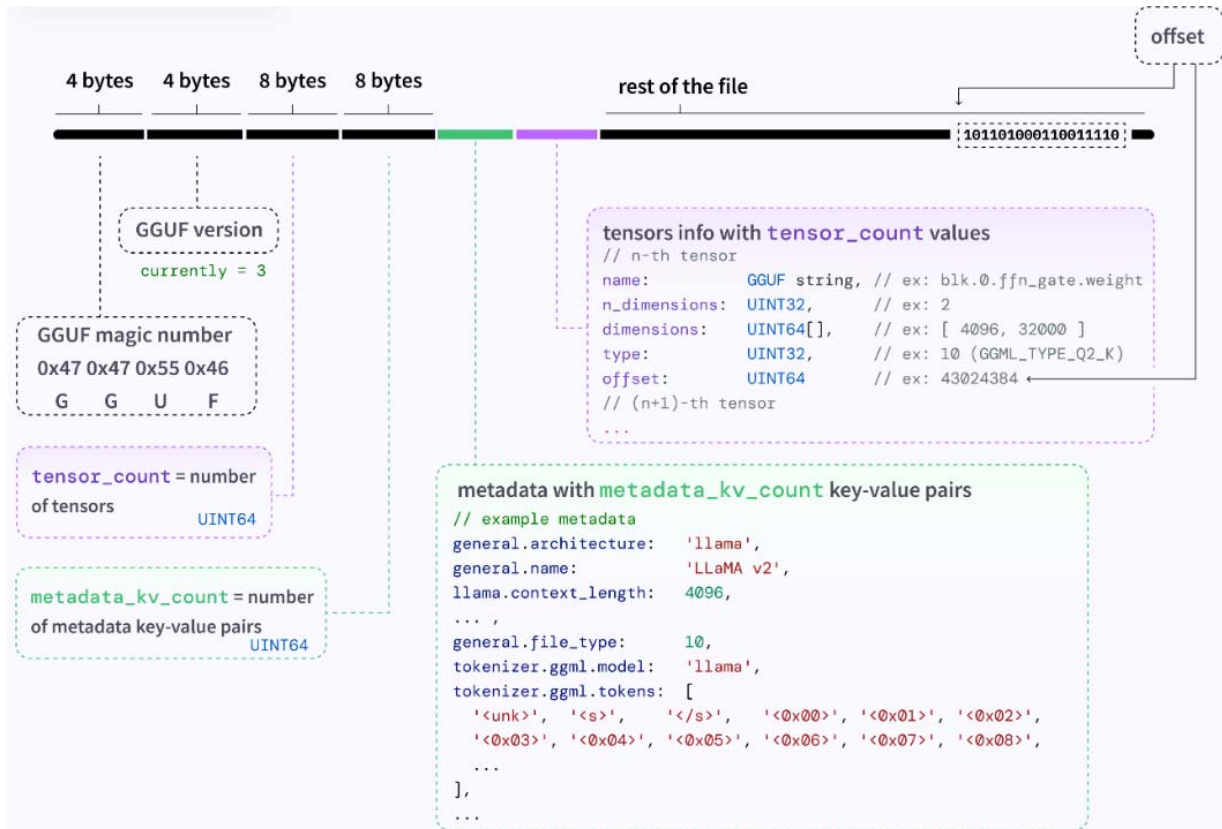


Рис. 3. Пример архитектуры модели в формате

Основная архитектура продукта выглядит следующим образом. За основу берется модель Saiga-Llama3 8B и модель эмбедингов USER BGE-M3, развернутых с помощью Ollama. Производится запуск основного скрипта, написанного на языке Python, при этом в основную программу загружаются документы с нужными данными. В настоящем эксперименте таким документом является Таможенный кодекс Российской Федерации в формате Markdown. На следующем шаге происходит процесс создания векторной базы данных на основе FAISS. Каждая полученная из документа строка посылается в узел API отвечающий за эмбединги, после чего полученный по итогу список эмбедингов загружается в векторную базу для дальнейшего использования.

После создания векторной базы основная модель готова принимать вопросы от пользователя. Запрос посылается на узел API, отвечающий за работу с моделью, при необходимости производится поиск по векторной базе, после чего модель генерирует ответ с нужной информацией.

Ниже представлен интерфейс, разработанный на основе фреймворка Gradio для взаимодействия с моделью:

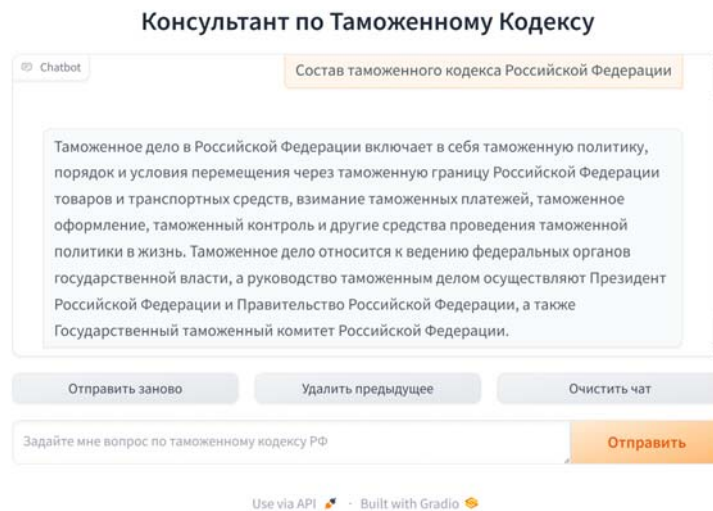


Рис. 4. Интерфейс приложения

По итогам взаимодействия с моделью получены следующие результаты:

Запрос: Состав таможенного дела российской федерации

Ответ модели без доступа к таможенному кодексу:

Таможенное дело в России представляет собой важный институт, обеспечивающий контроль и надзор в области внешнеэкономической деятельности. В стране функционирует Федеральная таможенная служба (ФТС), которая является основным органом, осуществляющим контроль и надзор в этой сфере. ФТС управляет региональными таможенными управлениями, которых в России насчитывается девять. Основные задачи таможенных органов включают контроль за соблюдением таможенного законодательства, сбор таможенных пошлин и налогов, а также предотвращение контрабанды и других правонарушений. Таможенные органы также выполняют функции валютного контроля и обеспечивают защиту экономических интересов государства. Основой для функционирования таможенного дела является Таможенный кодекс Российской Федерации, который регулирует все аспекты таможенного регулирования и направлен на защиту экономического суверенитета страны. Таможенные органы структурированы по регионам и имеют свои пункты пропуска, что позволяет эффективно управлять потоками товаров и контролировать внешнеэкономическую деятельность. Таким образом, состав таможенного дела в Российской Федерации включает в себя систему органов, их функции и задачи, а также законодательные основы, которые обеспечивают его эффективное функционирование.

Ответ модели с доступом к таможенному кодексу при помощи RAG:

Таможенное дело в Российской Федерации включает в себя таможенную политику, порядок и условия перемещения через таможенную границу Российской Федерации товаров и транспортных средств, взимание таможенных платежей, таможенное оформление, таможенный контроль и другие средства проведения таможенной политики в жизнь. Таможенное дело относится к ведению федеральных органов государственной власти, а руководство таможенным делом осуществляют Президент Российской Федерации и Правительство Российской Федерации, а также Государственный таможенный комитет Российской Федерации.

### Заключение

Исходя из ответов модели можно сделать вывод что хоть в первом случае модель и выдает более длинный ответ, он слишком общий и имеет мало фактических данных. Во втором ответе с использованием RAG модель оперирует терминами из таможенного кодекса и не допускает неточностей и общих терминов в ответе, что позволяет использовать модель в случаях, где важна фактическая точность и следование документации.

При этом скорость ответа модели без доступа к документации была чуть выше (3.5с. против 5с. у модели с использованием RAG). Данная задержка обусловлена тем, что посылается дополнительный

запрос к векторной базе и производится поиск. Так же при увеличении количества векторов в базе, задержка тоже может увеличиваться.

Представленную выше программа также адаптирована для решения следующих задач: генерация документации по коду или базе данных или перевод данных в разные форматы, например doc в JSON и т.д. Для улучшения качества ответов модель обучается с помощью SFT на основе специально подготовленного датасета.

В работе выявлена проблема обработки больших объемов данных на русском языке, предложены современные методы автоматизации с использованием больших языковых моделей (LLM) и их интеграции в бизнес-процессы. Рассмотрены преимущества таких подходов, как Supervised Fine-Tuning (SFT), LoRA и Retrieval-Augmented Generation (RAG), которые позволяют решать задачи по извлечению, анализу и генерации данных с учетом специфики русского языка.

Приведены примеры практической реализации модели на базе Saiga-Llama3 и эмбеддингов USER BGE-M3 с использованием библиотеки Ollama и инструмента FAISS для создания векторной базы данных. В результате их применения достигается улучшение точности и актуальности ответов модели при взаимодействии с документами, а возможность адаптации модели под конкретные задачи делает её универсальным инструментом для обработки текстов на русском языке [22, 23].

## Литература

1. *Гадасин Д.В., Золотарева П.Ю., Трмасова Л.А.* Влияние кластеризации при обработке сырых данных // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2024. Т. 15, № 3. С. 10-19. EDN JQIPHX
2. *Трмасова Л.А., Первухина А.А., Гадасин Д.В.* Использование методов Косарайю и k-средних для формирования кластеров // Электросвязь. 2024. № 9. С. 47-55. DOI 10.34832/ELSV.2024.58.9.007. EDN DOZTZK
3. *Gadasin D.V., Shvedov A.V., Yudin A.A.* Clustering methods in large-scale systems // Synchroninfo Journal. 2020. Vol. 6, No. 5, pp. 21-24. DOI 10.36724/2664-066x-2020-6-5-21-24. EDN XHNSYV
4. *Gadasin D.V., Shvedov A.V., Koltsova A.V.* Cluster model for edge computing // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 : Proceedings, Vienna, 20-22 октября 2020 г. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 9261538. DOI 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261538. EDN FGDLSA
5. *Гадасин Д.В., Шведов А.В.* Применение транспортной задачи для балансировки нагрузки в условиях нечеткости исходных данных // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 1. С. 13-20. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-1-13-20. EDN WKNPIX
6. *Гадасин Д.В.* Построение бинарного дерева минимальной цены // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 11. С. 38-44. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-11-38-44. EDN GMCEWG
7. *Гадасин Д.В., Вакурин И.С., Трмасова Л.А.* Алгоритм распределения данных между системами хранения на основе свойства самоподобия // Электросвязь. 2024. № 4. С. 44-50. DOI 10.34832/ELSV.2024.53.4.015. EDN BRSLCL
8. *Гадасин Д.В., Михайлов М.Р., Чернышов Д.В.* Определение алгоритма структурирования текстовых данных // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2024. Т. 14, № 1. С. 4-11. EDN GLAEQF
9. *Sasaki Hideyasu, et al., editors.* Intelligent and Knowledge-Based Computing for Business and Organizational Advancements. IGI Global, 2012.
10. *Bonello Joseph, Cachia Ernest.* Data Processing – Challenges and Tools, 2015.
11. *Гадасин Д.В., Бессолицын А.Д.* Виды и методы структурирования данных из различных информационных систем: анализ и применение // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики, Симферополь – Гурзуф, 12-14 октября 2023 г. Симферополь: ИП Зуева Т. В., 2023. С. 202-204. EDN UGZRXL
12. *Гадасин Д.В., Шведов А.В., Мелькова Е.К.* Структурирование данных исходя из центра масс // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики : Труды XXI Международной научно-практической конференции, Симферополь-Гурзуф, 20-22 октября 2022 г. Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2022. С. 266-268. EDN RFCCST
13. *Yixin Liu, Avi Singh, C. Daniel Freeman, John D. Co-Reyes, Peter J. Liu* Improving Large Language Model Fine-tuning for Solving Math.
14. *Mozharovskii Evgenii.* Evaluating retrieval-augmented generation (rag) techniques in enhancing lms for coding tasks // Universum: технические науки. 2024. №6.
15. *Гадасин Д.В., Шведов А.В., Вакурин И.С., Трмасова Л.А.* Семантический и вероятностный векторы в поисковых запросах // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2023. Т. 13, № 2. С. 19-32. EDN HUBVHI

16. *Shevelev S.V., Shvedov A.V., Gadasin D.V., Vakurin I.S.* Syntax and probability vectors in search query // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 407-414. EDN TVFKOH
17. *Topsakal O., Akinci T.C.* Creating Large Language Model Applications Utilizing LangChain: A Primer on Developing LLM Apps Fast. International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences, 2023, №1(1), pp. 1050-1056.
18. Massive Text Embedding Benchmark (MTEB) Leaderboard [Электронный ресурс] <https://huggingface.co/spaces/mteb/leaderboard>
19. Документация LLM [Электронный ресурс] <https://huggingface.co/docs/hub/gguf>
20. *Гадасин Д.В., Шведов А.В., Кузин И.А.* Трёхмерная реконструкция объекта по одному изображению с использованием глубоких свёрточных нейронных сетей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 7. С. 29-35. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-7-29-35. EDN YTLCNW
21. *Кузин И.А., Гадасин Д.В.* Модель контейнера данных для минимизации трафика при передаче субъективных характеристик объектов на изображении трёхмерной сцены // Телекоммуникации и информационные технологии. 2021. Т. 8, № 2. С. 96-100. EDN TYFFBH
22. *Гадасин Д.В., Бессолицын А.Д., Гадасин Д.Д.* Оценка качества данных информационных систем // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2024. Т. 14, № 2. С. 4-12. EDN GYIWJU
23. *Гадасин Д.В., Пантелеева К.А.* Работа с данными в условиях антиросийских санкций // Цифровая трансформация промышленности: новые горизонты : Сборник научных трудов по материалам 3-й Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 10 ноября 2022 г. Том 1. М.: Русайнс, 2022. С. 115-119. EDN UYEPWI
24. *Shvedov A.V., Gadasin D.V., Alyoshintsev A.V.* Segment routing in data transmission networks // T-Comm. 2022. Vol. 16. No. 5, pp. 56-62. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-5-56-62 EDN: VAYLJQ
25. *Kalmykov N.S., Dokuchaev V.A.* Segment routing as a basis for software defined network // T-Comm. 2021. Т. 15. № 7. С. 50-54. EDN: LYVZCV
26. *Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Statev V.Yu.* Classification of personal data security threats in information systems // T-Comm. 2020. Т. 14. № 1. С. 56-60. EDN: QOGYHH
27. *Докучаев В.А., Маклачкова В.В., Статьев В.Ю.* Цифровизация субъекта персональных данных // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 6. С. 27-32. EDN: XVWYJP
28. *Pavlov S.V., Dokuchaev V.A., Mytenkov S.S.* Model of a fuzzy dynamic decision support system // T-Comm. 2020. Т. 14. № 9. С. 43-47. EDN: VYFNLB
29. *Назаров М.Д., Шведов А.В.* Корреляция атрибутов соглашения об уровне обслуживания с основными параметрами QoS в корпоративных сетях // Телекоммуникации и информационные технологии. 2020. Т. 7. № 2. С. 73-79. EDN: VQHDTJ

## **КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ ТРАКТОВ КАНАЛА ЗВУКОВОГО ВЕЩАНИЯ, СФОРМИРОВАННЫЙ ПО РЕАЛЬНОМУ СИГНАЛУ**

**Попов Олег Борисович**

*Московский технический университет связи и информатики, профессор, Москва, Россия*  
[olegp45@yandex.ru](mailto:olegp45@yandex.ru)

**Чернышева Татьяна Васильевна**

*Московский технический университет связи и информатики, доцент, Москва, Россия*  
[krba2012@yandex.ru](mailto:krba2012@yandex.ru)

**Борисов Андрей Алексеевич**

*Московский технический университет связи и информатики, аспирант, Москва, Россия*  
[a.borisov199@gmail.com](mailto:a.borisov199@gmail.com)

**Волчков Дмитрий Александрович**

*Московский технический университет связи и информатики, аспирант, Москва, Россия*  
[qwerty.load@yandex.ru](mailto:qwerty.load@yandex.ru)

### **Аннотация**

Формирование амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) канала звукового вещания традиционно осуществляется с помощью тестового синусоидального сигнала. Однако в реальных условиях передачи по современным адаптивным каналам звуковой сигнал претерпевает существенные изменения: сжатие, обработку аудиопроцессорами и воспроизведение через акустические системы. Несмотря на эти трансформации, субъективное качество восприятия звука остается относительно высоким. Разработанные нами новые методы спектрального анализа достигают уровня точности и разрешающей способности, ранее недоступного для технических средств и сопоставимого с возможностями человеческого слуха. Это открывает новые перспективы для формирования и контроля АЧХ непосредственно в процессе передачи звуковой программы на всех этапах прохождения сигнала по каналу.

### **Ключевые слова**

Дискретное преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье, дискретное косинусное преобразование, коэффициенты преобразования, пик-фактор, транспонирование спектра, субъективно-статистические экспертизы, фильтрация.

### **Введение**

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ), а точнее, его более быстрое вычислительное исполнение - быстрое преобразование Фурье (БПФ), является наиболее распространенным методом для получения спектральной оценки сигнала. БПФ переводит сигнал из временной области в частотную, представляя его в виде набора коэффициентов. Однако, точность определения амплитуд и фаз спектральных составляющих с помощью БПФ ограничена частотами, соответствующими так называемым «бинам».

Было предложено [1,2] повысить точность формирования оценок частот, расположенных между бинами за счет многократного транспонирования исходного спектра сигнала путем умножения его комплексного отображения на комплексно представленную частоту в доли бин:

$$S\gamma(n) = S(n) \cdot \exp(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \gamma)$$

$S\gamma(n)$  – коэффициент спектра после умножения на комплексную экспоненту;

$S(n)$  – коэффициент исходного спектра;

$j$  – мнимая единица;

$\gamma$  – параметр, определяющий сдвиг частоты;

$n$  – номер отсчета.

Для реализации этого метода используется дополнительный ортогональный сигнал, также полученный с помощью БПФ.

$$\hat{X}_k = X_k \cdot H_k, \quad H_k = \begin{cases} -j, & k = \left(0, \frac{N}{2} - 1\right) \\ +j, & k = \left(\frac{N}{2}, N - 1\right) \end{cases} \quad (1)$$

где  $X_k$  – БПФ коэффициенты исходного сигнала,  $\hat{X}_k$  – БПФ коэффициенты ортогонального сигнала;  $H_k$  – дискретно представленная функция  $j \cdot \text{sign}(\omega)$ .

Для оценки точности преобразования на границах спектра анализируются параметры оконных функций. Вычисляется отношение:

$$R_k = \frac{\sum_{i=1}^{N/2-1} E_i}{\sum_{i=k+1}^{N/2-1} E_i}, \quad (2)$$

где  $E_i$  – энергия  $i$ -го коэффициента,  $N$  – номер коэффициента, к спектральной энергии которого отнеслась энергия всех коэффициентов.

Для формирования ортогонального сигнала с высокой точностью необходимо выбрать подходящую оконную функцию. Одним из наиболее эффективных вариантов является окно Наттолла. Его выбор обусловлен минимальным уровнем боковых лепестков, что позволяет снизить искажения сигнала.

Качество формирования ортогонального сигнала оценивается коэффициентом  $R_k$ , который показывает максимальную теоретическую погрешность. Чем меньше значение  $R_k$ , тем точнее формируется сигнал. На рисунке 1 приведены графики зависимости  $R_k$  от частоты для различных окон, из которых видно, что окно Наттолла обеспечивает наилучшие результаты. Для трех других окон – Хемминга, треугольного и прямоугольного – данное

На рисунке 2 приведены зависимости сигнал/шум преобразования (С/Шп) ортогонального сигнала от частоты преобразуемого колебания для шести значений параметра  $Fd/N$  (бина), характеризующего полосу частот, отображаемую одним коэффициентом.

При использовании окна Наттолла возникает неравномерность коэффициента передачи, особенно на краях спектра. Для компенсации этой неравномерности применяется дополнительное окно  $1/W2(n)$ . Это позволяет достичь высокой точности формирования ортогонального сигнала при длительности дискретной последовательности не менее 4000 отсчетов.

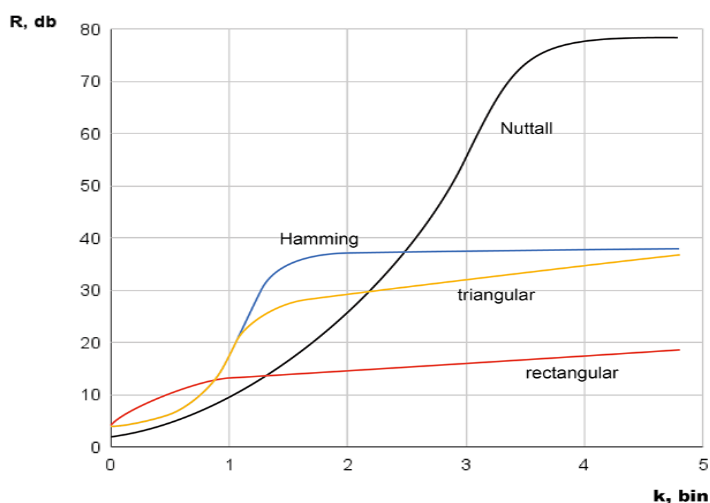
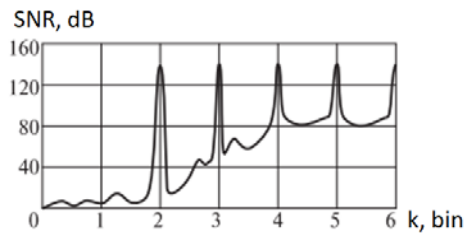


Рис. 1. Отношение  $R_k$  для четырех оконных функций



**Рис. 2.** Погрешность синтеза ортогонального сигнала для гармонического колебания

Предложенный в работе [2] алгоритм значительно превосходит традиционные методы, такие как ДПФ и дискретное косинусное преобразование (ДКП), по точности определения спектральных характеристик сигнала.

ДПФ ограничен в своей способности различать близко расположенные частоты, так как каждый коэффициент ДПФ соответствует определенному диапазону частот. ДКП страдает от широких боковых лепестков, которые искажают спектр сигнала.

ДКП массива данных  $L(m)$ ,  $m = 0, 1, \dots, N-1$  определяется (4):

$$L_X(0) = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \sum_{m=0}^{N-1} X(m)$$

$$L_X(k) = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \sum_{m=0}^{N-1} X(m) \cos\left(\frac{(2m+1)k\pi}{2N}\right), \quad k = 1, 2, \dots, N-1 \quad (4)$$

$L_X(k)$  – это  $k$  – коэффициент ДКП.

Новый алгоритм позволяет достигать высокой точности в определении частоты, амплитуды и фазы спектральных составляющих. Например, точность определения частоты составляет 1,5 Гц в области ниже 500 Гц и 1,5% от абсолютного значения частоты в области выше 500 Гц. При этом разрешающая способность алгоритма достигает 60 Гц, что позволяет различать очень близкие по частоте сигналы.

Одним из ключевых преимуществ нового алгоритма является возможность формирования мгновенных спектров, то есть спектров, рассчитанных на небольших временных интервалах. Это позволяет отслеживать изменения спектрального состава сигнала во времени.

Таким образом, предложенный алгоритм [2] является мощным инструментом для спектрального анализа сигналов, превосходящим по своим характеристикам традиционные методы.

### Результаты исследований

При оценке качества передачи звукового сигнала часто используют гармонические сигналы (синусоиды). Однако, реальные звуковые сигналы значительно сложнее и состоят из множества частотных компонент. Коэффициенты передачи, полученные для гармонического сигнала, могут не точно отражать реальное поведение системы при передаче сложных сигналов.

Для выявления этих различий был разработан новый алгоритм спектрального анализа, позволяющий более точно оценивать коэффициенты передачи по реальным звуковым сигналам. Экспериментально подтверждено, что алгоритм позволяет обнаруживать искажения, вносимые в сигнал при передаче.

В качестве тестового сигнала была выбрана Рапсодия Листа №2. Выбор этого произведения обусловлен тем, что многие радиостанции используют его для проверки качества передачи. Результаты эксперимента показали, что разработанный алгоритм позволяет точно определить характеристики системы передачи, даже при наличии сложных искажений. На рисунке 3 представлена осциллограмма сигнала, на фоне которой показана АЧХ использованного для обработки фильтра.

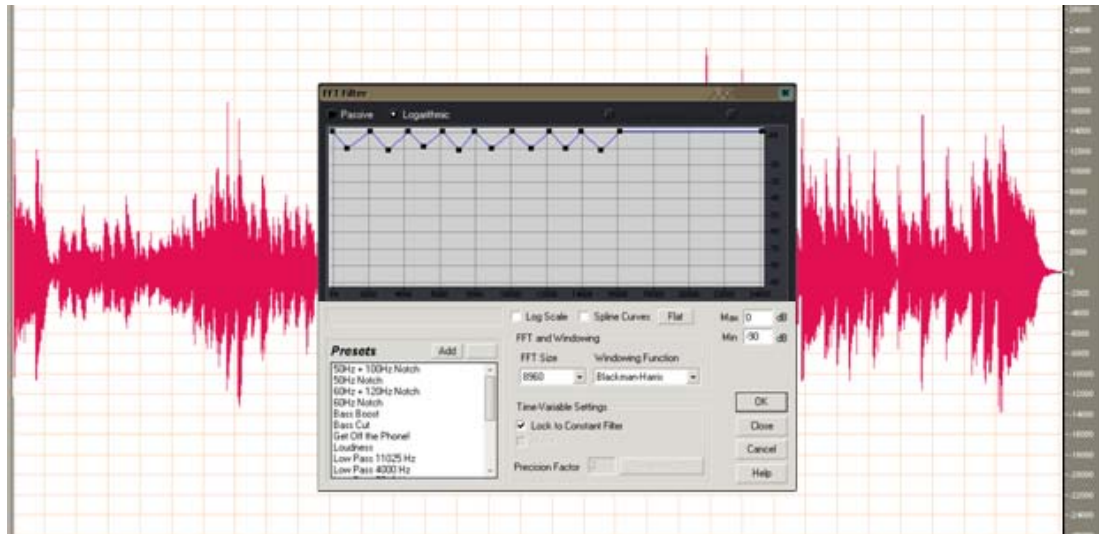


Рис. 3. Искажения АЧХ при передаче Рапсодии Листа №2

На рисунке 4 представлены результаты формирования АЧХ по реальному сигналу на фоне шаблона, нормирующего качество канала с полосой до 10 кГц. Как видно из рисунка введенные искажения уверенно выявляются при формировании АЧХ по реальному сигналу на длительности 2,8 с.

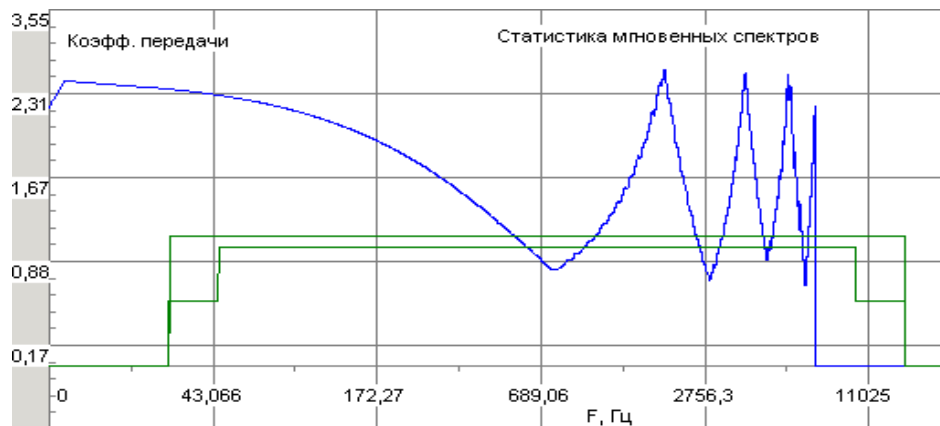


Рис. 4. АЧХ деформированного сигнала Рапсодии Листа №2

Результаты оценки АЧХ канала передачи по сигналу Рапсодии Листа №2 представлен на рисунке 5.

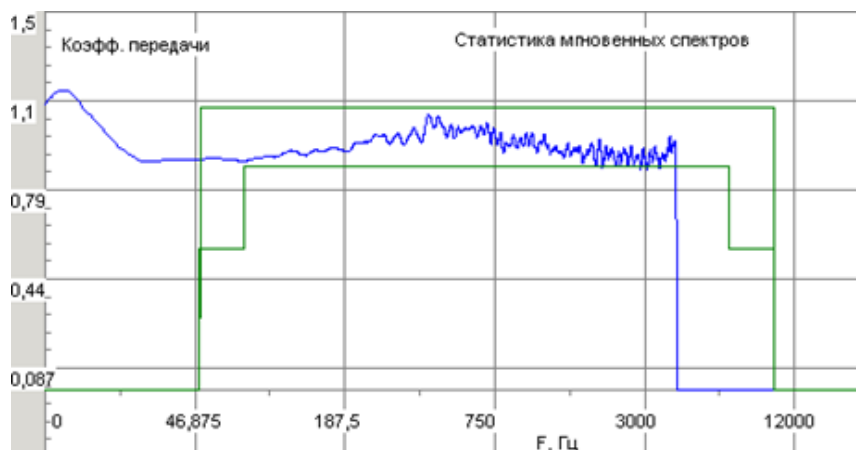


Рис. 5. АЧХ реального канала сформированная по сигналу Рапсодии Листа №2

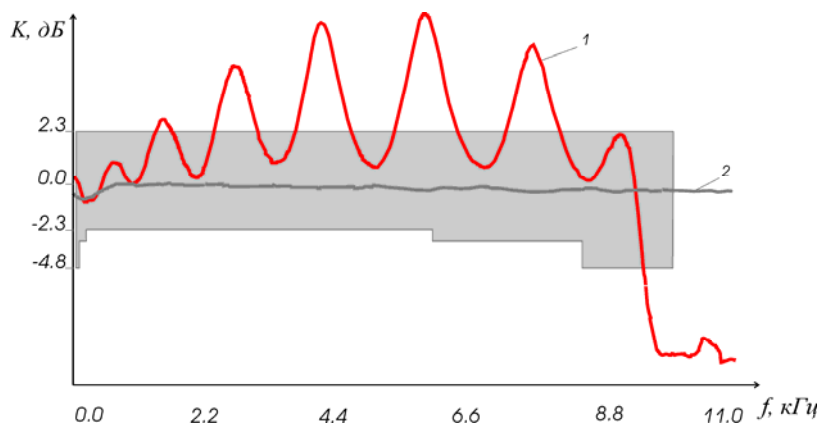


Современные каналы звукового вещания обладают высокой степенью адаптивности, то есть они могут динамически изменять свои характеристики в зависимости от передаваемого сигнала и условий канала. Для улучшения качества звука в таких каналах широко применяются различные виды аудиообработки, такие как компрессия, лимитирование и эквалаизация.

Однако, использование традиционных методов оценки качества передачи, основанных на гармонических сигналах, может привести к недостоверным результатам. Дело в том, что реальные звуковые сигналы значительно сложнее и содержат множество частотных компонентов. Многие виды аудиообработки оказывают различное влияние на различные частотные составляющие сигнала, что может привести к искажениям, которые не проявляются при использовании гармонических сигналов.

Например, аудиопроцессор Optimod, широко используемый в радиовещании, при обработке реальных звуковых сигналов вносит искажения, не обнаруживаемые при использовании тестовых сигналов. Это связано с тем, что Optimod осуществляет многополосную обработку сигнала, и эти полосы могут не проявляться при передаче гармонических сигналов.

Таким образом, для точной оценки качества передачи звукового сигнала необходимо использовать реальные звуковые сигналы и учитывать особенности их обработки в канале.



**Рис. 6.** АЧХ аудиопроцессора Оптимод, фирмы Орбан, сформированная по реальному сигналу (1) и АРГО (2)

Для получения точных данных о характеристиках тракта передачи звукового сигнала необходимо использовать длительные отрезки реальных звуковых сигналов. Это позволяет сгладить случайные флуктуации и получить более стабильные результаты.

Экспериментально подтверждено, что аудиопроцессоры, используемые в студиях звукозаписи и вещания, могут вносить существенные искажения в спектр сигнала. Особенно это касается низкочастотной области. Например, аудиопроцессор T.C. Electronics DBMax, широко используемый в профессиональной аудиотехнике, при обработке реальных музыкальных произведений усиливает низкие частоты. Этот эффект не проявляется при использовании тестовых сигналов (синусоид), что затрудняет его обнаружение при традиционных методах измерения.

На рисунке 7 приведена АЧХ тракта формирования программ, включающего указанный аудиопроцессор, и сформированная по реальному вещательному сигналу. Причем подобные настройки были установлены на аудиопроцессорах и основной и резервной студии (рис. 8).

Для устранения нежелательного эффекта "бархатного" звучания потребовалась замена аудиопроцессора.

В процессе формирования сигнала звукового вещания широко применяются различные методы обработки, включая коррекцию или деформацию частотной характеристики. Одним из наиболее распространенных инструментов для этого является эквалайзер. Несмотря на кажущуюся простоту такой операции, ее параметры необходимо тщательно контролировать на реальном звуковом сигнале.

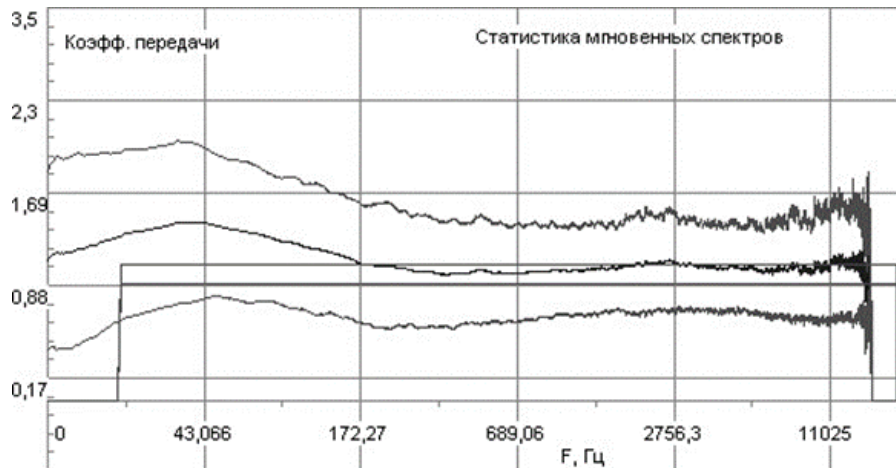


Рис. 7. АЧХ аудиопроцессора T.C. Electronics DBMax в аппаратной эфирной студии

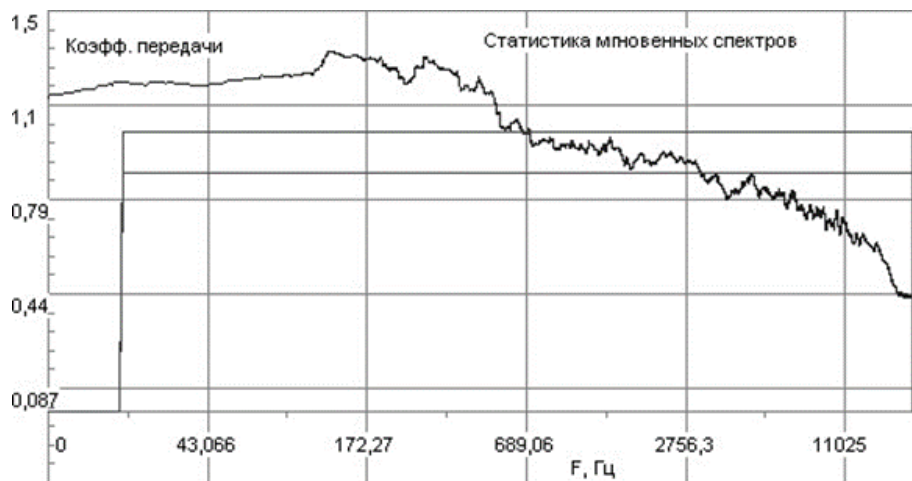


Рис. 8. АЧХ аудиопроцессора T.C. Electronics DBMax в аппаратной резервной студии

На рисунке 9 представлена частотная характеристика эквалайзера, настроенная в редакторе Adobe Audition. Визуальный анализ подтверждает соответствие полученных характеристик заданным параметрам. Однако, как показывает практика, настройки, оптимизированные на тестовых сигналах (например, синусоидах), могут некорректно работать при обработке сложных музыкальных композиций.

На рисунке 9 приведена частотная характеристика эквалайзера, сформированная в редакторе Adobe Audition. Контроль с помощью синусоидального сигнала подтверждает соответствие ее характеристик интерфейсу.

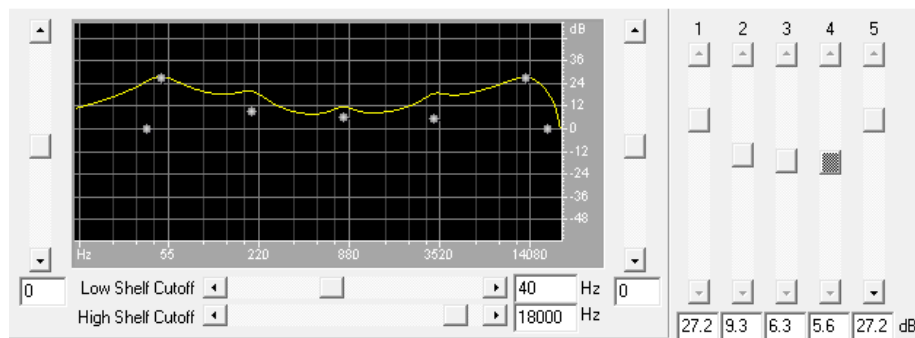


Рис. 9. АЧХ эквалайзера

При проверке работы эквалайзера на реальном сигнале звукового вещания (СЗВ) характеристика существенно отличается (рис. 10).

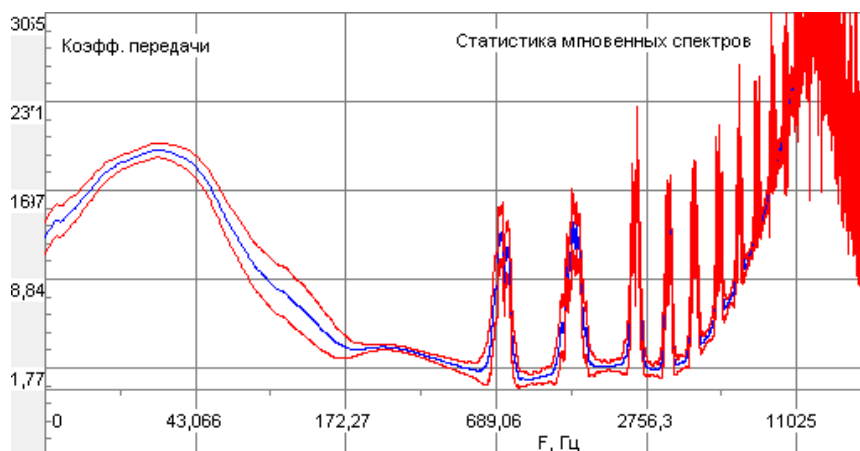


Рис. 10. АЧХ эквалайзера сформированная по изменению мгновенных спектров реального сигнала

Использование форматов сжатия, таких как MP3, значительно усложняет оценку качества передачи звукового сигнала. При сжатии сигнала часть информации, которую человек не воспринимает или воспринимает слабо (так называемая психоакустическая избыточность), отбрасывается. Это приводит к тому, что при построении АЧХ мы получаем не точную копию исходного сигнала, а некоторую среднюю характеристику с большими отклонениями. Чем сильнее сжатие, тем больше этих отклонений.

На рисунке 11 приведен пример оценки АЧХ коэффициента передачи при скорости MP3 64 Кбит/с, сформированного на программе 30 минутной длительности.

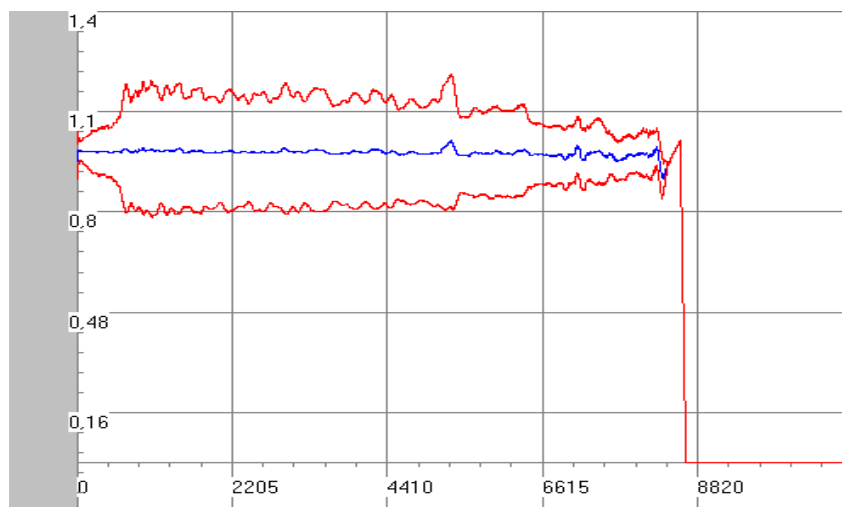


Рис. 11. АЧХ тракта с использованием формата МПЗ на скорости 64 Кбит/с

Кроме того, акустические системы, такие как колонки, также вносят свой вклад в искажение звукового сигнала. Даже высококачественные студийные мониторы, например, KRK Rokit Powered 5 (АЧХ активного студийного монитора – рис. 12), не могут идеально воспроизвести весь частотный диапазон. Это связано с физическими ограничениями динамиков и акустических систем в целом.

Таким образом, оценка качества звучания системы, включающей в себя элементы сжатия и воспроизведения звука, является сложной задачей. Для получения точной оценки необходимо учитывать множество факторов, включая характеристики формата сжатия, настройки эквалайзера, особенности акустических систем и даже субъективные предпочтения слушателя.

Была проведена оценка АЧХ для сигнала типа белый шум. Результаты оценки приведены на рисунке 13.

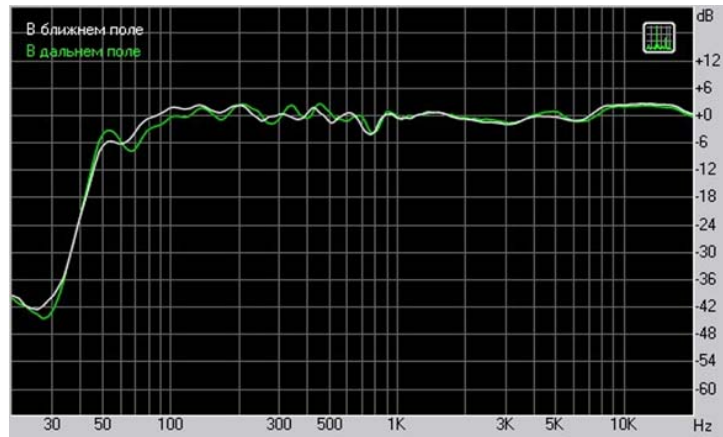


Рис. 12. АЧХ активного студийного монитора ближнего поля KRK Rokit Powered 5

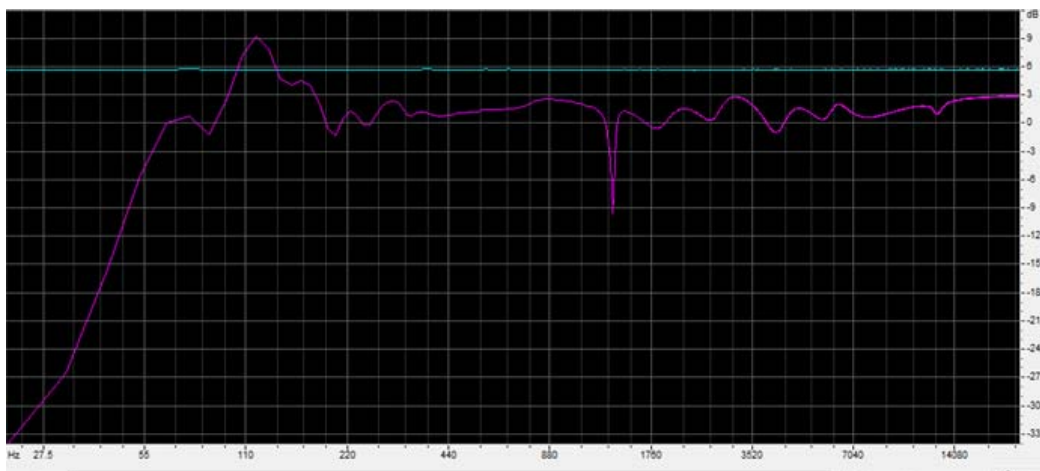


Рис. 13. АЧХ монитора ближнего поля KRK Rokit Powered 5 при звучании белого шума

Как мы видим неравномерность существенно возросла и достигает 10-12 дБ. Вызывает интерес неравномерность АЧХ при излучении АС реального информационного сигнала. На рисунке 14 приведена АЧХ, сформированная по изменению мгновенных спектров сигнала.



Рис. 14. АЧХ при излучении реального информационного сигнала

АЧХ акустической системы не является строго фиксированной характеристикой. Она может изменяться в зависимости от спектрального состава воспроизводимого сигнала. Например, при воспроизведении белого шума, содержащего все частоты в равной мере, АЧХ будет отличаться от АЧХ при воспроизведении синусоидального сигнала одной частоты.

Более того, даже для одного и того же музыкального произведения, исполненного с разными эмоциональными оттенками, АЧХ может существенно варьироваться. Это связано с тем, что различные музыкальные жанры и стили исполнения имеют свой характерный спектральный состав. Например, классическая музыка, как правило, имеет более богатый спектр по сравнению с современной электронной музыкой.

Таким образом, выбор акустической системы должен основываться не только на ее паспортных данных, но и на характере музыки, которую планируется слушать. Существуют акустические системы, оптимизированные для воспроизведения определенных музыкальных жанров.

### Заключение

Контроль спектра звукового сигнала – ключевая операция в оценке качества звуковой передачи. Он необходим при проверке оборудования, обработке звука и анализе звуковых систем. Все элементы звукового тракта, как аналоговые, так и цифровые, адаптивны. При этом спектр сигнала может меняться в зависимости от характеристик канала, объема данных или желаемого эмоционального эффекта. Такие изменения происходят в реальном времени и не всегда фиксируются при передаче тестовых сигналов. Поэтому требуется точный спектральный анализ и определение коэффициента передачи для каждого мгновенного спектра СЗВ.

Исследования показали существенные различия между оценкой АЧХ канала при использовании стационарных синусоидальных сигналов и реальных звуковых сигналов. Искажения, возникающие при передаче сложных звуковых сигналов, часто остаются незамеченными при традиционных тестах, что искажает оценку качества передачи.

Основное влияние на АЧХ оказывают аудиопроцессоры. Например, аудиопроцессор Optimod компании Orban вносит искажения, которые не проявляются на тестовых сигналах, но отчетливо видны на реальных вещательных сигналах. Причина кроется в многополосной обработке сигнала. В отличие от Optimod, многополосный процессор ARGO таких недостатков не имеет.

Искажения АЧХ также возникают при коррекции частотной характеристики эквалайзером. Хотя при настройке эквалайзера с помощью синусоидальных сигналов его характеристика соответствует заданной, при работе с реальным звуковым сигналом она может значительно отличаться.

В трактах первичного и вторичного распределения искажения АЧХ часто связаны с форматами сжатия, такими как MP3. При формировании АЧХ для таких форматов получается усредненная характеристика, которая не отражает реальных отклонений, возникающих при передаче сигнала.

Оконечные абонентские акустические системы также вносят значительный вклад в ухудшение качества звучания. Акустические излучатели по-разному реагируют на одиночные и многочастотные сигналы, что приводит к изменению АЧХ в зависимости от спектрального состава сигнала.

Предложен новый метод спектрального анализа, который позволяет приблизить точность и разрешающую способность анализа к возможностям человеческого слуха. Это дает возможность формировать и контролировать АЧХ в процессе передачи звуковой программы для всех элементов канала.

Разработан метод формирования точных оценок мгновенных спектров звуковых сигналов на малых временных интервалах с использованием дискретного косинусного преобразования.

Результаты исследований подтвердили эффективность предложенного способа оценки АЧХ.

### Литература

1. Патент 2808156 РФ Способ и устройство высокоточного измерения спектра информационных акустических сигналов / Абрамов В.А., Попов О.Б., Чернышева Т.В., Борисов А.А.; заяв.10.03.2023; опубл.24.11.2023.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022 2022616423, Россия. Программа для высокоточного спектрального анализа звукового сигнала. Программное обеспечение "ДКП-Спектр": опуб. 19.04.2022 / Абрамов В. А., Попов О. Б.
3. Патент 2813684 С1 РФ Способ и устройство измерения спектра и кепстральных параметров информационных акустических сигналов телерадиовещания/ Абрамов В.А., Попов О.Б., Чернышева Т.В., Борисов А.А.; заяв.13.07.2023, опубл.15.02.2024.

4. Патент 2756934 С1 РФ, Способ и устройство измерения спектра информационных акустических сигналов с компенсацией искажений/ Абрамов В. А., Попов О. Б., Власюк И. В., Балобанов А. В.; заяв.17.11.2020; опубл.07.10.2021.
5. *Попов О.Б., Рихтер С.Г., Терехов А.Н.* и др. Командирование сигналов в канале звукового вещания. Учебное пособие для вузов; Под ред. С. Г. Рихтера. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 298 с.
6. *Ковалгин Ю.А.* Цифровое радиовещание: системы и технологии. М.: Горячая линия – Телеком. 2021, 580 с.
7. *Záviška P., Rajmic P., Ozerov A., Rencker L.* A Survey and an Extensive Evaluation of Popular Audio Declipping Methods // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 15, no. 1, pp. 5-24, Jan. 2021, doi: 10.1109/JSTSP.2020.3042071.
8. *Schlecht S.J., Fierro L., Välimäki V., Backman J.* Audio Peak Reduction Using a Synced allpass Filter // ICASSP 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Singapore, Singapore, 2022, pp. 1006-1010, doi: 10.1109/ICASSP43922.2022.9747877.
9. *Ming B., Wu P.* Research on Audio Signal Denoising and Simulation Processing // 2019 International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE), Haikou, China, 2019, pp. 192-194, doi: 10.1109/CISCE.2019.00051.
10. Recommendation ITU-R BS. I 284-2 (01/2019). General methods for the subjective assessment of sound quality. BS Series. Broadcasting service (sound).
11. *Bai T., Xie L., Li Z., Yang J., Chen Z., Wan P.* A High-Precision Audio Z- $\Delta$  D/A Converter // 2020 IEEE 14th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID), Xiamen, China, 2020, pp. 120-123, doi: 10.1109/ASID50160.2020.9271769.

## **РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ИЗ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ**

**Романец Андрей Владимирович**

*ИКБ РТУ МИРЭА, доцент, к.ф.-м.н., Москва, Россия*  
[romanets1975@mail.ru](mailto:romanets1975@mail.ru)

**Астапенков Антон Александрович**

*ПИИШ СВЧ-электроники РТУ МИРЭА, студент магистратуры, Москва, Россия*

**Вдовин Виктор Сергеевич**

*ПИИШ СВЧ-электроники РТУ МИРЭА, студент магистратуры, Москва, Россия*

**Конарев Андрей Николаевич**

*ПИИШ СВЧ-электроники РТУ МИРЭА, студент магистратуры, Москва, Россия*

**Смирнов Николай Владимирович**

*ПИИШ СВЧ-электроники РТУ МИРЭА, студент магистратуры, Москва, Россия*

### **Аннотация**

*В настоящей работе рассматриваются и обосновываются преимущества алгоритмического ядра системы автоматизированного проектирования электрических цепей в виде библиотеки вычислительных процедур и функций с открытым кодом, написанных на языке высокого уровня, например Python.*

### **Ключевые слова**

*Библиотека процедур и функций с открытым кодом, система автоматизированного проектирования электрических цепей, линейные и нелинейные элементы, переходные процессы, стационарные режимы*

### **Введение**

Дальнейшее развитие микро-, а ныне уже и мезо-, и нано-электроники является основой современного технологического, а, следовательно, и экономического прогресса общества. Важной составляющей такого развития является моделирование и автоматизированное проектирование электронных устройств и систем, что в свою очередь невозможно без использования современных алгоритмов, вычислительных технологий и специализированного программного обеспечения (ПО), специализированных систем автоматизированного проектирования (САПР) в области электроники и схемотехники.

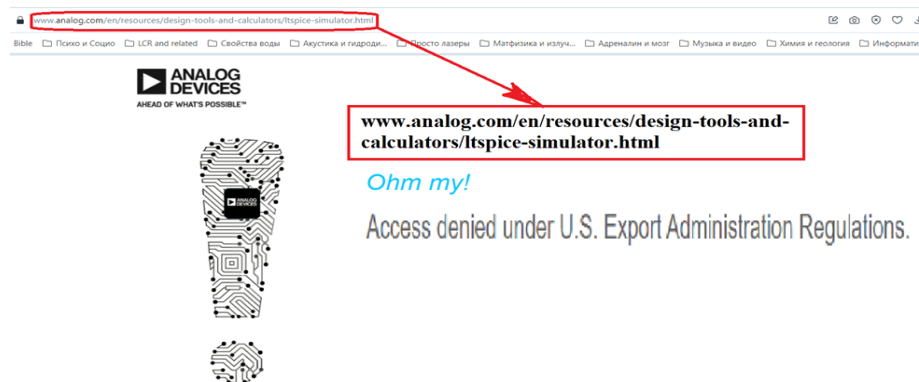
В указанной сфере существует большое количество решений, как коммерческих, так и находящихся в свободном доступе, включая ПО, библиотеки и модули с открытым кодом.

К популярным коммерческим САПР можно отнести ПО для сквозного проектирования радиоэлектронных систем (РЭС) в САПР Altium Designer [1], ПО для схемотехнического проектирования OrCAD [2], ПО для проектирования устройств СВЧ – диапазона MicroWave Office [3], другие программные продукты [4].

ПО САПР электроники, находящиеся в свободном доступе, представлены как продуктами, разработанными компаниями – производителями электронных компонентов и устройств (например, Multisim разработки компании National Instruments, LT-Spice разработки Analog Devices), так и средствами моделирования и проектирования, созданными исследовательскими лабораториями и даже отдельными энтузиастами. К последним относятся такие ПО как KiCAD [5], а также ПО с открытым кодом, например библиотеки на языке Python PySpice [6] для расчета электрических схем, а также PyNEC [7] для моделирования и расчета характеристик антенн. В работах [8-10] приводится анализ применимости библиотек с открытым кодом к моделированию реальных электротехнических и электронных устройств и систем, включая распределенные силовые электрические сети и антенны.

Необходимо отметить, что современная политическая и экономическая ситуация делает все более актуальными вопросы импортозамещения критических и передовых технологий, включая ПО САПР электроники. Коммерческие программные продукты уже не продаются и не поддерживаются компаниями – разработчиками для пользователей из Российской Федерации. Аналогичные ограничения действуют и для большинства бесплатных программных продуктов, разработанных технологическими компаниями (рис. 1).

Что касается библиотек с открытым кодом, то следует учитывать, что их использование может быть затруднено в случае введения со стороны компаний-разработчиков ограничений на использование компиляторов, модулей, приложений и операционных систем, которые необходимы для применения данных библиотек.



**Рис. 1.** Скан страницы веб-сайта компании-разработчика. Доступ к ПО LT-Spice компании Analog Devices ограничен на основании Административного Закона США об экспортном регулировании

Таким образом, разработка отечественного ПО САПР для моделирования и проектирования электронных компонентов, модулей и систем является актуальной задачей, имеющей стратегическое значение.

В нашей стране имеются перспективные разработки в данной области, например ПО Delta Design [11] или САПР Гамма «Цифровые двойники» [12]. Однако в приведенных примерах речь идет о коммерческих продуктах с закрытым (проприетарным) кодом, которые выросли из ПО для внутреннего пользования соответствующих технологических компаний. Это, наряду с положительными факторами, связанными с профессионализмом разработчиков указанного ПО, определяет ряд очевидных ограничений. Тем самым определяется также актуальность разработки отечественных библиотек с открытым кодом для решения задач САПР электроники. Отметим, что библиотеки с открытым кодом имеют также важное методическое значение в процессе обучения студентов соответствующих специальностей университетов.

В настоящей работе рассмотрен прототип библиотеки для моделирования и анализа электрических цепей из линейных и нелинейных элементов (устройств) на языке Python. Выбор языка разработки определяется современной широкой популярностью языка Python в научных исследованиях, наличием большого количества специализированных математических и графических библиотек, таких как Matplotlib, NumPy, SciPy и т.п. Не последнюю роль в свете сказанного выше играет и определенная «кроссплатформенность» Python. В частности, увеличивается количество библиотек на данном языке для работы на базе операционной системы AstraLinux [13, 14].

Помимо указанных причин, разработка отечественных библиотек с открытым кодом для задач САПР электроники мотивируется научно-методическими факторами и аспектами. Дело здесь состоит в следующем.

Методы моделирования и анализа электрических цепей, состоящих из линейных элементов, достаточно хорошо проработаны. Речь здесь, в частности, идет о таких подходах как операционное исчисление Хэвисайда и метод передаточных функций.

В случае, когда в цепь включаются нелинейные элементы, они в зависимости от конкретной задачи моделируются либо конечными (дискретными) автоматами релейного типа (ключевые режимы работы). Либо вводится понятие «рабочей точки» на нагрузочной характеристике с линеаризацией



нелинейных процессов в ее окрестности и с введением для нелинейных элементов наборов параметров, таких как дифференциальные сопротивления для диодов,  $h$  – параметры для транзисторов и т.п. При этом считается, что колебательные процессы токов и напряжений в изучаемой цепи относительно «рабочей точки» имеют достаточно малую амплитуду, что позволяет использовать линеаризацию нелинейных (например, вольт-амперных, ВАХ) характеристик элементов и устройств.

В случае режимов с колебаниями больших амплитуд само понятие «рабочей точки» становится ограниченно применимым. Правильнее в этом случае говорить об «опорном режиме» функционирования цепи, его стабильности и устойчивости. При этом нелинейные ВАХ входящих в цепь элементов и устройств, а также возможные большие амплитуды колебаний токов и напряжений определяют необходимость использования для моделирования математического аппарата нелинейных дифференциальных уравнений с применением методов их аналитического исследования и численного решения.

Аналогичный подход следует применять и при более детальном изучении и моделировании ключевых режимов работы нелинейных устройств в цепях, поскольку это позволяет, в частности, оценивать проявления неидеальности «ключей» - обратные и фоновые токи, токи утечки через затворы и тому подобные величины и явления.

В данной работе указанный подход продемонстрирован на примере достаточно простой электрической схемы с одним нелинейным элементом – полупроводниковым диодом. Показано, что даже для такой относительно простой схемы нелинейность ВАХ диода приводит к существованию интересных режимов, которые не только могут служить в качестве методической демонстрации развиваемого подхода, но и имеют самостоятельное прикладное значение.

Однако прежде необходимо уточнить понятие линейных и нелинейных элементов электрических цепей в рассматриваемом в настоящей работе контексте.

### Линейные и нелинейные элементы электрических цепей

Для дальнейшего изложения фундаментальным является представление электронного компонента или устройства в виде четырехполюсника. На рисунке 2 представлено типовое изображение четырехполюсника в учебной литературе и монографиях. Его недостатком является то, что не указаны в явном виде «земля» и шины питания, что устранено на следующем изображении.

На вход четырехполюсника подается сигнал той или иной формы, а на выходе снимается выходное напряжение. «Условный» вольтметр, т.е. прибор для измерения напряжений (падения напряжений) должен для обеспечения точности измерений иметь большое внутреннее сопротивление.

Таким образом, фактическая характеристика четырехполюсника зависит и от сопротивления нагрузки (а также и от внутренних параметров источника входного сигнала, например его эквивалентного внутреннего сопротивления  $r_{in}$ )

$$U_{out\ theor} = f_{theor}(U_{in})$$

$$U_{out\ real} = f_{real}(R_{load}, U_{in}, r_{in}, \dots)$$

Различные устройства, микросхемы и другие элементы электрических и радиотехнических цепей могут рассматриваться как совокупности взаимосвязанных между собой четырехполюсников. Так на рисунке 3 изображены внешний вид и схема контактов операционного усилителя (далее ОУ) LM321 с напряжением питания 32 В. Указанный ОУ имеет полярное питание, инвертирующий и неинвертирующий входы и выход. Как известно, входные и выходной сигналы ОУ не могут превышать по амплитуде напряжение питания.

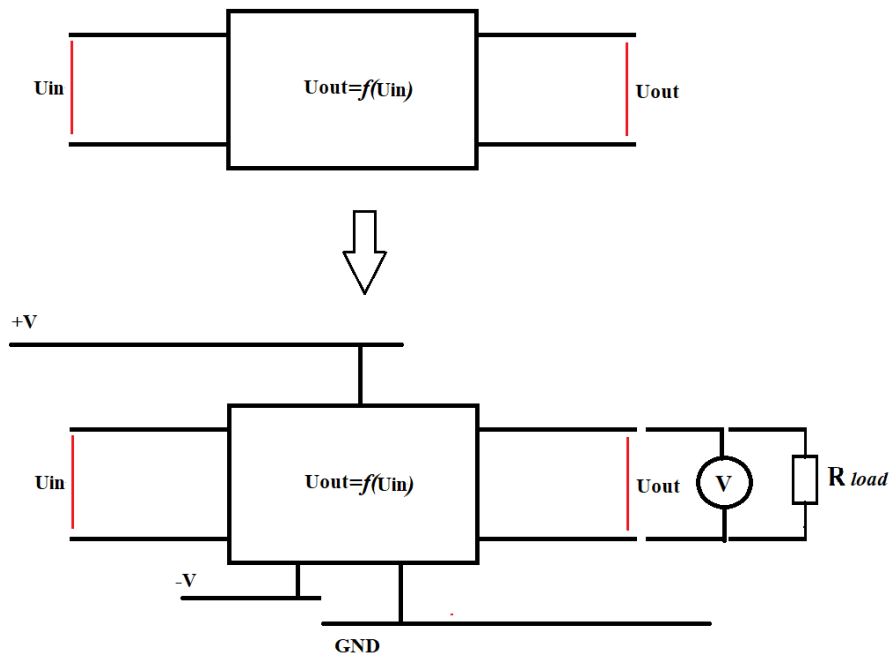


Рис. 2. Концепция четырехполюсника

Формально говоря, любые два контакта радиотехнического устройства (микросхемы) можно рассматривать как вход или выход четырехполюсника. Но при этом произвольный выбор пар контактов, не отвечающий заданной функциональности устройства, может привести к его повреждению.

Однако в случае цепей, состоящих из линейных пассивных элементов ( $RLC$  – цепей), ситуация облегчается – действительно, практически каждый уровень напряжения (падения напряжения) может рассматриваться как выходной сигнал (рис. 4).

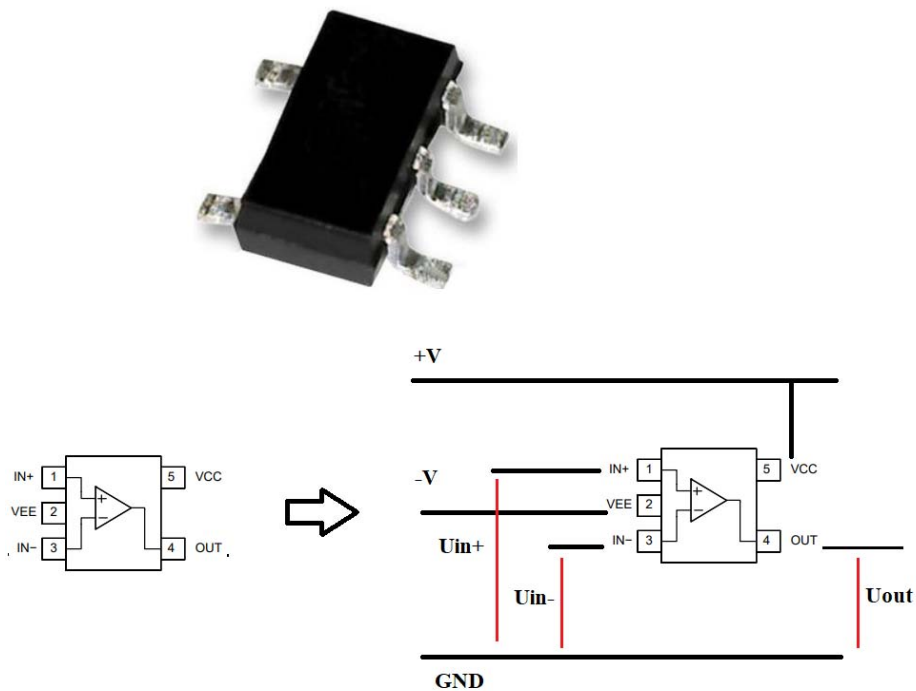


Рис. 3. Схема контактов ОУ LM321

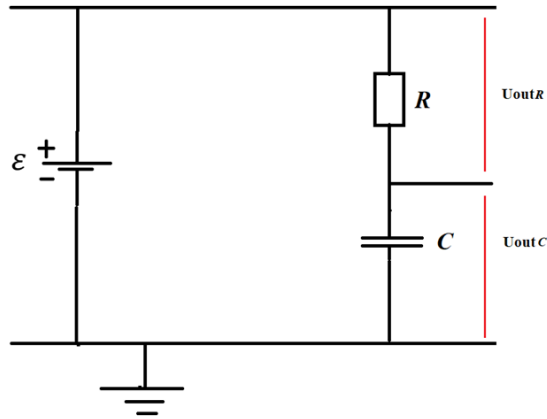


Рис. 4. Возможные варианты представления RC – цепи в виде «четырёхполюсника»

Математическое определение линейности элемента (устройства) может быть записано через передаточную функцию и суть таково

$$U_{out} = f_{tr}(U_{in})$$

$$f_{tr}(\alpha U_1 + \beta U_2) = \alpha f_{tr}(U_1) + \beta f_{tr}(U_2)$$

Если мы используем частотное представление входного сигнала (Фурье-представление)

$$U_{in}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}_{in}(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

то

$$U_{out}(t) = f_{tr}\left(\int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}_{in}(\omega) e^{i\omega t} d\omega\right) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}_{in}(\omega) f_{tr}(e^{i\omega t}) d\omega$$

Таким образом, для линейных элементов цепей передаточная функция представима в виде суммы передаточных функций от отдельных гармонических мод с коэффициентами, равными коэффициентам Фурье-разложения при модах. Наиболее общий вид линейного оператора  $f_{tr}$ , действующего на монохроматическую моду  $e^{i\omega t}$ , удовлетворяющего также условию инвариантности относительно сдвига по частоте, суть свертка с неким ядром

$$f_{tr}(e^{i\omega t}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\theta) e^{i(\omega-\theta)t} d\theta$$

Но это означает, что  $f_{tr}(e^{i\omega t})$  в общем случае не является монохроматической модой, т.е. гармоническим колебанием одной частоты. Следовательно, выражение для  $U_{out}(t)$  следует записать в виде

$$U_{out}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}_{in}(\omega - \theta) \rho(\theta) e^{i(\omega-\theta)t} d\theta$$

В частных случаях это выражение может принимать более простой вид. Так, например, для RC – цепи, приведенной на рисунке 4, если входное напряжение (внешняя ЭДС) изменяется по гармоническому закону, т.е. представляет собой монохроматическую моду, то выходные напряжения на резисторе и на конденсаторе будут гармоническими колебаниями той же частоты, но с измененной амплитудой и фазой. Отметим также, что в соответствии с законами Кирхгофа, а именно правилом для падений напряжения в замкнутом контуре электрической цепи, сумма выходных напряжений на резисторе и на конденсаторе равна внешней ЭДС. Это означает в частности, что сдвиг фазы входного сигнала на резисторе равен по величине и противоположен по знаку сдвигу фазы на конденсаторе, считая относительно фазы исходного (входного) сигнала.

Подытоживая, можно сказать, что линейный элемент электрических цепей преобразует входные гармонические сигналы заданной частоты «равномерно» по всему спектру частот, т.е., говоря математическим языком. Инвариантно относительно сдвига по частоте. Свойство возникновения в выходном сигнале гармоник с кратными частотами является признаком нелинейности рассматриваемого элемента.

На практике все элементы имеют ограниченную полосу пропускания в частотном диапазоне. Как правило для высоких частот, начиная с некоторого порогового значения, агрегированная (сосредоточенная) схема элемента или устройства должна быть модифицирована добавлением эффективных емкостей и иных вспомогательных «виртуальных» элементов.

### Общая схема САПР электронных устройств

Типовая структура САПР электронных устройств определяется потоком данных и этапами его обработки. Обработка данных осуществляется с помощью алгоритмических процедур и функций, которые традиционно объединяют в две группы – «алгоритмическое ядро» и «графическое ядро».

Для проектов с открытым кодом и коммерческих проектов на этапе разработки такое представление оказывается удобным, поскольку одни и те же графические или алгоритмические процедуры могут использоваться на разных этапах обработки потока данных. По мере накопления опыта применения данной САПР к решению тестовых задач внутри алгоритмического ядра или графического ядра, могут быть выделены «устойчивые» разделы, объединяющие процедуры и функции по какому-либо признаку, например, специализированные для того или иного этапа обработки потока данных. Некоторые процедуры и функции могут дублировать друг друга, а эффективность их применения может определяться конкретными задачами и вариантами данных.

Отдельно следует выделить алгоритмический модуль описания структуры и конфигурации проектируемых устройств и систем, который является пересечением множеств процедур и функций алгоритмического ядра и графического ядра. Этот модуль составляет основу интерфейса для пользователя данной САПР - проектировщика и аналитика электронных устройств и систем, с помощью чего он задает различные варианты электронных устройств и систем, которые затем будут рассчитаны и проанализированы с помощью САПР. Важнейшим здесь является этап корректной конвертации данных о структуре и конфигурации изучаемой электронной системы из графического представления, созданного пользователем с помощью графического интерфейса, во внутренне представление САПР, доступное для анализа и обработки с помощью процедур алгоритмического ядра.

Отметим, что в некоторых системах, особенно для библиотек с открытым кодом типа упомянутых выше (PySpice, PyNEC), вместо графического интерфейса для задания конфигурации изучаемой системы пользователю предлагается скриптовый псевдо-код для описания структуры и конфигурации. На этапе разработки, отладки и тестирования САПР такой подход может быть эффективен. Затем скриптовое описание структуры и конфигурации может быть заменено на графический интерфейс.

Также в состав САПР входит база данных по стандартным и типовым элементам, включающая характеристики таких элементов, необходимые для проведения моделирования, проектирования и анализа устройств и систем с использованием в их составе указанных стандартных элементов;

Типовая последовательность этапов обработки потоков данных в САПР:

- этап задания пользователем структуры и конфигурации изучаемой системы;
- этап предобработки данных;
- этап визуализации;
- этап расчетов (с применением циклов для перебора вариантов, если необходимо);

– этап постобработки данных и вывода результатов моделирования, проектирования и анализа.

Использование в качестве алгоритмического ядра библиотеки соответствующих вычислительных процедур и функций с открытым кодом имеет ряд существенных плюсов, особенно для моделирования, проектирования и анализа сложных систем и процессов, где важна контролируемая точность моделирования и вычислений.

Обсуждаемая схема САПР приведена на рисунке 5.

### Законы Кирхгофа как основа алгоритмического ядра САПР электронных устройств и систем

В основу моделирования электрических цепей, состоящих из линейных и нелинейных сосредоточенных аналоговых элементов могут быть положены законы сохранения энергии и заряда, которые нашли свое оригинальное выражение в форме правил Кирхгофа для электрических цепей.

Для цепи с простейшей конфигурацией, состоящей из двух замкнутых контуров (рис. 6), правила Кирхгофа для напряжений и токов примут вид

$$\begin{aligned} E &= U + U_1 \\ U_1 &= U_2 \\ i &= i_1 + i_2 \end{aligned}$$

Для замыкания системы уравнений необходимо связать между собой соотношения токи и напряжения в ветвях контуров. Такие связи и соотношения хорошо известны. Так для омического резистора

$$i = \frac{U}{R}$$

где  $R$  – величина омического сопротивления.

Для конденсатора

$$\begin{aligned} q &= UC \\ i &= \frac{dq}{dt} \end{aligned}$$

где  $q$  – текущий заряд на конденсаторе,  $C$  – величина емкости конденсатора

Для индуктивного элемента («катушки»)

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L}$$

где  $L$  – величина индуктивности

Для нелинейных элементов, действующих без задержки во времени, может быть использована вольт-амперная характеристика (ВАХ)

$$i = f(U)$$

В общем случае для нелинейного элемента

$$F\left(i, \frac{di}{dt}, U\right) = 0$$

Приведенные соотношения могут быть реализованы как базовые процедуры (функции) библиотеки САПР электронных устройств, например на языке Python.

Из числа всех переменных (токов и напряжений в изучаемой электрической цепи) необходимо выбрать «существенные переменные», значения которых и будут

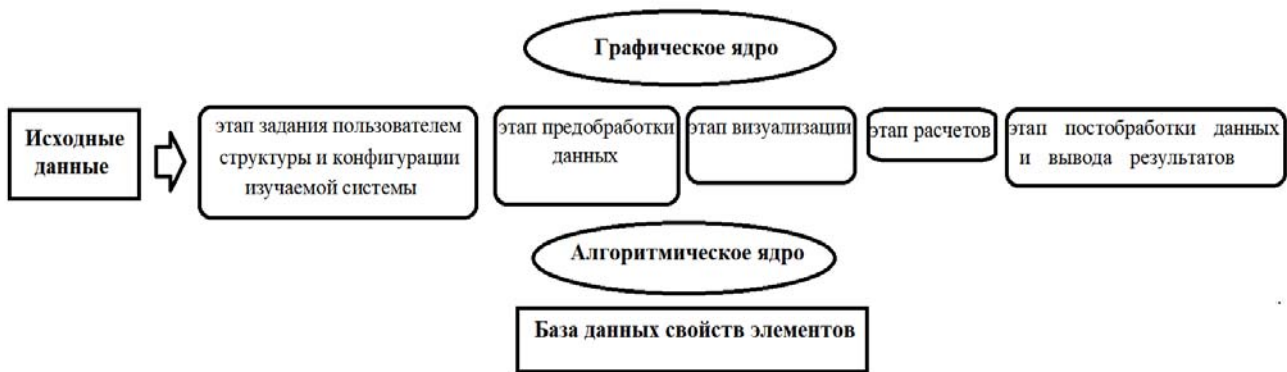


Рис. 5. Типовая структура САПР электронных устройств и систем

определяться на основе решения полученных уравнений. Если рассматриваются переходные процессы в изучаемой электрической цепи, то под значениями существенных (и прочих) переменных следует понимать временные ряды их изменения.

Если омические сопротивления, индуктивности и емкости в цепи не зависят от величин токов и напряжений, то соответствующие элементы являются линейными. Если внешняя ЭДС является гармоническим сигналом одной частоты, то с той же единой частотой будут происходить колебания токов и напряжений на всех элементах рассматриваемой цепи. В этом случае для амплитуд сигналов на соответствующих элементах цепи будут выполняться линейные соотношения, аналогичные закону Ома. Так для конденсатора ток через него

$$i = i_0 e^{j\omega t} = C \frac{dU}{dt} = j\omega C U_0 e^{j\omega t}$$

$$i_0 = jC U_0$$

Для индуктивности

$$\frac{di}{dt} = j\omega i_0 e^{j\omega t} = \frac{U_0 e^{j\omega t}}{L}$$

$$i_0 = -\frac{jU_0}{\omega L}$$

Полученные аналоги омического сопротивления для емкости (конденсатора) и индуктивности являются мнимыми величинами и носят, как известно, наименование реактивных сопротивлений. Соответствующая реактивная мощность в цепи не рассеивается, а переходит из электрической составляющей в магнитную и наоборот. Соответствующая методика расчетов и составляет суть операционного исчисления Хэвисайда и позволяет производить расчет стационарных режимов электрических цепей, составленных из линейных элементов, с помощью решения систем линейных алгебраических уравнений, но в комплексной плоскости значений переменных – амплитуд токов и напряжений. При этом финальные соотношения и величины могут быть выбраны действительными с учетом использования формулы Эйлера

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$$

Однако в случае переходных процессов необходимо использовать математический аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). В большинстве случаев даже для линейных цепей системы ОДУ допускают лишь численное решение, однако методы численного решения ОДУ хорошо разработаны.

Для систем большой размерности (более двух) явное обращение (разрешение) уравнений, полученных на основе правил Кирхгофа, относительно производных существенных переменных как правило затруднено. По этой причине целесообразно использовать численные методы решения соответствующих систем уравнений относительно указанных производных. Это необходимо делать на каждом шаге численного алгоритма решения системы ОДУ, что увеличивает требуемые вычислительные ресурсы и время работы алгоритма.

### Диоды как наиболее простые нелинейные элементы электрических схем и цепей

Полупроводниковые диоды (ПД) являются важнейшими функциональными элементами современной как аналоговой, так и цифровой микроэлектроники. По своей сути ПД являются элементами с явно нелинейной ВАХ, которая суть такова, что эффективное сопротивление протеканию электрического тока в так называемом «обратном» направлении диода весьма значительно, так что «обратный» ток пренебрежимо мал. В «прямом» направлении ток, протекающий через диод, нелинейно зависит от приложенной к его электродам (выводам) разности потенциалов. Таким образом, диоды ведут себя как «клапаны», что обусловило их использование в схемах «выпрямления» переменного электрического тока, а также в цифровых устройствах на основе так называемой диодно-транзисторной логики (diode-transistor logic, DTL). В DTL в качестве функциональных элементов используются диоды, транзисторы и резисторы (омические сопротивления).

Одно время схемы и решения на основе DTL считались всего лишь историческим этапом развития цифровой микроэлектроники, так как на смену DTL пришла концепция TTL (transistor-transistor logic, транзистор-транзисторная логика), где функциональными элементами выступают преимущественно биполярные транзисторы. TTL была признана по ряду технических показателей более перспективной концепцией, однако диоды на основе переходов «полупроводник-металл» (диоды Шоттки и т.п.) проявили ряд уникальных свойств, таких как быстродействие, широкий рабочий диапазон частот (вплоть до СВЧ) и т.п., что вернуло DTL-решения в практику, в том числе и в составе больших интегральных микросхем (БИС), где изготовление большого количества диодов оказывается технологически проще, чем изготовление сравнимого количества биполярных транзисторов. Пример принципиальной схемы логического элемента «2И» на основе DTL-логики приведен на рисунке 6. Сравнение входных сигналов осуществляется с помощью диодных ключей, а усиление выходного сигнала – посредством биполярного транзистора

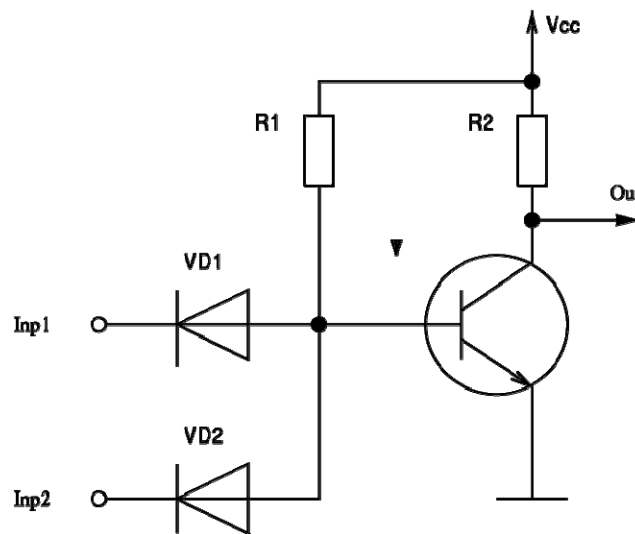


Рис. 6. Логический элемент «2И» (Inp1 V Inp2) на основе DTL-логики

Будь то использование диодов в аналоговых схемах выпрямления тока, удвоения частоты сигнала и т.п., либо в цифровых микросхемах, при анализе работы указанных устройств диоды зачастую считаются «идеальными ключами (клапанами)». Однако учет реальной ВАХ диода позволяет выявить нетипичные режимы, которые могут оказать существенное влияние на функциональность устройств и модулей с использованием диодов.

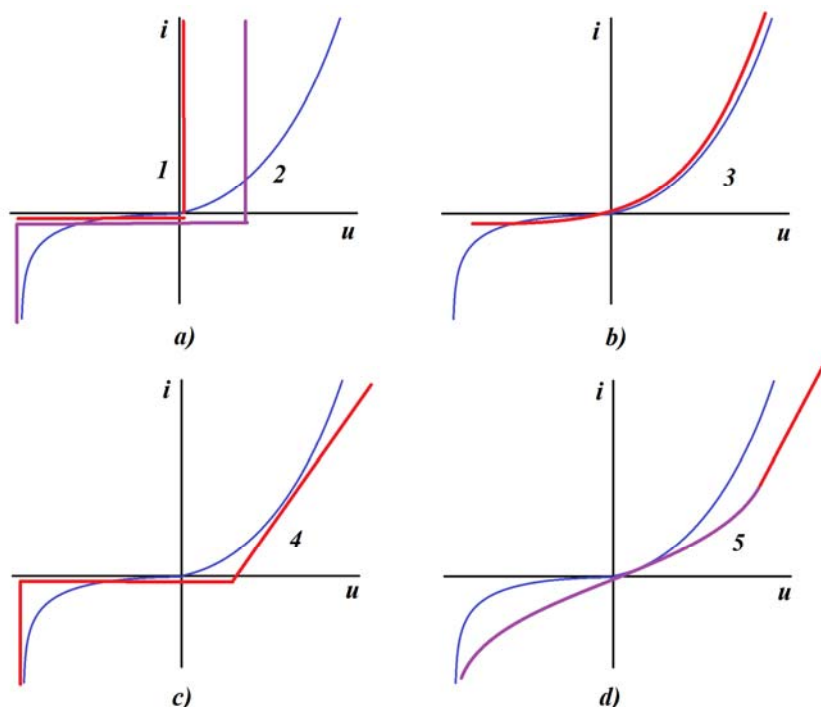


Рис. 7. Различные варианты аппроксимации ВАХ полупроводникового диода

### Выбор аппроксимации ВАХ полупроводниковых диодов

ВАХ полупроводникового диода может быть аппроксимирована различными выражениями, которые обеспечивают различную точность описания. То или иное описание может применяться в зависимости от целей и задач моделирования, проектирования и анализа электрических схем и цепей с полупроводниковыми диодами в их составе.

На рисунке 7 приведены различные варианты аппроксимаций ВАХ полупроводникового диода. Синим цветом на графиках а), б), с), d) изображена типовая ВАХ полупроводникового диода. При отрицательных значениях приложенного к диоду напряжения  $u$  изменение (обратного) тока  $i$  происходит плавно (пологий участок кривой), а значения тока остаются малыми вплоть до зоны пробоя. При положительных значениях  $u$  вначале наблюдается быстрый рост тока через диод, практически экспоненциальный с увеличением напряжения, что находится в соответствии со статистической теорией электронного газа в полупроводниках. Однако затем рост тока через диод с ростом приложенного к диоду напряжения замедляется, что связано с исчерпанием запасов слабосвязанных электронов в валентной зоне и переходом практически всех таких электронов в зону проводимости. После чего при дальнейшем увеличении приложенного напряжения диод ведет себя как омический проводник, т.е. ток через него становится практически пропорционален приложенному напряжению.

Рассмотрим аналитические выражения для аппроксимирующих ВАХ диода зависимостей.

Зависимости 1 и 2, изображенные графически на рисунке 7 а), представляют собой идеальные аппроксимации для случая «идеального диодного ключа». Для зависимости 1:

$$i = \begin{cases} 0, & u \leq 0 \\ \text{любое значение}, & u > 0 \end{cases}$$

Более реалистичной является зависимость 2, в которой рост тока через диод при положительных значениях приложенного к нему напряжения описывается путем введения порогового значения по напряжению:

$$i = \begin{cases} 0, & u \leq u_0 \\ \text{любое значение}, & u > u_0 \end{cases}$$

Такие аппроксимации как правило используются при аналитических расчетах, поскольку для каждого из участков  $u \leq u_0$  и  $u > u_0$  электрическая цепь с одним диодом будет линейной,



однако конфигурации такой линейной цепи будут различными, с учетом участков, закрытых или открытых диодным ключом. В случае нескольких диодов и более сложных конфигураций цепей указанные аппроксимации ВАХ диодов могут использоваться и в численных расчетах. При этом исходная система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) преобразуется в систему уравнений дифференциально-селекторного типа.

Зависимость 3, представленная на рисунке 7 б), основана на статистической теории электронного газа в металлах и полупроводниках

$$i = i_0 \left( e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

Здесь температурный потенциал

$$\varphi_T = \frac{T}{11600}$$

$T$  – рабочая температура диода. Величина 11600 суть температура в кельвинах, соответствующая энергии теплового движения в 1 эВ. Величина темнового (обратного) тока диода  $i_0$  является параметром конкретного диода, поскольку зависит от конфигурации  $p - n$  перехода. При больших отрицательных напряжениях, приложенных к диоду, величина тока через него стремится к  $-i_0$ .

Преимуществом аппроксимации 3 является единое для всего значений диапазона приложенных напряжений выражение, гладкое и дифференцируемое. Производная ВАХ по напряжению, которая используется как в численных, так и в аналитических расчетах:

$$\frac{di}{du} = \frac{i_0}{\varphi_T} e^{\frac{u}{\varphi_T}}$$

Величина

$$r_a(u) = \left( \frac{di}{du} \right)^{-1} = \frac{\varphi_T}{i_0} e^{-\frac{u}{\varphi_T}}$$

носит название дифференциального сопротивления полупроводникового диода.

Зависимость типа 3 имеет ряд существенных недостатков:

- не описывает рост обратного тока с ростом отрицательного приложенного напряжения, что имеет место для реальных полупроводниковых диодов;
- не описывает переход к режиму пробоя при достаточно больших отрицательных приложенных напряжениях;
- не описывает «насыщение» электронами зоны проводимости полупроводника и переход к квазиомическому режиму, о чем говорилось выше.

По указанным причинам получили распространение кусочно-сплайновые аппроксимации ВАХ реальных диодов вида 4 и 5, представленные на рисунке 7 с) и д), используются линейные и кубические сплайны.

В настоящей работе в численном моделировании электрической схемы с полупроводниковым диодом использовалась аппроксимация ВАХ диода типа 3.

### Параметрический резонанс в схеме с одним диодом

Для демонстрации рассматриваемого подхода к моделированию и анализу электрических схем и цепей с нелинейными элементами была поставлена задача обнаружения режимов с параметрическим резонансом или подобным резонансным явлением. Была рассмотрена следующая схема, представленная на рисунке 8.

Дифференциальные уравнения для расчета токов и напряжений были получены на основании правил Кирхгофа. В качестве базовых переменных были выбраны падение напряжения на диоде и ток через конденсатор  $C2$ .

Сами уравнения имеют достаточно громоздкий вид, но схематически их можно записать в следующем виде:

$$\frac{di_2}{dt} = - \frac{A(u_d, r_d(u_d), C_1, C_2, R_1, R_2, R)}{LC_2} q_2$$

$$+ \frac{B(u_d, r_d(u_d), C_1, C_2, R_1, R_2, R)}{L} i_2 + \frac{\varepsilon(t)}{L}$$

$$\frac{du_d}{dt} = F(u_d, r_d(u_d), i_2, C_1, C_2, R_1, R_2, R)$$

В приведенных выражениях функции  $A$  и  $B$  принимают положительные значения при всех значениях своих аргументов, а функция  $F$  является знакопеременной.

Были проведены численные эксперименты при различных значениях параметров схемы. В качестве внешней ЭДС использовался синусоидальный сигнал с нулевой начальной фазой. Амплитуда и частота внешней ЭДС варьировались в различных экспериментах. Также изменялись такие параметры как емкости конденсаторов  $C1$  и  $C2$ , а также величина сопротивления  $R$ . При этом значения сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  не изменялись в ходе численных экспериментов и составили величины 2 Ом и 5 Ом соответственно, значение индуктивности было выбрано 0,01 Гн.

Рабочая температура диода выбиралась на уровне 298 К (25 градусов по шкале Цельсия), а обратный ток диода принимался равным 0,015 А.

Начальные значения токов и зарядов на конденсаторах выбирались равными нулю.

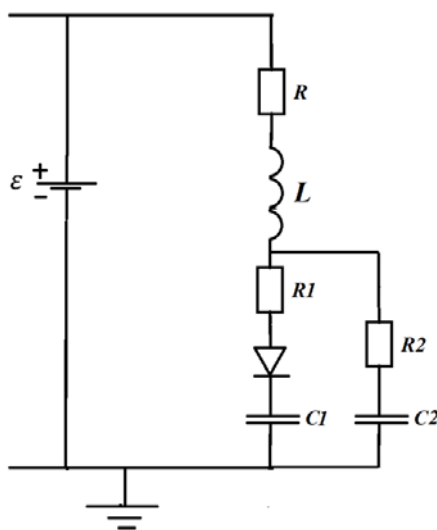


Рис. 8. Колебательный контур с одним полупроводниковым диодом

В результате численных экспериментов были выявлены два типа режимов – режимы нелинейных колебаний и режимы, которые мы условно назвали «режимами нелинейного параметрического резонанса». В свою очередь нелинейные колебательные режимы также могут быть разделены на два типа – с убывающей во времени амплитудой и с возрастающей во времени амплитудой.

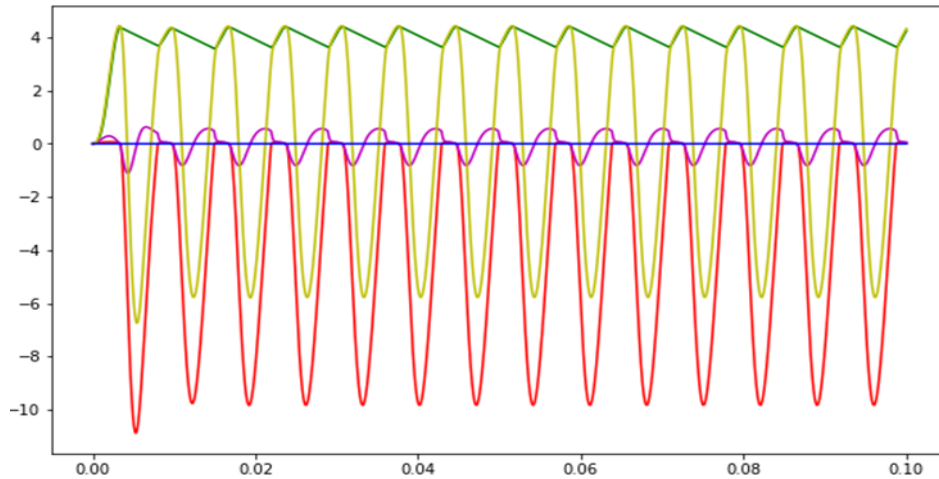
Типовой нелинейный колебательный режим с убывающей во времени амплитудой для рассматриваемой схемы при  $R = 5$  Ом, амплитуде внешней ЭДС 4,5 В и частоте внешней ЭДС 900 Гц представлен на рисунке 9. Красным цветом изображено падение напряжения на диоде, зеленым – на конденсаторе  $C1$ , желтым – на конденсаторе  $C2$ , фиолетовым – на сопротивлении  $R1$ .

Расчет проводился для интервала времени длительностью 0,1 с методом Эйлера с контролируемым шагом по времени. Средняя величина шага по времени составила  $10^{-8}$  с, погрешность, определяемая как невязка правила Кирхгофа для напряжений для контура, включающего внешнюю ЭДС, составила величину порядка  $10^{-13}$  В.

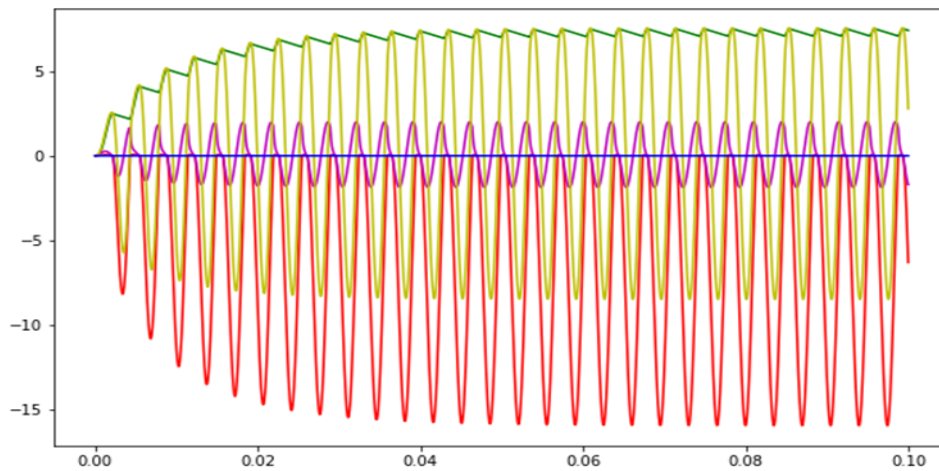
На рисунке 10 представлен нелинейный колебательный режим с возрастающей во времени ампли-

тудой при тех же значениях параметров и частоте внешней ЭДС 1800 Гц.

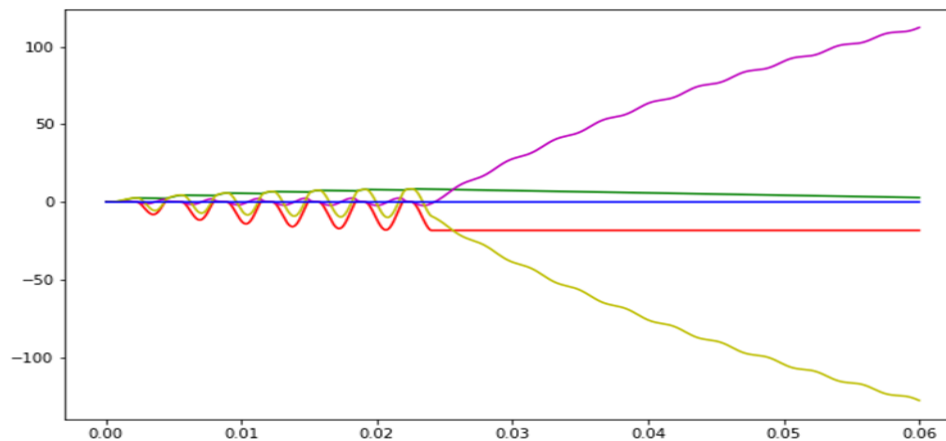
На рисунке 11 представлен режим «нелинейного параметрического резонанса» в изучаемой электрической схеме при тех же значениях параметров, амплитуде внешней ЭДС 6,5 В и частоте внешней ЭДС 1800 Гц. Видно нарастание напряжений на элементах цепи  $CI$  и  $R_1$ , однако точность вычислений (невязка) остается контролируемой и составляет величину на уровне  $10^{-13}$  В.



**Рис. 9.** Режим нелинейных колебаний с убывающей во времени амплитудой в колебательном контуре с одним диодом



**Рис. 10.** Режим нелинейных колебаний с возрастающей во времени амплитудой в колебательном контуре с одним диодом



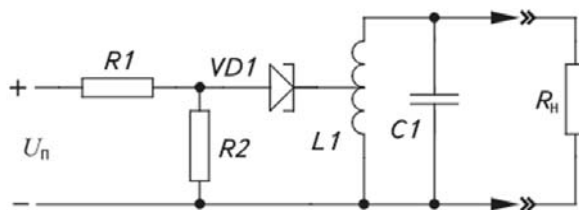
**Рис. 11.** Режим – аналог параметрического резонанса в колебательном контуре с одним диодом

Предварительный анализ показывает, что при данных значениях емкостей  $C1$  и  $C2$  и сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ , а также индуктивности  $L$  граница перехода между режимом колебаний и режимом нелинейного параметрического резонанса определяется неким уравнением двумерной поверхности в трехмерном пространстве параметров (сопротивление  $R$ , амплитуда внешней ЭДС, частота внешней ЭДС)

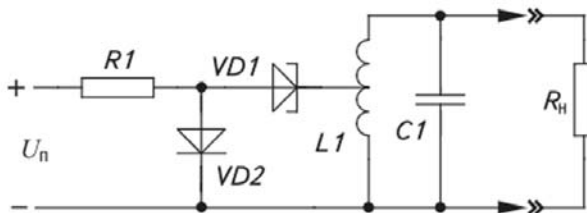
$$\Phi(R, \varepsilon, \omega) = 0$$

Дальнейшее изучение резонансных режимов в данной системе и подобных ей системах требует совместного и согласованного применения как численных, так и аналитических методов исследования и анализа нелинейных систем ОДУ и их решений.

Отметим, что традиционно режимы нелинейных колебаний и автоколебаний связывают со схемами, содержащими в своем составе туннельные диоды [15, 16]. На рисунках 12 и 13 представлены схемы автогенераторов на туннельных диодах.



**Рис. 12.** Схема автогенератора на туннельном диоде с питанием от делителя напряжения



**Рис. 13.** Схема автогенератора с обычным и туннельным диодами

Отметим, что в схеме на рисунке 14 обычный диод используется в качестве нелинейного сопротивления-шунта.

### Заключение

В настоящей работе рассмотрена реализация алгоритмического ядра САПР электрических цепей на основе библиотеки вычислительных процедур и функций на языке Python.

В качестве примера применения разрабатываемой библиотеки численно исследована модель электрической цепи с нелинейным элементом – колебательного контура с полупроводниковым диодом. Установлены как режимы нелинейных колебаний, так и режимы, аналогичные параметрическому резонансу в линейных колебательных системах. Ключевыми параметрами, определяющим переход между режимами, при прочих заданных параметрах элементов электрической цепи, являются амплитуда и частота внешней ЭДС.

Дальнейшее исследование резонансных явлений такого рода потребует согласованного применения как аналитических, так и численных методов. Также необходимо экспериментальное подтверждение существования данных резонансных режимов.

Рассматриваемые режимы могут потенциально найти применение при разработке усилителей и автогенераторов с использованием обычных полупроводниковых диодов, а также элементов микросхем на базе DDL, обладающих усилительными свойствами.

## Литература

1. PCB Design Software / Режим доступа: <https://www.altium.com>
2. OrCAD X Platform – PCB Design Software / Режим доступа: <https://www.cadence.com>
3. AWR Design Environment Platform / Режим доступа: <https://www.cadence.com>
4. CAD – программы: обзор / Режим доступа: [https://cxem.net/software/soft\\_CAD.php](https://cxem.net/software/soft_CAD.php)
5. KiCAD EDA / Режим доступа: <https://www.kicad.org>
6. PySpice 1.5 / Режим доступа: <https://pypi.org/project/PySpice/>
7. PyNEC 1.7.3.6 / Режим доступа: <https://pypi.org/project/PyNEC/>
8. Моделирование антенн на Python при помощи PyNEC / Режим доступа: <https://eas.me/python-antenna-modeling/>
9. Обзор библиотек на питоне для моделирования в сфере электроэнергетики / Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/704650/>
10. Коновальчик А.П. и др. Использование программного обеспечения с открытым исходным кодом при разработке систем автоматизированного проектирования РЛС // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». № 2, 2019. С. 92-101.
11. САПР Delta Design / Режим доступа: <https://www.eremex.ru/products/delta-design/>
12. САПР Гамма. Моделирование и цифровые двойники / Режим доступа: <https://digitaltwin.ru/products/gamma/>
13. AstraLinux для приборостроения / Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/787950/>
14. Как настроить python в Linux под свой проект / Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/700140/>
15. Андреев В.С., Попов В.И., Федотов А.Я., Фомин Н.Н. Генераторы гармонических колебаний на туннельных диодах. М.: Энергия, 1972.
16. Овчаренко В.В., Овчаренко Н.Ф. Новые схемы кварцевых генераторов на туннельных диодах с кварцем в емкостной ветви контура // Радиотехника. 1970. Т. 25. № 2.

# НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ПОДХОДЫ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ МОНИТОРИНГУ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

**Саломатина Елена Васильевна**

*ПГУ им. Т. Г. Шевченко, доцент, к.т.н., Тирасполь, Приднестровье*  
[salolew@spsu.ru](mailto:salolew@spsu.ru)

**Сарьян Вильям Карпович**

*ФГУП НИИР, академик НАН РА, профессор, дт. н., Москва, Россия*  
[saryanvk@niir.ru](mailto:saryanvk@niir.ru)

## **Аннотация**

*С ростом сложности телекоммуникационных систем (IoT и мультиоблачные архитектуры, 5G-сети) критически важной задачей становится обеспечение их стабильной и эффективной работы. В этих условиях интеллектуальный мониторинг с использованием нейросетевых алгоритмов позволяет не только обрабатывать данные в реальном времени, но и своевременно выявлять аномалии и предотвращать сбои, в конечном итоге минимизируя потери времени и ресурсов.*

## **Ключевые слова**

*Глубокое обучение, интеллектуальный мониторинг, автономные телекоммуникационные сети, нейросетевые архитектуры, LSTM, Transformer*

## **Введение**

В эпоху цифровой трансформации телекоммуникационные системы важны для функционирования практически всех аспектов жизнедеятельности общества. Стремительное развитие технологий привело к беспрецедентному усложнению ИТ-инфраструктуры и появлению новых задач в области мониторинга и управления сетевыми ресурсами.

Современные телекоммуникационные сети генерируют колоссальные объемы данных, которые необходимо обрабатывать в режиме реального времени для обеспечения бесперебойной работы серверов. По данным исследования [1], общий объем трафика всех приложений для 1,4 млрд. абонентов фиксированной сети по всему миру составляет 22 ЭБ ежедневно – или две трети всего мирового интернет-трафика. Объем данных для 6,4 млрд. абонентов мобильной связи – 11 ЭБ в день. Из этого объема наибольший вклад в 57% (или 900 МБ на пользователя в день) вносит потоковая передача по требованию, в основном благодаря приложениям социальных сетей. Ежегодное увеличение объема сетевого трафика создает дополнительную нагрузку на системы мониторинга.

Усложнение сетевой инфраструктуры требует более совершенных методов анализа и прогнозирования потенциальных проблем [2, 3].

Экономические потери от простоев и сбоев в работе телекоммуникационных систем могут достигать до миллиона долларов в час [4], что еще раз подчеркивает важность превентивного обнаружения и устранения неисправностей.

Существующие методы мониторинга телекоммуникационных систем можно разделить на несколько категорий. Традиционные подходы, основанные на пороговых значениях и простой статистике. Хотя они широко распространены, но имеют существенные ограничения: они не способны эффективно адаптироваться к динамическим изменениям в сети и часто вызывают большое число ложных срабатываний. Алгоритмы, основанные на правилах, часто полагаются на экспертов в своей области для определения правил и характеристик, и требуют постоянного обновления базы правил. Знания экспертов могут не охватывать все возможные случаи, особенно в сложных ситуациях, что может ограничить масштабируемость для сложных современных сетей. Статистические методы анализа временных рядов, такие как ARIMA и экспоненциальное сглаживание обеспечивают определенную точность прогнозирования, но плохо справляются с нелинейными зависимостями и многомерными данными.

В последние годы стали применяться более совершенные подходы, использующие методы машинного обучения. Однако и они имеют ряд ограничений. Так, методы классического машинного

обучения требуют тщательного подбора признаков и плохо масштабируются при увеличении размерности данных. Кроме того, большинство существующих решений работает в режиме пакетной обработки, что не соответствует требованиям современных телекоммуникационных систем к анализу данных в реальном времени.

Нейросетевые подходы представляют собой перспективное направление в области интеллектуального мониторинга телекоммуникационной инфраструктуры. Они способны автоматически извлекать сложные паттерны из данных, адаптироваться к изменяющимся условиям и обрабатывать многомерную информацию в режиме реального времени. Особый интерес исследователей представляют глубокие нейронные сети, в частности архитектуры на основе LSTM (Long Short-Term Memory) и трансформеров (Transformer), которые показывают высокую эффективность в задачах анализа временных рядов и обнаружения аномалий [5-9].

### Эволюция современных подходов к интеллектуальному мониторингу

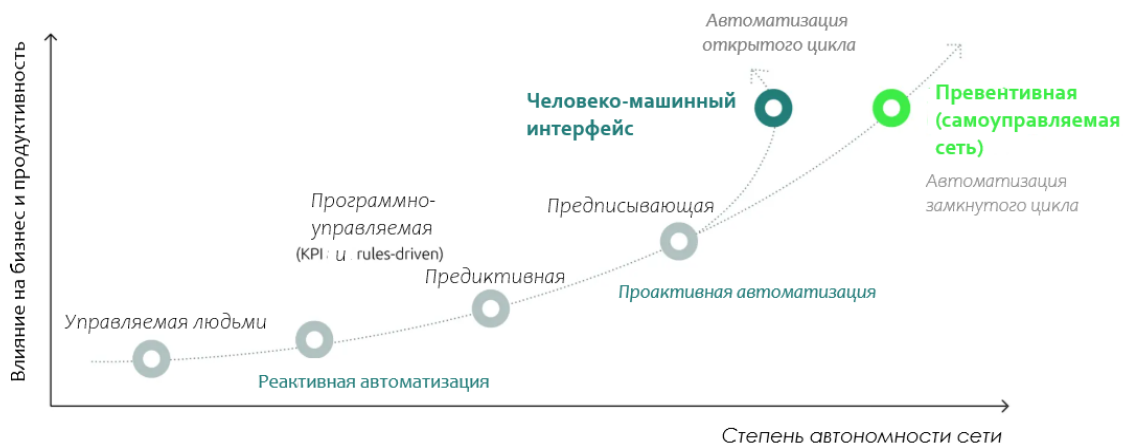
Современная телекоммуникационная инфраструктура представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных систем, каждая из которых генерирует значительные объемы разнородных данных.

Сетевое оборудование, включающее маршрутизаторы, коммутаторы и межсетевые экраны, непрерывно генерирует информацию о состоянии сетевых соединений, загрузке каналов и потенциальных угрозах безопасности. Серверная инфраструктура предоставляет данные о загрузке процессоров, использовании оперативной памяти и производительности систем хранения данных. Прикладные системы формируют логи и метрики производительности различных сервисов. При этом частота обновления различных метрик варьируется в широких пределах – от миллисекунд до минут, что создает дополнительные сложности при обработке и анализе информации.

Временные характеристики данных также имеют критическое значение для системы мониторинга. Обработка данных в реальном времени подразумевает, что задержка между получением данных и их анализом не должна превышать 100 миллисекунд. Одновременно с этим система должна сохранять способность обрабатывать данные за длительный период времени для выявления долгосрочных трендов и сезонных паттернов.

В реальных условиях телекоммуникационные данные часто содержат пропуски, шумы и аномалии, которые не связаны с проблемами в инфраструктуре. Система мониторинга должна быть устойчива к подобным искажениям и способна отличать истинные аномалии от случайных выбросов в данных.

Интеграция искусственного интеллекта (ИИ) в телекоммуникационную инфраструктуру произвела революцию в управлении сетями. Современные подходы к организации сетевой инфраструктуры основываются на концепции автономных сетей (рис. 1), предполагающей последовательное развитие от базовой автоматизации до полностью самоуправляемых систем. Автономные телекоммуникационные сети – это сети, которые в большинстве случаев могут самостоятельно настраиваться, контролировать, оптимизироваться и восстанавливаться.



Source: Capgemini Research Institute analysis.

Рис. 1. Эволюция автономных сетей

На начальных уровнях (L0-L1) системы мониторинга обеспечивают базовую автоматизацию рутинных операций, что соответствует традиционным подходам, основанным на пороговых значениях и простой статистике. Однако уже на уровне L2 (частично автономная сеть) требуется внедрение интеллектуальных компонентов для определенных устройств в определенных средах, способных к самообучению и адаптации. Здесь особую роль начинают играть нейросетевые алгоритмы, обеспечивающие возможность анализа сложных паттернов в многомерных данных.

Переход к уровням L3 и L4 характеризуется внедрением комплексных решений на основе глубоких нейронных сетей. На этих уровнях система должна не только эффективно обрабатывать текущие данные, но и прогнозировать потенциальные проблемы, что требует применения современных нейросетевых архитектур. Эти технологии позволяют анализировать долговременные зависимости в данных и выявлять сложные взаимосвязи между различными параметрами сети. Особую важность на данных уровнях приобретает способность системы работать с разнородными источниками данных.

Достижение высших уровней автономности (L4-L5) предполагает реализацию полного цикла самоуправления, включая автоматическое обнаружение и устранение проблем, оптимизацию производительности и проактивное управление ресурсами. На этих уровнях нейросетевые системы мониторинга должны обеспечивать не только анализ текущего состояния сети, но и прогнозирование ее поведения с учетом множества факторов, включая сезонные колебания нагрузки, тренды в использовании сервисов и потенциальные угрозы безопасности.

Согласно последнему исследованию исследовательского института Cargemini [10], большинство (84%) телекоммуникационных компаний имеют автономную сеть 1 или 2 уровня, и 61% телекоммуникационных компаний стремятся достичь как минимум 3 уровня автономности в течение следующих пяти лет. В настоящее время Европа лидирует по общей зрелости сетей, более половины (51%) телекоммуникационных компаний имеют 2 уровень автономности сетей, хотя в Северной Америке самая большая доля телекоммуникационных компаний находится на 3 уровне – 14%.

Можно выделить несколько причин, благодаря которым глубокое обучение стало популярным в последние годы [11]:

- Производительность: модели глубокого обучения достигают отличных показателей производительности в широком спектре задач, таких как распознавание изображений и речи.
- Технологическая доступность: развитие аппаратного обеспечения, особенно GPU, сделало обучение глубоких нейронных сетей более доступным. Современные распределенные вычислительные системы позволяют эффективно обучать крупные модели, что было невозможно еще несколько лет назад.
- Программное обеспечение с открытым исходным кодом: многие фреймворки и инструменты глубокого обучения (TensorFlow, PyTorch, Keras) имеют открытый исходный код и находятся в свободном доступе, что упрощает процесс экспериментов и инновации исследователям и разработчикам.
- Масштабируемость и работа с большими данными: эффективная обработка неструктурированных данных и способность обучаться на больших наборах данных позволяет выявлять сложные закономерности.
- Автоматизированная разработка признаков: модели глубокого обучения могут автоматически извлекать полезные признаки из необработанных данных без необходимости ручной разработки признаков. Это существенно сокращает время на предварительную обработку данных и уменьшает зависимость от экспертных знаний в предметной области.

Как показано на рисунке 2, существует несколько моделей глубокого обучения:

**Сверточные нейронные сети (CNN):** Эти сети часто применяются для задач распознавания изображений и видео. Они специально разработаны для обработки данных с сеточной структурой, таких как изображения, и особенно эффективны в обнаружении пространственных иерархий характеристик.

**Рекуррентные нейронные сети (RNN):** Эти сети используются для задач, основанных на последовательных данных, таких как языковое моделирование и машинный перевод. Они способны анализировать временные данные, например, временные ряды или фразы на естественном языке.

**Генеративно-состязательные сети (GAN):** Эти сети используются для создания синтетических данных, похожих на данные из обучающего набора. В архитектуре GAN используются две нейронные сети – генератор и дискриминатор, которые обучаются в состязательном режиме. Генератор стремится создавать синтетические данные, неотличимые от реальных, в то время как дискриминатор



пытается определить, является ли конкретный образец подлинным или синтетическим.

Автокодировщики: Эти сети применяются для снижения размерности и извлечения признаков. Они обучаются реконструировать входные данные, используя меньшее количество измерений, что позволяет им изучать компактное представление входных данных.

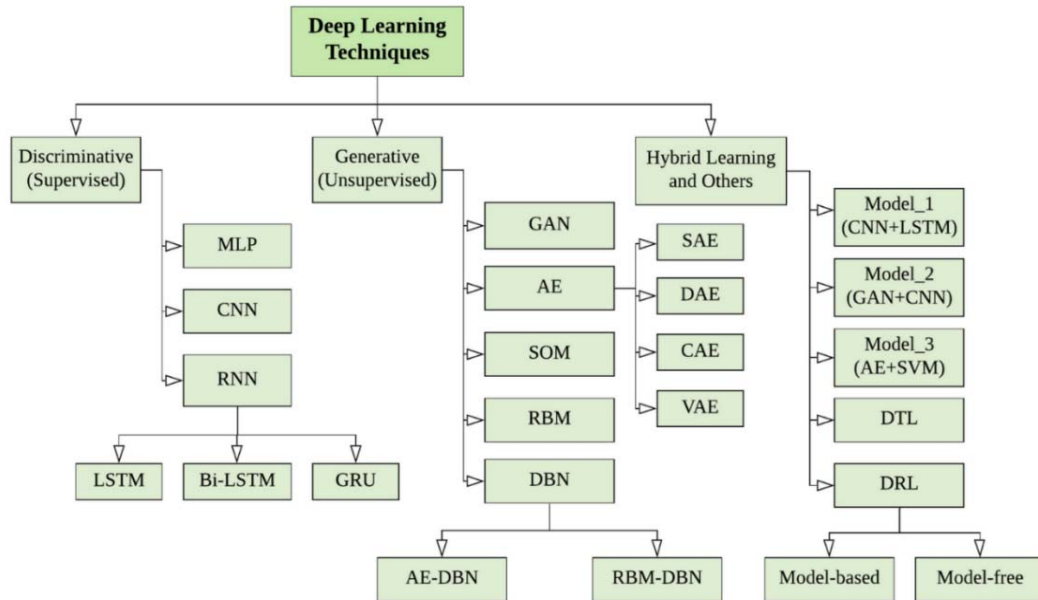


Рис. 2. Таксономия методов глубокого обучения [12]

Глубокое обучение с подкреплением (DRL). Это подраздел, который объединяет методы глубокого обучения с принципами обучения с подкреплением. Он включает в себя обучение агентов принимать решения в определённой среде путем взаимодействия с ней и получения обратной связи в виде вознаграждений или штрафов. Цель агента – научиться оптимальной стратегии поведения, то есть отображению состояний в действия, которое максимизирует суммарное вознаграждение с течением времени.

В контексте развития автономных сетей особый интерес представляют гибридные архитектуры, объединяющие преимущества различных типов нейронных сетей. Среди наиболее перспективных подходов следует выделить комбинацию сетей LSTM и архитектуры Transformer, каждая из которых обладает своими уникальными преимуществами в задачах анализа сетевого трафика и мониторинга телекоммуникационной инфраструктуры.

LSTM представляет собой архитектуру рекуррентной сети в сочетании с алгоритмом обучения на основе градиентов. Она способна обучаться, преодолевая временные интервалы, превышающие 1000 шагов, даже в случае зашумленных, несжимаемых входных последовательностей, не теряя при этом способности работать с короткими временными промежутками [13-16].

Сети LSTM способны обрабатывать длинные последовательности данных и выявлять долгосрочные зависимости при анализе временных рядов сетевых метрик. Их архитектура включает специализированные ячейки памяти и механизмы селективного запоминания информации, и позволяет отслеживать динамику изменений различных параметров сети на протяжении длительных периодов времени. Это особенно важно при выявлении постепенно развивающихся аномалий и прогнозировании потенциальных проблем в работе телекоммуникационного оборудования.

В архитектуре Transformer используются механизмы самовнимания, которые позволяют оценивать важность различных слов в последовательности, независимо от их положения. Эта способность позволяет учитывать взаимосвязи между различными параметрами сети в произвольных временных масштабах. Это особенно важно при анализе комплексных ситуаций, когда проблемы в работе сети могут быть вызваны сложным взаимодействием множества факторов. Механизм самовнимания позволяет модели автоматически определять значимость различных метрик и их взаимное влияние, что критически важно для точной диагностики состояния сети.

Тем не менее, ни один инструмент не лишен ограничений. Обучение LSTM может быть вычислительно затратным, потому что существуют высокие требования к аппаратным ресурсам. Это может препятствовать скорости обучения модели и проведения экспериментов. Что особенно заметно при обработке данных в реальном времени.

Когда набор обучающих данных мал или недостаточно разнообразен, часто необходимы методы регуляризации (Dropout или L2-регуляризация). Без применения этих методов модель может показать отличные результаты на обучающих данных, но не дать аналогичных результатов на проверочных или тестовых наборах. LSTM иногда проявляют уязвимости в ситуациях, требующих целостного понимания более широкой контекстной информации. При использовании только LSTM для прогнозирования могут возникать случаи, когда результаты предсказаний оказываются неточными.

Transformer обладает способностью оценивать релевантность различных частей входной последовательности, однако при работе с длинными последовательностями сталкивается с проблемой высокой вычислительной сложности, что может затруднять его эффективность в обработке длинных последовательностей. Если использовать Transformer отдельно для прогнозирования, могут возникнуть проблемы высокой вычислительной сложности и низкой скорости прогнозирования [17].

Объединение этих подходов в рамках единой системы мониторинга создает синергетический эффект. LSTM-компоненты обеспечивают эффективную обработку временных последовательностей и выявление долгосрочных трендов, в то время как механизмы внимания Transformer позволяют учитывать широкий контекст и сложные взаимозависимости между различными аспектами работы сети. Такая комбинация особенно эффективна при реализации высших уровней автономности (L4-L5), где требуется не только реактивное реагирование на возникающие проблемы, но и проактивное управление сетевой инфраструктурой.

### Заключение

Переход к использованию искусственного интеллекта ознаменовал смену парадигмы в телекоммуникационной отрасли. Интеграция ИИ с предметно-ориентированными знаниями и разработка гибридных подходов представляют собой ключевые тенденции в телекоммуникациях.

Внедрение нейросетевых подходов в системы мониторинга телекоммуникационной инфраструктуры требует решения вопросов выбора оптимальной архитектуры нейронных сетей, обеспечения интерпретируемости результатов, балансировки между точностью и вычислительной эффективностью, а также интеграции с существующими системами мониторинга.

На практике системы мониторинга могут перерабатывать огромные объемы данных, изучать поведение различных сетевых уровней и распознавать отклонения или аномалии, которые могут сигнализировать о неисправности, атаке или ухудшении обслуживания. Такие системы не только предоставляют оповещения в реальном времени, но и предлагают рекомендации по снижению рисков, тем самым повышая общую устойчивость сети. Более того, подходы на основе ИИ могут значительно повысить безопасность сети, прогнозируя и предотвращая несанкционированный доступ, кибератаки и нецелевое использование ресурсов. Поскольку телекоммуникационная отрасль продолжает развиваться, благодаря внедрению 5G, периферийных вычислений и устройств IoT, нейросетевые подходы будут играть все более важную роль в обеспечении безопасности, надежности и производительности телекоммуникационных систем.

### Литература

1. Sandvine's 2024 Global Internet Phenomena Report [Электронный ресурс] URL: [https://www.sandvine.com/hubfs/Sandvine\\_Redesign\\_2019/Downloads/2024/GIPR/GIPR%202024.pdf](https://www.sandvine.com/hubfs/Sandvine_Redesign_2019/Downloads/2024/GIPR/GIPR%202024.pdf) (дата обращения 26.01.2025).
2. Саломатина Е.В., Сарьян В.К. Существующие методы прогнозирования трафика с использованием машинного обучения // Технологии информационного общества: Сборник трудов XVIII Международной отраслевой научно-технической конференции, Москва, 27-28 февраля 2024 г. М.: Московский технический университет связи и информатики, 2024. С. 214-216.
3. Сарьян В.К., Русаков А.А., Назаренко А.П., Дубнов Д.В. Использование понятия "типовой процесс" в системах машинного обучения и искусственного интеллекта // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 3. С. 693-701. DOI 10.25559/SITITO.15.201903.693-701

4. ITIC 2024 Hourly Cost of Downtime Report [Электронный ресурс] <https://itic-corp.com/itic-2024-hourly-cost-of-downtime-report> (дата обращения 26.01.2025).
5. *Ефимушкин В.А.* Развитие унифицированных коммуникаций на базе технологий искусственного интеллекта и цифровых двойников // Цифровая трансформация. Связь будущего: Материалы XXVIII Международного Форума МАС' 2024, Москва, 26 апреля 2024 г. М.: Государственный университет просвещения, 2024. С. 45-52.
6. *Каширин И.Ю.* Нейросети со знаниями для анализа больших данных // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 75. С. 71-84. DOI 10.21667/1995-4565-2021-75-71-84
7. *Kurri V., Raja V., Prakasam P.* Cellular traffic prediction on blockchain-based mobile networks using LSTM model in 4G LTE network // Peer-to-Peer Networking and Applications. 2021. Т. 14. № 3. С. 1088-1105.
8. *Букин А.В., Самонов А.В., Тихонов Э.И.* Обнаружение инцидентов информационной безопасности на основе технологии нейронных сетей // Вопросы кибербезопасности. 2022. № 5(51). С. 61-73. DOI 10.21681/2311-3456-2022-5-61-73
9. *Cao K., Zhang T., Huang J.* Advanced hybrid LSTM-transformer architecture for real-time multi-task prediction in engineering systems // Scientific Reports. 2024. Т. 14. № 1. С. 4890.
10. Networks with intelligence [Электронный ресурс] URL: [https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2024/02/CRI\\_Autonomous-Network\\_Final\\_Web-version-1.pdf](https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2024/02/CRI_Autonomous-Network_Final_Web-version-1.pdf) (дата обращения 26.01.2025).
11. *Raschka S., Patterson J., Nolet C.* Machine learning in python: Main developments and technology trends in data science, machine learning, and artificial intelligence // Information. 2020. Т. 11. № 4. С. 193.
12. *Sarker I.H.* Deep learning: a comprehensive overview on techniques, taxonomy, applications and research directions // SN computer science. 2021. Т. 2. № 6. С. 420.
13. *Mienye I. D., Swart T. G., Obaido G.* Recurrent neural networks: A comprehensive review of architectures, variants, and applications // Information. 2024. Т. 15. № 9. С. 517.
14. *Li Y. et al.* A data-driven interval forecasting model for building energy prediction using attention-based LSTM and fuzzy information granulation // Sustainable Cities and Society. 2022. Т. 76. С. 103481.
15. *Крибель А.М., Лаута О.С., Филин А.В., Фень А.С.* Метод обнаружения аномалий в сетевом компьютерном трафике на основе нейронной сети с использованием LSTM // Электросвязь. 2021. № 12. С. 43-48. DOI 10.34832/ELSV.2021.25.12.006
16. *Горшенин А.К., Кузьмин В.Ю.* Анализ конфигураций LSTM-сетей для построения среднесрочных векторных прогнозов // Информатика и ее применения. 2020. Т. 14, № 1. С. 10-16. DOI 10.14357/19922264200102
17. *Islam S. et al.* A comprehensive survey on applications of transformers for deep learning tasks //Expert Systems with Applications. 2024. Т. 241. С. 122666.

## РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

**Аладин Георгий Александрович**  
МТУСИ, студент-магистр, Москва, Россия  
[a.georgiy724312@gmail.com](mailto:a.georgiy724312@gmail.com)

**Осетрова Катерина Ивановна**  
МТУСИ, студент, Москва, Россия  
[k.i.osetrova@edu.mtuci.ru](mailto:k.i.osetrova@edu.mtuci.ru)

**Микенин Алексей Эдуардович**  
МТУСИ, ст. преп. кафедры Радиооборудования и схемотехники, Москва, Россия  
[a.e.mikenin@mtuci.ru](mailto:a.e.mikenin@mtuci.ru)

**Прокурат Глеб Андреевич**  
МТУСИ, ассистент кафедры Радиооборудования и схемотехники, Москва, Россия

### **Аннотация**

*В данной статье рассматривается применение виртуального векторного анализатора цепей (ВАЦ) для анализа испытываемых радиотехнических устройств, автоматизации измерений испытываемых устройств и использование виртуального ВАЦ в учебном процессе. Производится анализ существующих решений. Разрабатывается прототип программного обеспечения виртуального ВАЦ.*

### **Ключевые слова**

*Векторный анализатор цепей, испытываемое устройство, автоматизация измерений, оптимизация учебного процесса, симулятор электронных схем*

### **Введение**

Основным методом для описания ВЧ и СВЧ цепей и устройств является матрица рассеяния именуемая S-параметрами. В отличие от большинства других матричных представлений S-параметры могут быть физически измерены с помощью специализированного оборудования. Для этих целей применяются векторные анализаторы цепей, которые используются для измерения параметров радиотехнических устройств, цепей и отдельных компонентов в радиотехнических системах общего, научного и военного назначения.

Одной из основных проблем при измерении ВЧ и СВЧ цепей является сложность и дороговизна измерительного комплекса в составе векторного анализатора цепей. Эксплуатация всего этого измерительного комплекса должна осуществляться квалифицированными инженерами имеющими опыт работы с данным оборудованием.

Другая проблема состоит в необходимости циклического тестирования, автоматизации и оптимизации методик измерения испытываемых устройств, использование единых алгоритмов измерения на всех этапах тестирования испытываемых устройств (ИУ) [2].

Применение виртуального векторного анализатора цепей (ВАЦ) позволит производить первичный анализ ИУ, а также разрабатывать и исследовать программный алгоритм для тестирования ИУ без наличия реального ВАЦ или самого испытываемого радиотехнического устройства.

Весь рабочий процесс с виртуальным ВАЦ может производиться на ЭВМ вне специализированных оборудованных помещений. Все эти преимущества позволят реализовать учебный комплекс [7-12] для получения обучающимися вузов практических знаний для работы с реальным оборудованием [1].

## Анализ существующих виртуальных ВАЦ

На рынке уже существуют коммерческие реализации виртуального ВАЦ от именитых производителей, таких как Keysight Technologies и Rohde & Schwarz. Их реализации виртуального ВАЦ охватывают существующий модельный ряд реального оборудования этих производителей. Графический интерфейс этих виртуальных ВАЦ полностью повторяют графический интерфейс реальных приборов. Основной упор в данных реализациях сделан на полной совместимости разработанных в виртуальном комплексе программных алгоритмов тестирования и автоматизации с реальным оборудованием, на котором впоследствии будут производиться фактические измерения. Такой подход связан с тем, что каждый производитель использует свою эталонную реализацию интерфейса Virtual Instrument Software Architecture (VISA) в своих ВАЦ. Полная программная совместимость виртуального ВАЦ с реальным оборудованием также позволяет проводить регрессионное тестирование уже готового программного алгоритма измерений, который реализован с использованием требуемой для данного производителя оборудования среды VISA и доступным функционалом из стандарта языка Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI).

Дополнительно в этих комплексах реализованы измерения во временной области с использованием тех же алгоритмов математических преобразований, что и в реальном оборудовании.

Необходимость в новой разработке виртуального ВАЦ обусловлено прежде всего отсутствием такой реализации для отечественного оборудования. Требование к виртуальному ВАЦ — это прежде всего единый пользовательский графический и программный интерфейсы для виртуального и реального прибора.

Также немаловажным факторами в разработке ВАЦ является несовместимость стандартов языка VISA разных производителей и ограниченная доступность зарубежного измерительного оборудования программного обеспечения, лицензионные и прочие ограничения.

## Прототип виртуального ВАЦ

Основными критериями выбора программного обеспечения для виртуального ВАЦ являлось доступность реальных измерительных комплексов ВАЦ на отечественном рынке и его доступность. Доступность реального векторного анализатора цепей существенно упрощает реализацию виртуального ВАЦ на его основе. Необходимо, чтобы виртуальная и реальная системы были предельно похожи. Это условие позволит избежать проблем с интеграцией и повысит эффективность рабочего и учебного процессов. Наличие эталонных библиотек для разработки алгоритмов автоматизации для среды VISA также является важным фактором в отдалении приоритета программному обеспечению (ПО) S2VNA. Функционал апробированного отечественного решения позволит использовать его для создания прототипа виртуального ВАЦ.

Основной упор при разработке комплекса необходимо сделать прежде всего на изучении радиотехнических устройств, а именно, на исследовании влияния цепей трансформации на испытуемые устройства (ИУ). Для этого в комплекс виртуального ВАЦ включён полноценный симулятор электронных схем и СВЧ цепей, который будет являться источником входных данных для ПО ВАЦ. Применение симулятора электронных схем обусловлено прежде всего возможностью оперативного моделирования и изменений параметров цепей согласования, наглядности влияния этих параметров на ИУ, а также сравнения результатов моделирования, произведённых в самом симуляторе и полученных в виртуальном ВАЦ после применения его встроенных алгоритмов эмуляции влияния измерительного тракта. Использование готового симулятора также избавляет от необходимости иметь в составе комплекса огромное количество собственных имитаций ИУ, позволит в будущем реализовать дополнительный функционал в виртуальном комплексе, например, имитацию процедуры калибровки виртуального ВАЦ и влияния измерительных цепей.

Упрощённая блок-схема взаимодействия ВАЦ с симулятором изображена на рисунке 1.

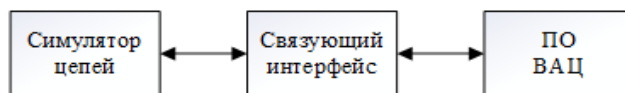


Рис. 1. Упрощённая блок-схема прототипа виртуального ВАЦ

Связующий интерфейс представляет собой интерфейс прослойку между симулятором и программным обеспечением ВАЦ и выполняет функции преобразования результатов моделирования симулятора и загрузки в ПО ВАЦ, а также управлять параметрами симуляции (мощность стимула, смещение мощности портов) из интерфейса ВАЦ.

В качестве симулятора электронных схем и СВЧ цепей используется открытый проект NGSPICE, который является расширением симулятора SPICE 3f5. Применение свободной реализации симулятора цепей позволит упростить итоговую реализацию связующего интерфейса за счёт доступности исходного кода симулятора и его возможной модификации под требуемые задачи.

Связующий интерфейс также может обеспечивать при необходимости возможность ограниченного взаимодействия с коммерческими симуляторами электронных схем. В данном варианте применения перед началом процесса симуляции происходит модификация временных файлов описывающих параметры модели, тем самым влияя на итоговый результат симуляции в автоматизированном режиме. Недостатком такого решения является зависимость от коммерческого симулятора электронных схем, который требователен к вычислительным ресурсам и имеет лицензионные и иные ограничения.

Полноценный симулятор электронных цепей позволяет производить исследование моделей устройств управляемых данными (модель устройства заданная исключительно S-параметрами), применять сложные цепи трансформации для таких моделей, изучать влияние этих цепей на эти модели [3]. Практическое применение таких моделей ограничено только узким диапазоном их работы при которых S-параметры были получены, но применение их в учебном процессе оправданно.

На рисунке 2 изображена полная блок схема работы виртуального ВАЦ.

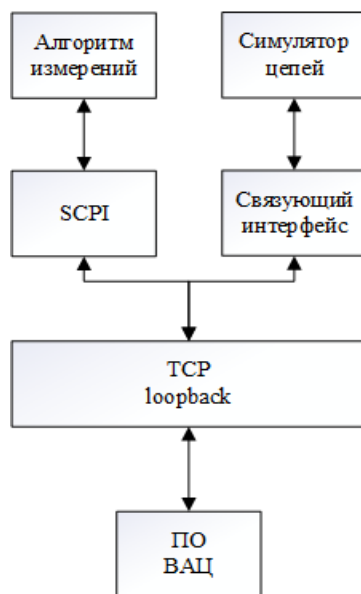


Рис. 2. Схема взаимодействия виртуального ВАЦ с симулятором

Данная блок схема является модифицированным вариантом оригинальной схемы работы интерфейса SCPI из документации на ВАЦ [2]. Из оригинальной схемы в убрано реальное устройство ВАЦ, а на его замену в прототипе добавлены блоки симулятора и связующего интерфейса. Всё взаимодействие связующего интерфейса с интерфейсом ПО ВАЦ происходит, как и в оригинальной схеме взаимодействия ВАЦ, со стандартом SCPI по протоколу TCP/IP. Такой подход позволит организовать взаимодействие с ПО ВАЦ независимо от пользовательской операционной системы, не потребует создания аппаратных комплексов, даст наладить связь между блоками SCPI и симулятором электронных схем напрямую или через ПО ВАЦ. На рисунке 3 показан пример работы связующего интерфейса, который взаимодействует с интерфейсом TCP loopback.

```
Listen 127.0.0.1:3115
Connection fd=1
[Request] Open USB Desc, device num: 0 ready!
[Request] Get hardware ID (PL Req: 6)
[Request] Get software ID (PL Req: 8)
[Request] Flow...
[Return] S-DATA
[Request] Close USB Desc, device num: 0
```

Рис. 3. Отладочные сообщения связующего интерфейса

В режиме взаимодействия с ПО ВАЦ связующий интерфейс выступает в роли сервера и ожидает поступления команд на исполнение. При опросе устройств связующий интерфейс представляется реальным устройством и передаёт данные результатов симуляции в ПО ВАЦ для дальнейшей обработки и отображения полученной информации в графическом интерфейсе (рис. 5).

В основе готовых встроенных в комплекс библиотек имитации ИУ будут использоваться открытые модели биполярных и полевых транзисторов. В качестве самих активных элементов будут использоваться открытая симметричная компактная электрическая модель полевого МДП транзистора BSIM BULK [4] и открытая модель биполярного транзистора HiCUM L0 [5]. Модель HiCUM является наиболее точной и активно исследуемой, а модель BSIM уже имеет огромное количество публикаций зарубежных и отечественных публикаций. Обе модели пригодны для исследования СВЧ цепей (до 40ГГц для BSIM, до 1ТГц для HiCUM) и работоспособны режимах малых и больших сигналов.

Для примера работы режима моделирования в ПО ВАЦ произведём симуляцию ИУ с последующим сравнение результатов самой симуляции с эмуляцией тракта ВАЦ (рис. 4 и 5).

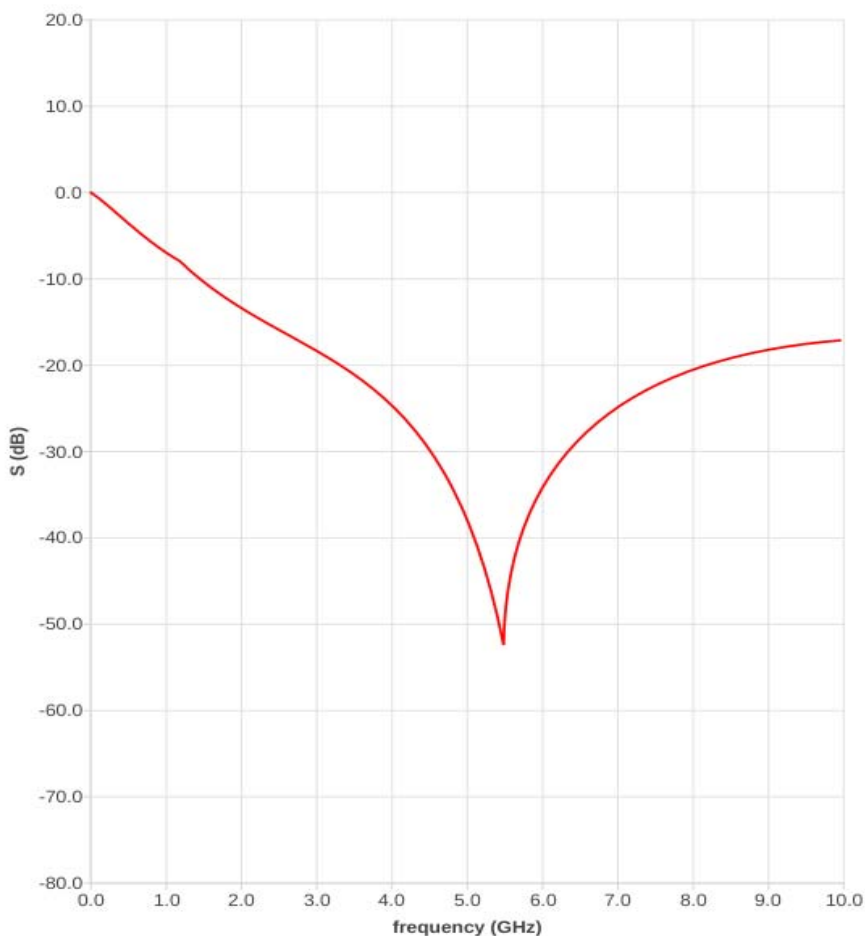


Рис. 4. График S11 полученный в симуляторе цепей

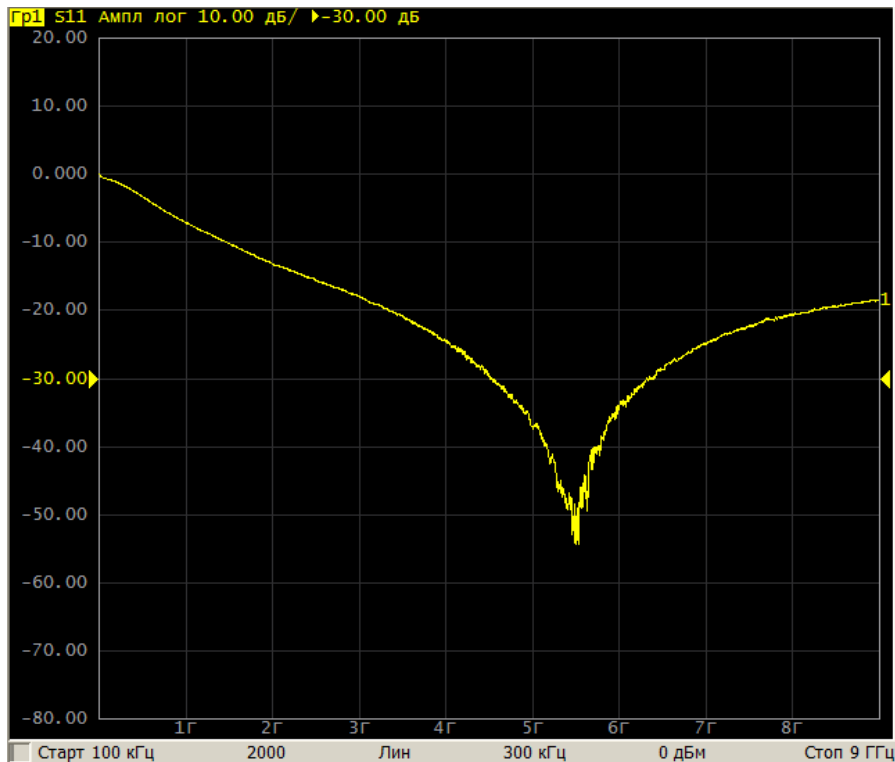


Рис. 5. Эмуляция влияния тракта на измерение S11

В отличие от простого режима отображения сигнала, режим моделирования позволяет производить манипуляции над сигналом в интерфейсе в реальном времени. Изменять параметры стимула, полосы, производить интерполяцию сигнала для сглаживания. Само ИУ (рис. 5.) представляет собой простой каскодный усилитель РЧ с общим затвором и общим истоком.

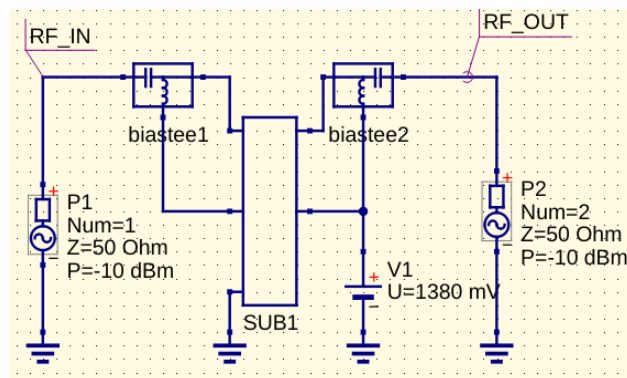


Рис. 5. ИУ с идеализированными входными/выходными цепями

Полученные результаты симуляции в автоматизированном режиме с помощью связующего интерфейса извлекаются из базы данных для портов P1/P2 в режиме симуляции S-параметров. Для этих целей может использоваться также переменная RF\_OUT в режиме симуляции по переменному напряжению. Значения, заданные пользователем в интерфейсе ПО ВАЦ, применяются для портов P1/P2 соответственно. Для симуляции процессов нереализованных во встроенном алгоритме эмуляции измерительного тракта в ПО ВАЦ также будет применён симулятор электронных схем. Данный функционал может быть реализован в виде отдельных блоков, состоящих из готовых SPICE-моделей, либо с использованием математических формул.

Итоговые параметры для моделей активных элементов BSIM, HiCUM и цепей измерительного тракта могут быть получены путём их экстракции из коммерческих симуляторов электронных схем [6].



## Заключение

Разрабатываемый комплекс виртуального ВАЦ поможет в организации учебного процесса и его оптимизации, подготовке будущих инженеров к работе с реальным оборудованием. Использование виртуальных комплексов позволит оптимизировать затраты на рабочие места для обучения на предприятиях и в высших учебных заведениях.

Виртуальный ВАЦ позволит изучить не только взаимодействию с реальным ВАЦ через графический интерфейс, но и через интерфейсы программирования. Наличие графического и программного интерфейса позволит подготовить специалистов разного профиля для работы с СВЧ оборудованием.

С использованием виртуального ВАЦ реализуется возможность производить отладку программ в среде VISA, так как встроенные отладчики в самой среде VISA зачастую недоступны и для проверки работоспособности программного алгоритма требуется его непосредственное исполнение на устройстве.

Несмотря на то, что производители ВАЦ стараются исключить возможность повреждения оборудования из строя при взаимодействии через графический интерфейс. Исполнение алгоритма измерений из программного интерфейса на реальном устройстве сопряжено с рисками повреждения ИУ или ВАЦ. Отладка программного алгоритма на имитации ИУ и в виртуальном ВАЦ позволит избежать этих проблем.

## Литература

1. *Аринин О.В., Власов В.П., Елизаров А.А.* и др. Разработка и применение компьютеризированных лабораторных практикумов на кафедре «электроника» МТУСИ // Технологии информационного общества. М.: ИД Медиа Паблшер, 2020. С. 485-486.
2. *Tröster C.* Top Ten SCPI Programming Tips for Signal Generators. Munich, Rohde & Schwarz, 2019.
3. *Hofmann J., Wollensack M., Ruefenacht J., Zeier M.* Extended S-parameters for imperfect test ports // Metrologia. 2015. Vol. 52.
4. *Yawar H.Z.* BSIM-BULK 107.2.0 MOSFET Compact Model. CA: University of California, 2024. 190 p.
5. *Schröter M.* Compact Hierarchical Bipolar Transistor Modeling with HiCUM. Danvers: World Scientific Publishing, 2010. 753 p.
6. *Аринин О.В., Аристархов Г.М., Каравашкина В.Н.* Проектирование СВЧ устройств в среде AWR DESIGN ENVIRONMENT. М.: Московский технический университет связи и информатики, 2014. 35 с.
7. *Ченакин А.В., Кочемасов В.Н., Пестряков А.В.* Состояние и перспективы развития синтезаторов частот СВЧ-диапазона // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 4. С. 132-139.
8. *Прокурат Г.А., Микенин А.Э., Пестряков А.В.* Разработка интегрированного программного комплекса генерации и анализа цифровых сигналов для лабораторного практикума по дисциплине "тестирование радиооборудования систем связи" // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2024. Т. 13. № 1. С. 60-65.
9. *Пестряков А.В., Дымкова С.С.* Синхронизация. Итоги 50-ти лет развития в СССР и России // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 11. С. 27-34.
10. *Микенин А.Э., Прокурат Г.А., Пестряков А.В.* Применение векторного анализатора спектра signalhound sm200c при разработке лабораторного практикума по дисциплине "тестирование радиооборудования систем связи" // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2023. Т. 12. № 2. С. 43-49.
11. *Дингес С.И., Пестряков А.В.* Лабораторные работы по изучению видов частотной модуляции с использованием программного комплекса "Вектор" // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2020. Т. 9. № 1. С. 8-17.
12. *Пестряков А.В., Светашов А.К.* Возможности моделирования сигналов космической связи и навигации Argos в аппаратно-программном комплексе Vector // Телекоммуникации и информационные технологии. 2020. Т. 7. № 1. С. 51-57.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АМФИБИЙНОЙ ШНЕКОРОТОРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО СУШЕ

**Малахов Дмитрий Юрьевич**

*к.т.н., научный сотрудник Лаборатории реверсивного инжиниринга ГУУ, Москва, Россия*  
[dyu\\_malakhov@guu.ru](mailto:dyu_malakhov@guu.ru)

**Васильев Андрей Владимирович**

*к.т.н., начальник управления разработки автокомпонентов и систем АО «АвтоВАЗ», Москва, Россия*  
[nami.fond@mail.ru](mailto:nami.fond@mail.ru)

**Талдыкин Дмитрий Сергеевич**

*техник Лаборатории реверсивного инжиниринга ГУУ, Москва, Россия*  
[ds\\_taldykin@guu.ru](mailto:ds_taldykin@guu.ru)

### **Аннотация**

*В статье рассмотрены некоторые особенности эксплуатации транспортных средств в условиях Крайнего Севера. Выявлены факторы, ограничивающие эксплуатационные возможности существующих транспортных средств, в том числе повышенное энергопотребление, недостаточная проходимость на границе раздела двух сред при выходе на берег с водной поверхности. Предложен и обоснован технический облик амфибийной шнекороторной платформы с улучшенной подвижностью, энергоэффективностью и проходимостью в различных условиях, включая глубокий снег, заболоченные участки и мелководье, что соответствует эксплуатации в зоне Северного Морского пути. Приведены результаты численного моделирования динамики сухопутного движения предлагаемой платформы.*

### **Ключевые слова**

*Арктика, рейдовая разгрузка, транспортировка грузов, Северный морской путь, амфибийная шнекороторная платформа, комбинированная энергоустановка, шнекороторный движитель, двухзвенное транспортное средство.*

### **Введение**

Арктический регион обладает значительным экономическим потенциалом для хозяйственной деятельности, что делает его объектом особого внимания со стороны правительств ведущих технологических стран мира, включая Российскую Федерацию. Богатые природные ресурсы, такие как нефть, газ, редкоземельные металлы и рыбохозяйственные угодья, в сочетании с уникальным геостратегическим положением региона, делают его ключевым направлением для развития мировой экономики и обеспечения энергетической безопасности. За последние 20 лет наблюдается интенсивный рост исследований в области освоения Сибири и Дальнего Востока, одним из ключевых направлений которых является системное развитие и модернизация региональной транспортной инфраструктуры. Эти усилия направлены на преодоление сложных климатических и географических условий, таких как вечная мерзлота, суровые зимы и удаленность от центральных промышленных центров, что требует внедрения инновационных инженерных решений и технологий.

В соответствии со Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 года № 145, одним из приоритетных направлений и перспектив научно-технологического развития страны является обеспечение связности всей территории Российской Федерации. Достижение этой цели предполагает создание интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, способных эффективно функционировать в экстремальных условиях Арктики и других удаленных регионов. Кроме того, стратегия подчеркивает необходимость занятия и удержания лидерских позиций в разработке международных транспортно-логистических систем, а также в освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики.

Эти приоритеты направлены на укрепление позиций России на глобальном уровне, развитие высокотехнологических отраслей и обеспечение устойчивого экономического роста через инновационные подходы к транспортной инфраструктуре и логистике. В рамках реализации этих задач особое значе-

ние приобретают исследования и разработки, направленные на создание специализированных транспортных средств, адаптированных к условиям Арктического региона, что обеспечивает основу для дальнейшего анализа и проектирования таких систем, как описанная в настоящей работе платформа.

### Описание условий эксплуатации машины

Отличительной особенностью перевозок по Северному морскому пути является разгрузка контейнеров с морских судов в специально отведенных зонах якорной стоянки. Эти зоны, оборудованные перегрузочными складскими терминалами вдоль береговой линии, выступают в качестве перевалочных пунктов, из которых товары и материалы впоследствии доставляются вглубь территории с помощью наземных транспортных систем. Важно отметить, что логистические операции носят сезонный характер, выполняются в суровых климатических условиях и ограничены коротким периодом активной морской навигации и отсутствием развитой наземной дорожной сети.

Северный морской путь характеризуется широким спектром используемых транспортных средств, включая различные амфибийные машины (рис. 1), которые используются для непосредственной доставки грузов на берег. Распределение грузов по суше, как правило, осуществляется с помощью обычных грузовых колесных автомобилей и гусеничных транспортеров. В качестве альтернативы также находят применение средства на воздушной подушке – судна (СВП) или платформы (ПВП). Эти машины обладают определенной универсальностью, но они не лишены недостатков, главным из которых является повышенное энергопотребление.

Удельная потребная мощность ПВП обычно составляет от 2,0 до 7,56 кВт/т. Для СВП это значение находится в диапазоне от 12 до 50 кВт/т. Для машин, оснащенных газотурбинными двигателями, удельная потребная мощность может достигать до 140 кВт/т. Кроме того, эксплуатационные возможности этих транспортных средств при преодолении крутых подъемов и других сложных особенностей опорной поверхности ограничены, что зачастую требует дополнительного привлечения наземных буксиров или плавучих средств-амфибий для обеспечения гарантированного выхода машин на воздушной подушке на сушу.



а)



б)



в)



г)

**Рис. 1.** Транспортные средства рейдовой разгрузки: а) самоходный плашкоут «Славянка» (проект 21100); б) комплекс «Бизон» (СВП (пр.17480) и ПВП (пр.17481)); в) буксировка ПВП по суше; г) амфибийный буксировщик АБ на базе транспортера ПТС

Учитывая вышеизложенное, разработка сравнительно экономичного специального амфибийного транспортного средства, которое могло бы самостоятельно преодолевать подъем на берег и спускаться с берега на воду, и при этом могло бы быть использовано для выполнения всего спектра операций по перевозке грузов, осуществляемых морскими судами вдоль Северного морского пути, является актуальной задачей.

### **Предлагаемый технический облик машины**

Исходя из рассмотренных условий эксплуатации одним из перспективных технических решений ходовой части таких специальных амфибийных транспортных средств является шнекороторный движитель [1]. Такой движитель обеспечивает высокую подвижность на границе двух сред – водной и наземной [2]. Предлагаемый вариант компоновки амфибийной шнекороторной платформы представлен на рисунке 2.

Платформа представляет собой двухзвенное транспортное средство, состоящее из носовой и кормовой секций, которые соединены между собой надежным тягово-сцепным устройством, обеспечивающим устойчивость и гибкость конструкции. Компоновка данного транспортного средства была разработана с использованием специализированного программного обеспечения Компас-3D, что позволило оптимизировать конструкцию, учесть все технические требования и обеспечить высокую точность проектирования.

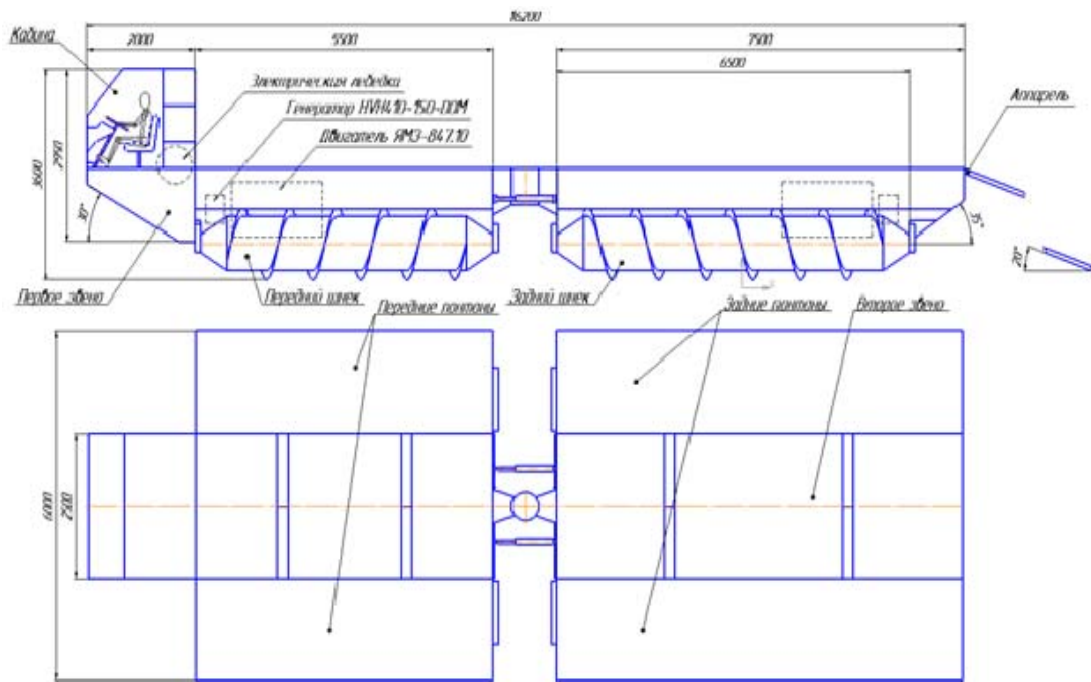
Маневренность платформы достигается за счет применения шнекороторных движителей, расположенных по левому и правому бортам. Поворот осуществляется благодаря управляемой разности скорости вращения этих движителей, что обеспечивает плавное и эффективное изменение направления движения в сложных условиях эксплуатации.

Конструкция корпуса каждого звена включает в себя несущий центральный понтон, который служит основой для распределения нагрузки, и складываемые боковые понтоны, выполненные с учетом необходимости адаптации платформы к различным задачам. Механизм складывания боковых понтонов позволяет существенно уменьшить поперечные габариты транспортного средства, что делает его совместимым со стандартами железнодорожного транспорта, такими как габаритные ограничения для перевозки по рельсам (рис. 3).

Предложенная компоновка не только повышает маневренность платформы во время выполнения полевых работ, например, в условиях пересеченной местности или ограниченного пространства, но и обеспечивает ее эффективную интеграцию в мультимодальную логистическую систему. Это позволяет использовать платформу совместно с другими видами транспорта, такими как железнодорожные составы или грузовые автомобили, что значительно расширяет ее функциональные возможности и область применения.

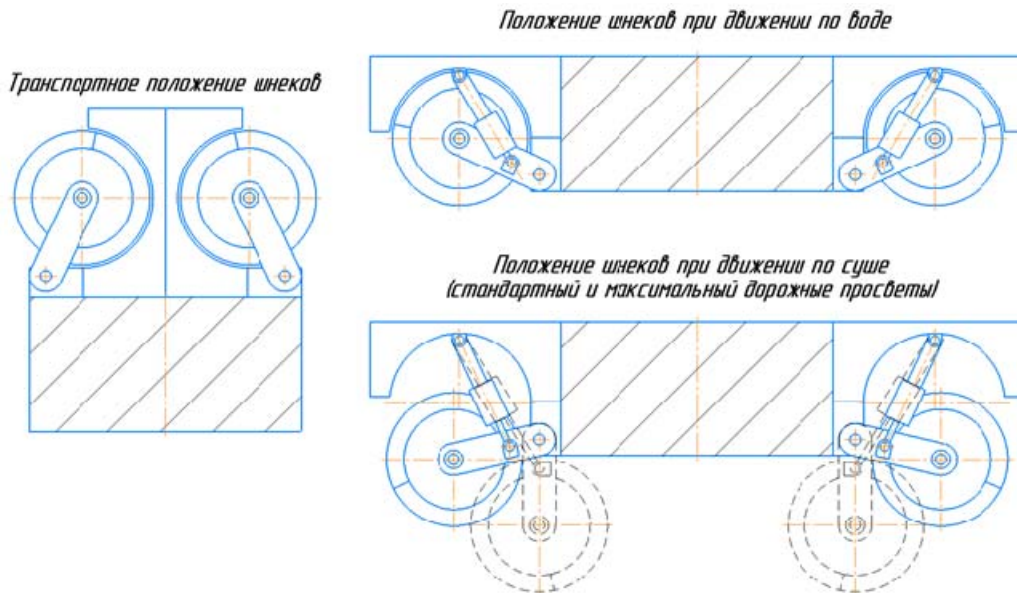
Шнекороторные движители предлагается установить на подвеску, представляющую собой шарнирную конструкцию с поперечными рычагами. Эта конструкция включает в себя рычажный узел, угловая ориентация которого регулируется сервоприводами, что позволяет изменять дорожный просвет и колею машины, и как следствие повысить проходимость машины при движении в различных условиях опорной поверхности – от утрамбованного снега до заболоченных участков. Боковые понтоны при этом остаются в неизменном положении относительно центрального понтона.

Для работы на воде используется механизм складывания движителя, обеспечивающий перемещение движителя в верхнюю секцию бортовых понтонов. Данное техническое решение позволяет уменьшить сопротивление корпуса и обеспечить защиту от возможных повреждений движителя при движении по водной поверхности, что повышает надежность морского судоходства в периоды таяния или замерзания льда [3].



**Рис. 2.** Компоновка амфибийной шнекороторной платформы

Энергетическую установку машины предлагается реализовать комбинированной электромеханической, что обеспечит требуемую экономичность и энерговооруженность машины [4]. Силовая установка состоит из двух дизельных генераторов ЯМЗ 847.10 суммарной мощностью 1176 кВт, расположенных в носовой и кормовой частях платформы. Шнекороторный движитель приводится в движение бортовыми электродвигателями, соединенными с двухступенчатой планетарной коробкой передач, которая обеспечивает два режима трансмиссии – тяговый и скоростной.



**Рис. 3.** Рабочее и транспортное положения движителя АШРП

Машина имеет расчетную снаряженную массу 20 тонн, масса полезной нагрузки при этом составляет 30 тонн. Размер грузовой платформы учитывает размеры контейнеров, соответствующих международным стандартам, что обеспечивает интеграцию с глобальными интермодальными транспорт-

ными системами, тем самым способствуя эффективной логистической деятельности в различных географических регионах.

### Результаты моделирования сухопутного движения машины

Оценка показателей динамики наземного движения проводилось посредством моделирования тягово-динамических свойств машины в различных условиях эксплуатации. Моделирование включало в себя разработку комплексной динамической модели, которая учитывала такие факторы, как параметры опорной поверхности, параметры трансмиссии, силовой установки, массу машины и аэродинамическое сопротивление [5].

На рисунках 4 и 5 показаны тягово-динамические характеристики машины при движении в различных условиях эксплуатации в двух режимах движения – тяговом и скоростном соответственно. Графики представляют собой зависимость динамического фактора от скорости машины.

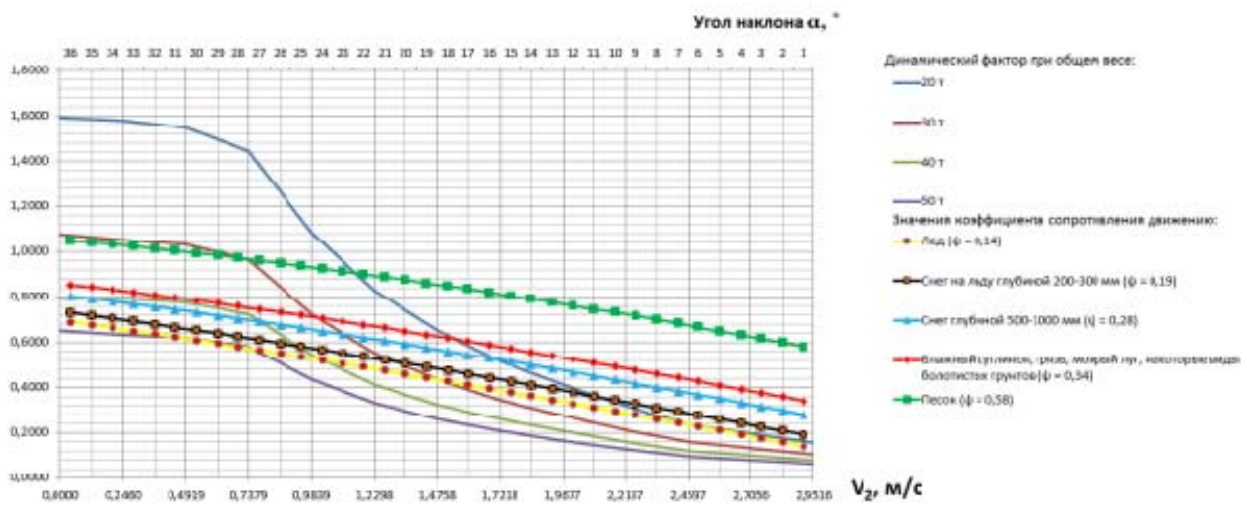


Рис. 4. Динамическая характеристика машины в тяговом режиме

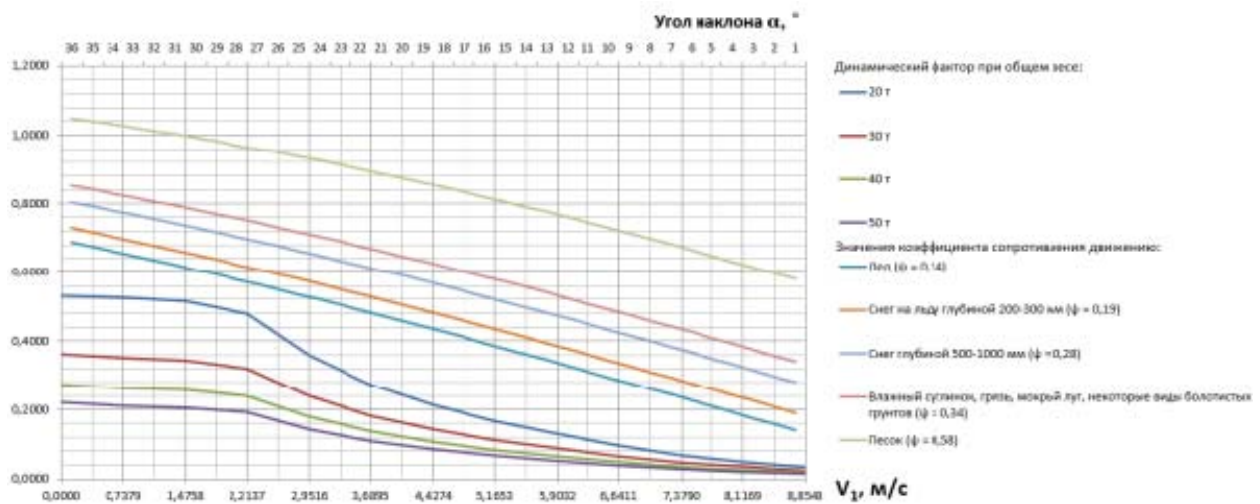


Рис. 5. Динамическая характеристика машины в скоростном режиме

Для формирования данных графиков, представленных на рисунках выше, использовалось специализированное программное обеспечение MATLAB/Simulink, которое обеспечивает высокую точность расчетов и визуализации сложных динамических процессов. Данное программное обеспечение позволило создать и анализировать модель движения машины, учитывая множество переменных, а также построить зависимости динамического фактора от скорости машины в разных режимах – тяговом и скоростном.

Применение MATLAB/Simulink обеспечило надежность и достоверность полученных данных, что позволило визуализировать результаты в виде графиков, отражающих поведение машины в реальных условиях эксплуатации.

### Выводы и заключение

Приведено описание и некоторые особенности условий эксплуатации транспортных систем в регионах Арктики, представлены некоторые особенности процесса транспортной логистики в рассматриваемом регионе.

Предложен и обоснован технический облик амфибийной шнекороторной платформы, позволяющий повысить эффективность рейдовой разгрузки в условиях Северного морского пути за счет применения данного транспортного средства в двух средах и наличия возможности интеграции в мультимодальную логистику.

По результатам моделирования выявлено, что:

- в тяговом режиме работы машина с полной массой 50 т способна передвигаться по широкому спектру опорных поверхностей. В условиях, характеризующихся глубоким снегом или болотистой местностью, машина с полной массой 50 т имеет скорость передвижения на уровне около 5 км/ч при подъеме по склонам с уклоном до 20°. Кроме того, при уменьшении полной массы до 30 тонн система способна буксировать дополнительный прицеп массой до 30 тонн со скоростью 5 км/ч, преодолеывая уклон до 17°. В случае порожнего прицепа скорость машины при аналогичных условиях эксплуатации может увеличиться примерно до 6,5 км/ч;

- в скоростном режиме платформа грузоподъемностью 30 тонн способна двигаться по опорной поверхности без уклона, представляющей собой лед и снег с максимальной скоростью до 8 км/ч. Также стоит отметить, что в условиях болотистой местности, грузоподъемность должна быть ограничена 10-ю тоннами, чтобы обеспечить достаточную тягу и мобильность. Примечательно, что когда платформа полностью разгружена и работает на второй передаче по неглубокому снегу, она способна развивать скорость, приближающуюся к 17 км/ч, тем самым демонстрируя свой потенциал для быстрого перемещения в условиях низкой нагрузки.

Дальнейшие исследования будут направлены на моделирование водоходных свойств предлагаемой амфибийной машины с целью определения наилучшего сочетания сухопутных и водоходных характеристик машины.

### Литература

1. Филиппова Н.А., Зайцев С.В., Малахов Д.Ю., Карасева С.А. Амфибийная шнекороторная платформа для рейдовой разгрузки судов // Транспортные системы и дорожная инфраструктура Крайнего Севера : Сборник материалов III всероссийского форума, Якутск, 29 марта – 01 2022 г. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2022. С. 162-170. EDN ZTVEZO
2. Малахов Д.Ю., Зайцев С.В., Карасева С.А. Амфибийная роторно-винтовая платформа для рейдовой разгрузки судов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 3(66). С. 27-34. EDN UZWWFH
3. Патент № 2674221 С1 Российская Федерация, МПК В60F 3/00. автомобиль-амфибия : № 2017145665 : заявл. 25.12.2017 : опубл. 05.12.2018 / Д. Ю. Малахов, В. В. Филатов, В. Б. Борисевич, М. Ю. Карелина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)". EDN ZECFSN
4. Карелина, М.Ю., Филатов В.В. Комбинированный привод гибридного транспортного средства // Грузовик. 2019. № 5. С. 15-18. EDN JABFEN
5. Филатов В.В. Повышение ходкости и тягово-скоростных свойств глиссирующих амфибийных машин малого класса : специальность 05.05.03 "Колесные и гусеничные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Филатов Владимир Викторович, 2019. 188 с. EDN TNPHVB