

МОЛОДОЙ

ISSN 2072-0297

# Учёный

международный научный журнал

ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

ЗЕМЛИ И КОСМОСА

FERSMANITE

$(Ca, Na)_4(Ti, Nb)_2Si_2O_{11}(F, OH)_2$

ВОЙНА  
И СТРАТЕГИЧЕСКОЕ  
СЫРЬЕ



Озиг-Басполитиз

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ФУНДА В. С. И. К.  
ПЕТЕРБУРГ  
1023

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

академик

А.Е. ФЕРСМАН

Занимательная  
МИНЕРАЛОГИЯ

*А.Е. Ферсман*

Издательство Академии наук СССР  
МОСКВА  
1959

15  
2016  
Часть I

16+

ISSN 2072-0297

# Молодой учёный

Международный научный журнал

Выходит два раза в месяц

№ 15 (119) / 2016

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Главный редактор:** Ахметов Ильдар Геннадьевич, кандидат технических наук

**Члены редакционной коллегии:**

Ахметова Мария Николаевна, доктор педагогических наук

Иванова Юлия Валентиновна, доктор философских наук

Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук

Куташов Вячеслав Анатольевич, доктор медицинских наук

Лактионов Константин Станиславович, доктор биологических наук

Сараева Надежда Михайловна, доктор психологических наук

Абдрасилов Турганбай Курманбаевич, доктор философии (PhD) по философским наукам

Авдеюк Оксана Алексеевна, кандидат технических наук

Айдаров Оразхан Турсункожаевич, кандидат географических наук

Алиева Тарана Ибрагим кызы, кандидат химических наук

Ахметова Валерия Валерьевна, кандидат медицинских наук

Брезгин Вячеслав Сергеевич, кандидат экономических наук

Данилов Олег Евгеньевич, кандидат педагогических наук

Дёмин Александр Викторович, кандидат биологических наук

Дядюн Кристина Владимировна, кандидат юридических наук

Желнова Кристина Владимировна, кандидат экономических наук

Жуйкова Тамара Павловна, кандидат педагогических наук

Жураев Хуснидин Олтинбоевич, кандидат педагогических наук

Игнатова Мария Александровна, кандидат искусствоведения

Калдыбай Кайнар Калдыбайулы, доктор философии (PhD) по философским наукам

Кенесов Асхат Алмасович, кандидат политических наук

Коварда Владимир Васильевич, кандидат физико-математических наук

Комогорцев Максим Геннадьевич, кандидат технических наук

Котляров Алексей Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук

Кузьмина Виолетта Михайловна, кандидат исторических наук, кандидат психологических наук

Кучерявенко Светлана Алексеевна, кандидат экономических наук

Лескова Екатерина Викторовна, кандидат физико-математических наук

Макеева Ирина Александровна, кандидат педагогических наук

Матвиенко Евгений Владимирович, кандидат биологических наук

Матроскина Татьяна Викторовна, кандидат экономических наук

Матусевич Марина Степановна, кандидат педагогических наук

Мусаева Ума Алиевна, кандидат технических наук

Насимов Мурат Орленбаевич, кандидат политических наук

Паридинова Ботагоз Жаппаровна, магистр философии

Прончев Геннадий Борисович, кандидат физико-математических наук

Семахин Андрей Михайлович, кандидат технических наук

Сенцов Аркадий Эдуардович, кандидат политических наук

Сенюшкин Николай Сергеевич, кандидат технических наук

Титова Елена Ивановна, кандидат педагогических наук

Ткаченко Ирина Георгиевна, кандидат филологических наук

Фозилов Садриддин Файзуллаевич, кандидат химических наук

Яхина Асия Сергеевна, кандидат технических наук

Ячинова Светлана Николаевна, кандидат педагогических наук

На обложке изображен Александр Евгеньевич Ферсман (1883–1945) — русский геохимик и минералог, один из основоположников геохимии.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

**Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-38059 от 11 ноября 2009 г.**

Журнал входит в систему РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) на платформе elibrary.ru.

Журнал включен в международный каталог периодических изданий «Ulrich's Periodicals Directory».

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

#### **Международный редакционный совет:**

Айрян Заруи Геворковна, *кандидат филологических наук, доцент (Армения)*

Арошидзе Паата Леонидович, *доктор экономических наук, ассоциированный профессор (Грузия)*

Атаев Загир Вагитович, *кандидат географических наук, профессор (Россия)*

Ахмеденов Кажмурат Максutowич, *кандидат географических наук, ассоциированный профессор (Казахстан)*

Бидова Бэла Бертовна, *доктор юридических наук, доцент (Россия)*

Борисов Вячеслав Викторович, *доктор педагогических наук, профессор (Украина)*

Велковска Гена Цветкова, *доктор экономических наук, доцент (Болгария)*

Гайич Тамара, *доктор экономических наук (Сербия)*

Данатаров Агахан, *кандидат технических наук (Туркменистан)*

Данилов Александр Максимович, *доктор технических наук, профессор (Россия)*

Демидов Алексей Александрович, *доктор медицинских наук, профессор (Россия)*

Досманбетова Зейнегуль Рамазановна, *доктор философии (PhD) по филологическим наукам (Казахстан)*

Ешиев Абдыракман Молдоалиевич, *доктор медицинских наук, доцент, зав. отделением (Кыргызстан)*

Жолдошев Сапарбай Тезекбаевич, *доктор медицинских наук, профессор (Кыргызстан)*

Игисинов Нурбек Сагинбекович, *доктор медицинских наук, профессор (Казахстан)*

Кадыров Кутлуг-Бек Бекмурадович, *кандидат педагогических наук, заместитель директора (Узбекистан)*

Кайгородов Иван Борисович, *кандидат физико-математических наук (Бразилия)*

Каленский Александр Васильевич, *доктор физико-математических наук, профессор (Россия)*

Козырева Ольга Анатольевна, *кандидат педагогических наук, доцент (Россия)*

Колпак Евгений Петрович, *доктор физико-математических наук, профессор (Россия)*

Куташов Вячеслав Анатольевич, *доктор медицинских наук, профессор (Россия)*

Лю Цзюань, *доктор филологических наук, профессор (Китай)*

Малес Людмила Владимировна, *доктор социологических наук, доцент (Украина)*

Нагервадзе Марина Алиевна, *доктор биологических наук, профессор (Грузия)*

Нурмамедли Фазиль Алигусейн оглы, *кандидат геолого-минералогических наук (Азербайджан)*

Прокопьев Николай Яковлевич, *доктор медицинских наук, профессор (Россия)*

Прокофьева Марина Анатольевна, *кандидат педагогических наук, доцент (Казахстан)*

Рахматуллин Рафаэль Юсупович, *доктор философских наук, профессор (Россия)*

Ребезов Максим Борисович, *доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Россия)*

Сорока Юлия Георгиевна, *доктор социологических наук, доцент (Украина)*

Узаков Гулом Норбоевич, *доктор технических наук, доцент (Узбекистан)*

Хоналиев Назарали Хоналиевич, *доктор экономических наук, старший научный сотрудник (Таджикистан)*

Хоссейни Амир, *доктор филологических наук (Иран)*

Шарипов Аскар Калиевич, *доктор экономических наук, доцент (Казахстан)*

**Руководитель редакционного отдела:** Кайнова Галина Анатольевна

**Ответственные редакторы:** Осянина Екатерина Игоревна, Вейса Людмила Николаевна

**Художник:** Шишков Евгений Анатольевич

**Верстка:** Бурьянов Павел Яковлевич, Голубцов Максим Владимирович, Майер Ольга Вячеславовна

Почтовый адрес редакции: 420126, г. Казань, ул. Амирхана, 10а, а/я 231.

Фактический адрес редакции: 420029, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25.

E-mail: info@moluch.ru; http://www.moluch.ru/.

Учредитель и издатель: ООО «Издательство Молодой ученый».

Тираж 500 экз. Дата выхода в свет: 1.09.2016. Цена свободная.

Материалы публикуются в авторской редакции. Все права защищены.

Отпечатано в типографии издательства «Молодой ученый», 420029, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ФИЗИКА

- Васильев Д. А., Зайнагутдинов Р. И.**  
Передающее устройство цифровой телеизмерительной системы .....1
- Емельянов А. А., Бесклеткин В. В., Авдеев А. С., Габзалилов Э. Ф., Прокопьев К. В., Ситенков А. А., Пестеров Д. И., Юнусов Т. Ш., Устинов А. П.**  
Математическое моделирование электропривода на базе гибридного шагового двигателя в пакете SimPowerSystems..... 5
- Емельянов А. А., Бесклеткин В. В., Авдеев А. С., Габзалилов Э. Ф., Прокопьев К. В., Ситенков А. А., Пестеров Д. И., Юнусов Т. Ш., Устинов А. П.**  
Математическое моделирование электропривода на базе явнополюсного синхронного двигателя в пакете SimPowerSystems ..... 10
- Емельянов А. А., Бесклеткин В. В., Авдеев А. С., Габзалилов Э. Ф., Прокопьев К. В., Ситенков А. А., Пестеров Д. И., Юнусов Т. Ш., Устинов А. П.**  
Математическое моделирование электропривода на базе вентильного реактивного двигателя в пакете SimPowerSystems .....15
- Журба А. В., Соколов А. О.**  
Исследование способов увеличения резкости рентгеновских снимков объектов технических систем .....21
- Зайнагутдинов Р. И., Васильев Д. А.**  
Картографический сервис оценки экологической ситуации в акватории Финского залива .....25
- Кокнаев А. С., Селюк Н. Н.**  
Влияние демпфера и согласующего слоя на работу электроакустического тракта в непрерывном режиме.....32
- Кокнаев А. С., Селюк Н. Н.**  
Исследование радиационных нагрузок малых космических аппаратов на солнечно-синхронных орбитах в программном пакете Omere, Srim.....36
- Колодинов В. П., Нерода А. С.**  
Исследование возможности применения рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного спектрометра БРА-135F в цементной промышленности ..... 40
- Коноплев Ю. В., Румянцев Р. С.**  
Методика создания библиотеки компонентов электрической схемы в виде базы данных в среде САПР Altium Designer.....46
- Нерода А. С., Колодинов В. П., Сегодня А. В.**  
Исследование электрофизических свойств структур Pt-TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pt, полученных методом атомно-слоевого осаждения ..... 51
- Нерода А. С., Колодинов В. П.**  
Управление технологическими процессами с помощью магнитных систем и способы их расчета в ионно-плазменных устройствах напыления материалов .....56
- Прасолов А. С., Кашеев А. А., Пасечник Д. О., Хайрутдинов Д. И.**  
Исследование полосы пропускания преобразователей различных конструкций, состоящих из двух пьезопластин ..... 60
- Прасолов А. С., Кашеев А. А., Пасечник Д. О., Хайрутдинов Д. И.**  
Исследование широкополосной ибраторной антенны..... 67
- Прасолов А. С., Кашеев А. А., Пасечник Д. О., Хайрутдинов Д. И.**  
Моделирование алгоритма работы бесплатформенной инерциальной навигационной системы для контроля состояния рельсового пути .....75

<b>Прасолов А. С., Кашеев А. А., Пасечник Д. О., Хайрутдинов Д. И.</b> Разработка блока управления для стиральной машины ..... 80	<b>Смола М. Ю., Соколов А. О.</b> Исследование генерации второй гармоники твердотельного лазера с полупроводниковой накачкой..... 104
<b>Прасолов А. С., Кашеев А. А., Пасечник Д. О., Хайрутдинов Д. И.</b> Физические основы работы и характеристики бесконтактных электромагнитно-акустических преобразователей .....84	<b>Соколов А. О., Журба А. В.</b> Коммутатор кода для стенда автоматизированной настройки дискриминатора атомного на рубидиевой газовой ячейке..... 107
<b>Румянцев Р. С., Коноплев Ю. В., Чиркунова А. А.</b> Повышение контраста малоконтрастных изображений объектов, находящихся в воздушной среде ..... 91	<b>Соколов А. О., Смола М. Ю.</b> Преимущества рубидиевых стандартов частоты ..... 110
<b>Рыков Е. А.</b> Излучение атома и плазмы .....95	<b>Соколов А. О.</b> Получение высокостабильной частоты в рубидиевых стандартах частоты ..... 113
<b>Рыков Е. А.</b> Определение параметров плазмы по сравнительному анализу реальных и промоделированных спектров излучения ..... 97	<b>Хромова И. В.</b> Модель гравитационного поля планеты в системе гравитирующих стержней ..... 116
<b>Селюк Н. Н., Кокнаев А. С.</b> Влияние длительности возбуждающего сигнала на форму акустического импульса на выходе пьезоизлучателя ..... 100	<b>Чуменко Е. А., Шурыгин И. О.</b> Исследование возможности применения ориентированных массивов углеродных нанотрубок в газоаналитических системах .... 118
	<b>Шурыгин И. О., Чуменко Е. А.</b> Анализ радиационной стойкости космических аппаратов связи при проектировании ..... 123



## ФИЗИКА

### Передающее устройство цифровой телеизмерительной системы

Васильев Дмитрий Анатольевич, студент;  
 Зайнагутдинов Руслан Илюсович, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе рассматривается структурная схема передающего устройства, производится подробное описание её отдельных узлов и принцип их действия. Также представляются основные теоретические сведения о телеизмерительных системах и о цифровых телеизмерительных системах в частности.*

**Ключевые слова:** измерительный коммутатор, дешифратор, счетчик, параллельный код, последовательный код

В различных областях науки и техники возникает необходимость осуществлять измерения на объектах, находящихся на значительном расстоянии от средств представления или последующей обработки информации (например, с помощью ЭВМ). Такая необходимость возникает при измерениях параметров движущихся объектов, объектов, рассредоточенных по площади (большие промышленные предприятия, газо- и нефтепроводы), а также при измерениях параметров объектов, непосредственное нахождение человека около которых является невозможным (например, объекты атомной энергетики).

#### Обзор цифровых телеизмерительных систем

В цифровых ТИС, называемых ещё кодоимпульсными системами, значение измеряемой величины передаётся по

линии связи кодовой комбинацией в виде комбинации импульсов.

Наиболее часто применяется двоичный код, который на принимающей стороне преобразуется в десятичный код, более удобный для цифрового воспроизведения измеряемой величины. Помехи в линии связи могут привести к искажению кода, а, следовательно, и к погрешности измерения. Для повышения помехозащищённости ТИС применяют специальные коды — коды с обнаружением и исправлением ошибок, вызванных помехами. Принцип построения таких кодов базируется на создании избыточности кодовых комбинаций, и из всех возможных кодовых комбинаций выбирается та часть, которая подчиняется определённому закону. Остальные комбинации считаются запрещёнными. Это позволяет исключать некоторые кодовые комбинации, подвергшиеся действию

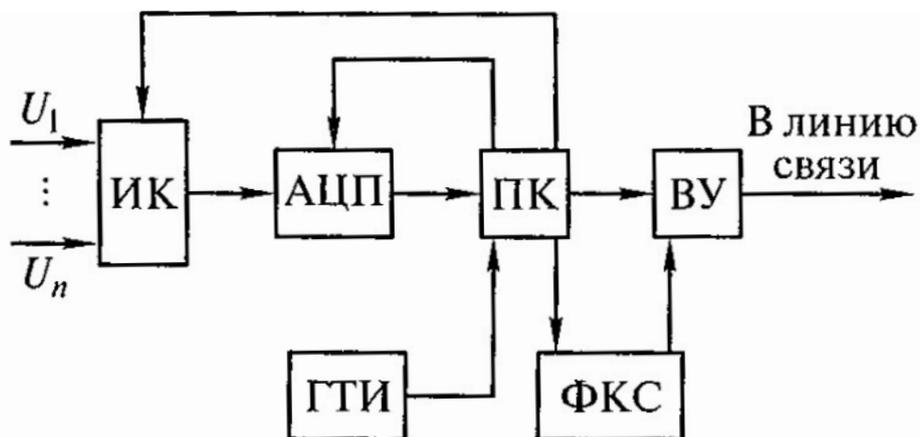


Рис. 1. Структурная схема передающего устройства цифровой ТИС и регистраторы

помех. При таком построении кодов может быть выявлена лишь часть ошибок, так как не исключена возможность перехода под действием помех одной комбинации в другую разрешенную комбинацию.

На Рис. 1 приведена одна из возможных структурных схем передающего устройства цифровой ТИС. «Унифицированные сигналы, например, напряжения, от измерительных преобразователей (на схеме не показаны) поступают на входы измерительного коммутатора ИК, поочередно подключающего эти сигналы к аналогово-цифровому преобразователю АЦП. Параллельный код с выхода АЦП подается на преобразователь ППК параллельного кода в последовательный, который управляет также формированием контрольных символов ФКС для образования помехозащищенного кода и переводит ИК в следующее положение, а также формирует так называемую синхросерию — код, используемый для цикловой синхронизации приемника. Частота опроса измеряемых величин задается генератором тактовых импульсов ГТИ. Последовательный код от ППК и ФКС через выходное устройства ВУ поступает в линию связи.

**Структурная схема передающего устройства, и описание её отдельных узлов**

Окончательно примем за рассматриваемую схему передающего устройства схему на Рис. 2.

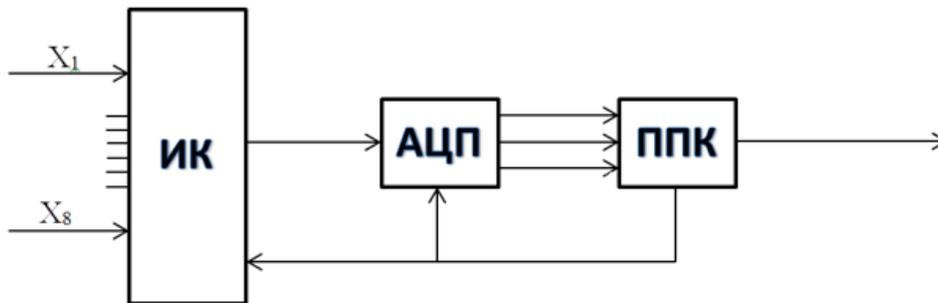


Рис. 2. Структурная схема передающего устройства цифровой ТИС: ИК — измерительный коммутатор; АЦП — Аналого-цифровой преобразователь; ППК — Преобразователь параллельного кода в последовательный; X1-X8 — Датчики



Рис. 3. Функциональная схема измерительного коммутатора

Каждый элемент представляет собой сложную микросхему, имеющую свои определённые параметры, которые, взаимодействуя друг с другом, создают замкнутую систему. Далее подробно рассмотрим каждый элемент и его устройство.

Функциональная схема ИК состоит из двух элементов — набора ключей, по которым проходит сигнал. Их число равно числу измерительных каналов, и распределителя.

Распределитель, в свою очередь, поочередно замыкает ключи, образуя прямую цепь только для одного из каналов.

Функциональная схема этого элемента образуется из дешифратора и счетчика и представлена в Приложении № 1.

Дешифратор представляет собой набор из восьми блоков, выполняющих логическую операцию «И». На выходе каждого из них, может быть лишь одно значение: «0» или «1». Нулю соответствует очень низкое напряжение, а единице — достаточное, чтобы замкнуть ключ. При том, если на выходе одного из блоков «1», то на всех остальных будет «0». На вход этих блоков будет приходиться сигнал от каждого из триггеров, каждый из которых на выходе может иметь только два значения:  $x$  и  $\bar{x}$  (не икс). В нашем случае будет достаточно трех триггеров исходя из числа измерительных каналов.

Пусть выходные значения триггеров будут  $x$  и  $\bar{x}$ , а выходные значения блоков дешифратора —  $y$ , тогда значения  $y$  будут принимать следующий вид:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= x_1 x_2 x_3 \\
 y_2 &= \bar{x}_1 x_2 x_3 \\
 y_3 &= x_1 \bar{x}_2 x_3 \\
 y_4 &= \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \\
 y_5 &= x_1 x_2 \bar{x}_3 \\
 y_6 &= \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \\
 y_7 &= x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \\
 y_8 &= \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3
 \end{aligned}$$

После измерительного коммутатора, выбранный сигнал поступает на АЦП.

Аналого-цифровой преобразователь служит для преобразования аналогового сигнала, поступающего с мультиплексора в код. При выборе АЦП в первую очередь следовало обратить внимание на требуемую разрядность, которая обеспечивала бы соблюдение условия погрешности в точке отсчета равной не более 0,5%. Для обеспечения заданной погрешности, используется 8-ми разрядный АЦП.

$$\delta = \frac{100}{2^m} = 0,39\%$$

где  $m$  — число разрядов.

Мы видим, что 8-ми разрядный АЦП позволяет оставаться в пределах погрешности менее 0,5%

Диапазон входного напряжения АЦП выбирается равным диапазону изменения входных сигналов 0–10В. Данный диапазон наиболее широко используется в современной технике, и обеспечивает наиболее стабильную работу преобразователя АЦП.

Далее, код передается на блок ППК, где параллельный код преобразуется в последовательный посредством подачи разрядов с АЦП на множество элементов «И». На второй вход подаются сигналы с распределителя импульсов, представляющего собой дешифратор, переводящий в позиционный код адрес, поступающий со счетчика. В отличие от измерительного коммутатора, счетчик в ППК управляется генератором тактовых импульсов.

Распределитель в блоке ППК имеет дополнительные выходы, не имеющие продолжения, они необходимы для того, чтобы между сигналами появлялась пауза. Чтобы закончить преобразование, последний выход с распределителя будет направлен на ждущий мультивибратор, чтобы завершить текущее преобразование. Один из возможных способов реализации блока ППК представлен на Рис. 4.

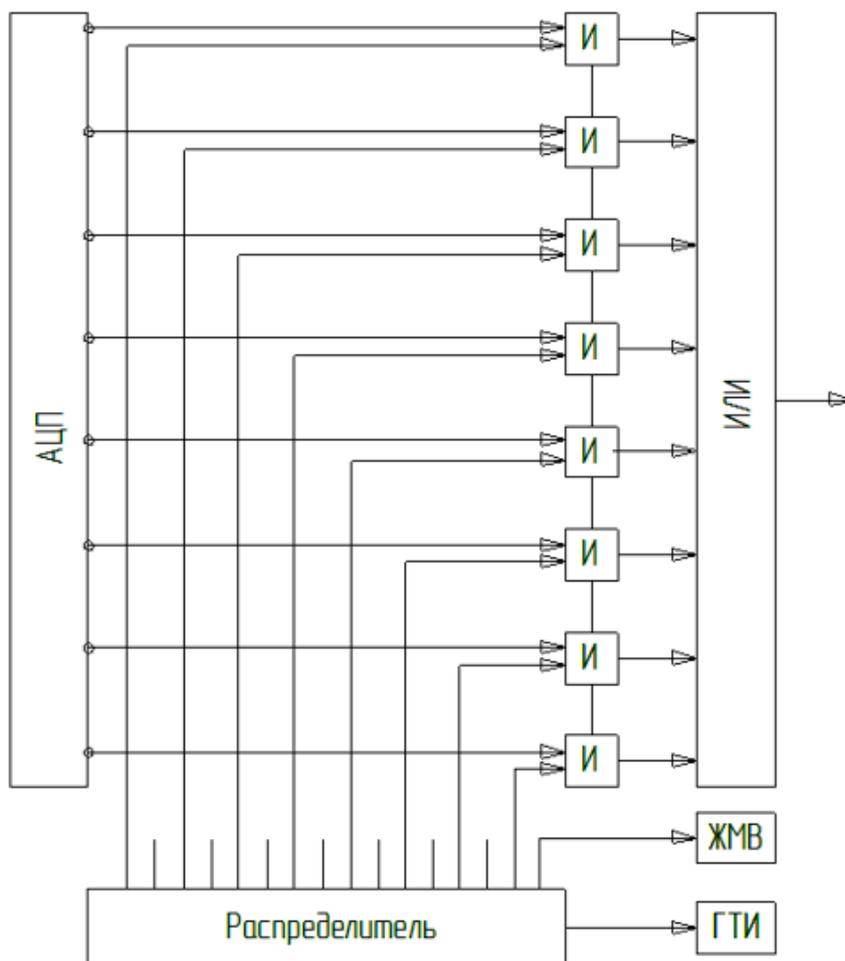
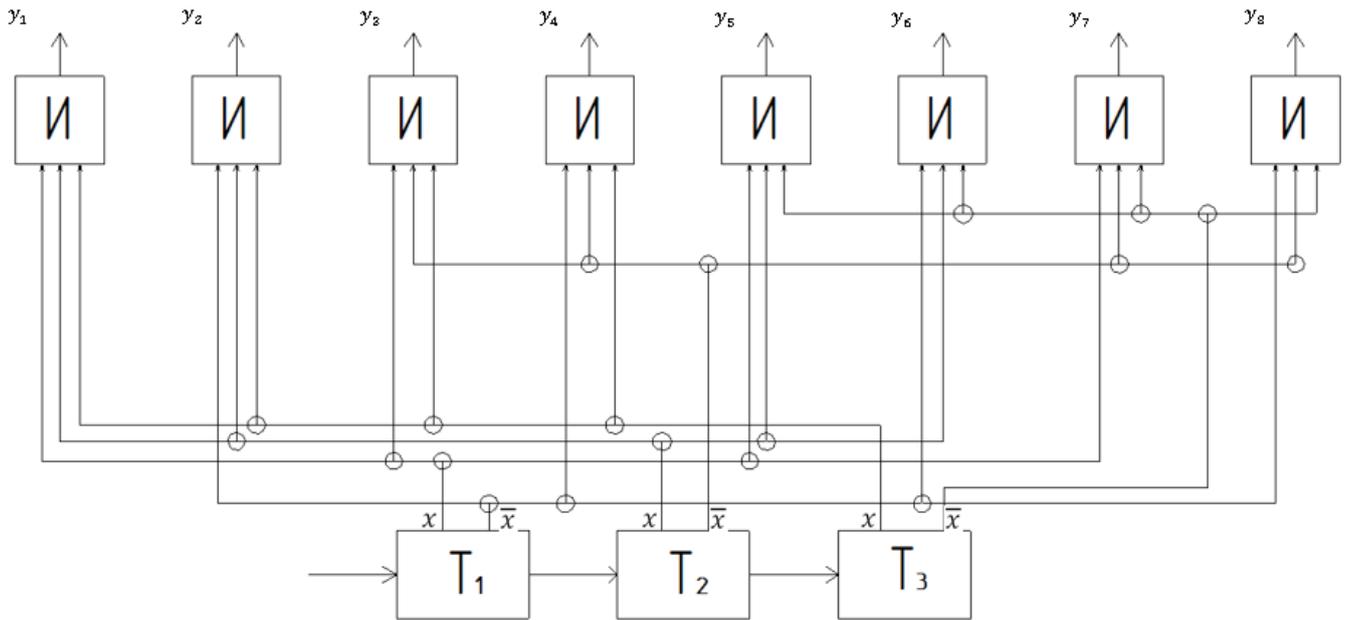


Рис. 4. Блок ППК со ждущим мультивибратором



Приложение №1

Генератор тактовых импульсов (ГТИ) предназначен для синхронизации и получения необходимой частоты, определяя режим работы ППК и длительность импульсов и интервалов в канале связи, в зависимости от полосы пропускания канала связи.

Рассчитаем частоту генерации на основе ширины полосы частот:

$$t_{\min} \geq 1,25 \frac{1}{\Delta f} \geq 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

$$T = 2t_{\min} = 2,5 \cdot 10^{-4} = 0,25 \text{ мс}$$

$$F = \frac{1}{T} = 4000 = 4 \text{ кГц}$$

#### Заключение

В работе рассмотрена обобщенная схема передающего устройства цифровой телеизмерительной системы, были исследованы цифровые телеизмерительные системы. Также, была подробно изучена структурная схема передающего устройства и рассчитаны его основные параметры.

#### Литература:

1. Авдеев, Б. Я., Антонюк Е. М., Душин Е. М. и др. Основы метрологии и электрические измерения. Учебник для вузов. Энергоатомиздат, 6-е изд. 1987. — 480 с.
2. Авдеев, Б. Я., Алексеев В. В., Антонюк Е. М. и др. Метрология, стандартизация и сертификация. Издательский центр «Академия» 2007. — 384 с.
3. Е. М. Антонюк, Е. И. Семенов. Измерительные информационные системы: Методические указания к курсовому проектированию. Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. 24 с.
4. Фремке, А. В., Телеизмерения. 1968 г., 262 с.

## Математическое моделирование электропривода на базе гибридного шагового двигателя в пакете SimPowerSystems

Емельянов Александр Александрович, доцент;  
Бесклеткин Виктор Викторович, ассистент;  
Авдеев Александр Сергеевич, студент;  
Габзалилов Эльвир Фиргатович, студент;  
Прокопьев Константин Васильевич, студент;  
Ситенков Александр Александрович, студент;  
Пестеров Дмитрий Ильич, студент;  
Юнусов Тимур Шамильевич, студент;  
Устинов Артем Павлович, студент

Российский государственный профессионально-педагогический университет

Целью данной работы является овладение технологией сборки модели электропривода на базе гибридного шагового двигателя в пакете SimPowerSystems для использования в лабораторной работе по дисциплине «Математическое моделирование в электромеханических устройствах» [1], [2], [3], [4], [5].

На рис. 1 показана схема электропривода на базе гибридного шагового двигателя.

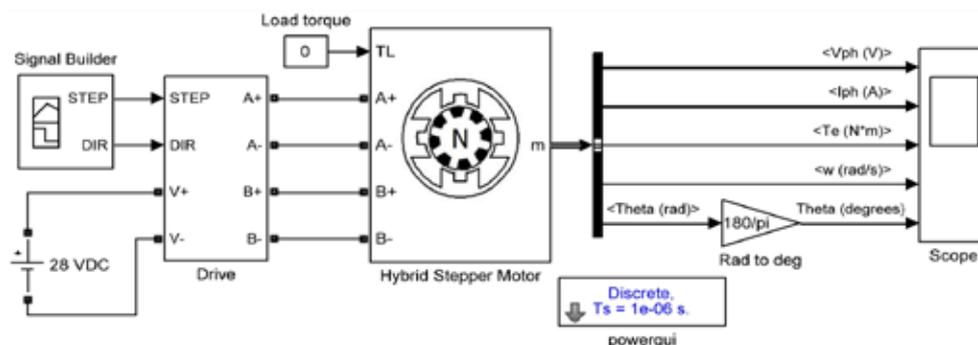


Рис. 1. Электропривод на базе гибридного шагового двигателя

Шаговый двигатель управляется сигналами STEP и DIR, поступающими из блока Signal Builder (рис. 2). Сигнал STEP регулирует угловые перемещения шагового двигателя: при единичном сигнале происходит ступенчатый сдвиг (шаг) поворота ротора, при нулевом — остановка. Сигнал DIR регулирует направление перемещения ротора: 1 — прямое, 0 — обратное.

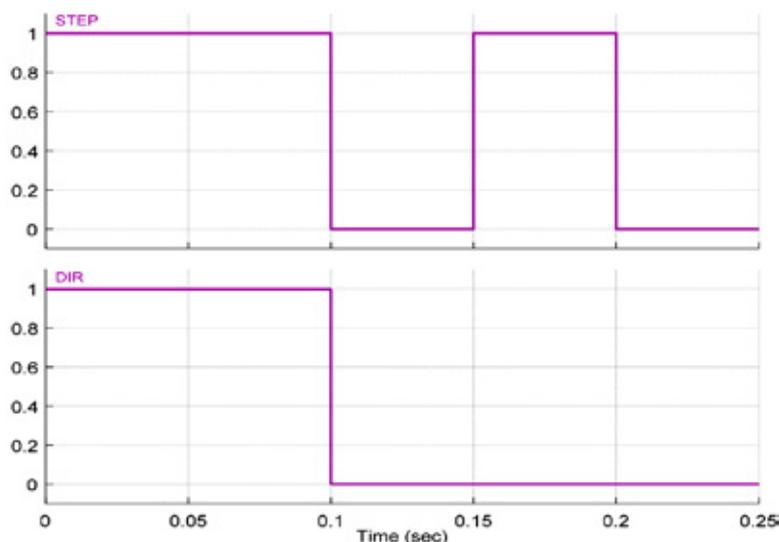


Рис. 2. Задание сигналов STEP и DIR в Signal Builder

Блок шагового двигателя (Stepper Motor) необходимо перенести из библиотеки SimPowerSystems (раздел Specialized Technology/Fundamental Blocks/Machines) на рабочее поле модели, в блоке выбрать тип двигателя — гибридный (Hybrid), число фаз — 2 и задать остальные параметры, указанные на рис. 3.

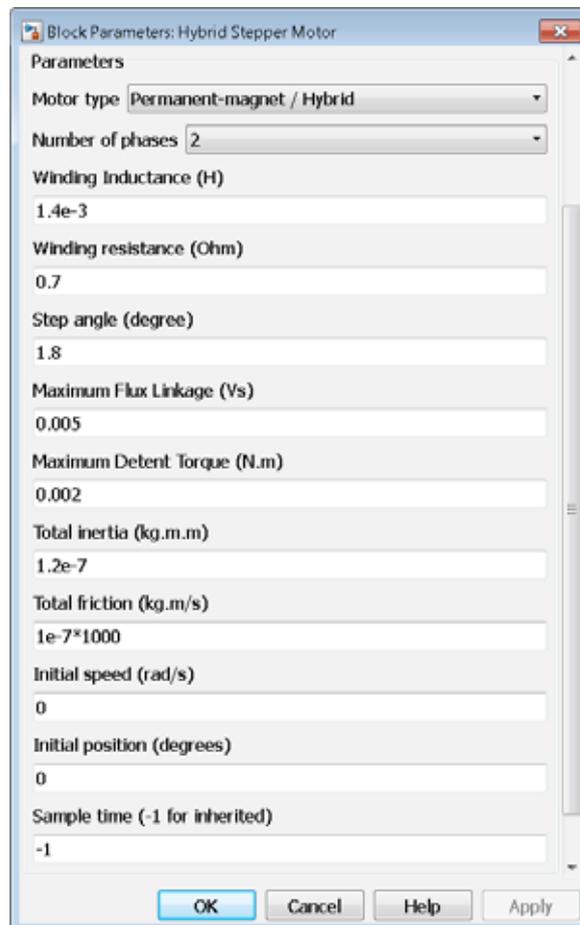


Рис. 3. Окно параметров гибридного шагового двигателя (Hybrid Stepper Motor)

Блок Drive представлен на рис. 4.

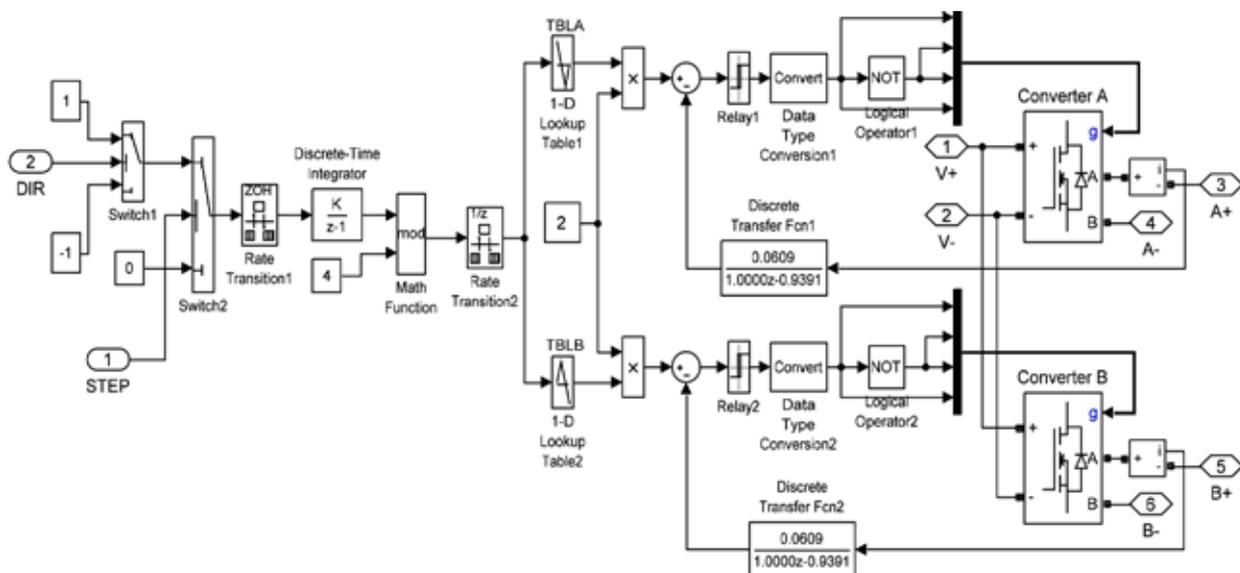


Рис. 4. Блок Drive

В параметрах переключателей Switch1 и Switch<sup>2</sup> необходимо установить значение Threshold: 0.5. В блоке Math Function выбрать функцию mod. В блоках Logical Operator установить оператор NOT.

В блоке Discrete-time integrator задать:

- Integrator method: Accumulation Forward Euler;
- Initial condition setting: Output;
- Sample time: round (1/500/Ts) \*Ts.

В свойствах константы со значением 4, подводимой к блоку Math Function, также должен быть установлен параметр Sample time: round (1/500/Ts) \*Ts.

Параметры элементов TBLA и TBLB (блоки 1-D Lookup Table 1 и 2) представлены на рис. 5.

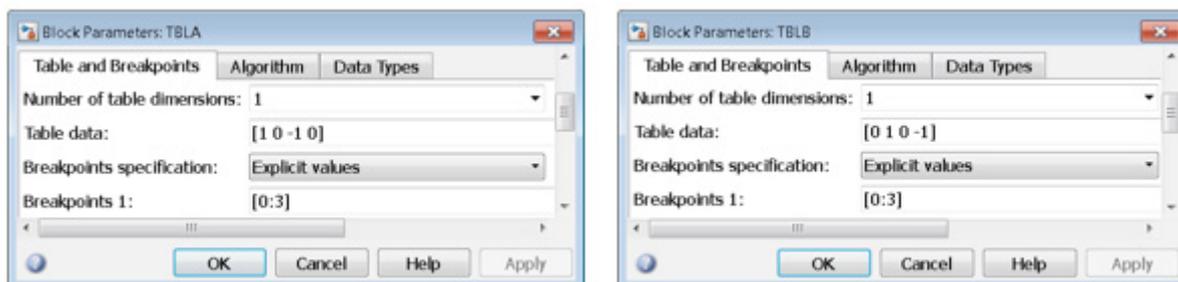


Рис. 5. Параметры блоков TBLA и TBLB

Параметры блоков Relay:

- switch on point: 0.01;
- switch off point: — 0.01;
- output when on: 1;
- output when off: 0;
- input processing: Inherited.

В свойствах блоков Discrete Transfer Fcn необходимо задать:

- Числитель (Numerator): [0, 0.0609];
- Знаменатель (Denominator): [1.0000, — 0.9391].

Converter A и Converter B представлены блоками Universal Bridge, их параметры даны на рис. 6.

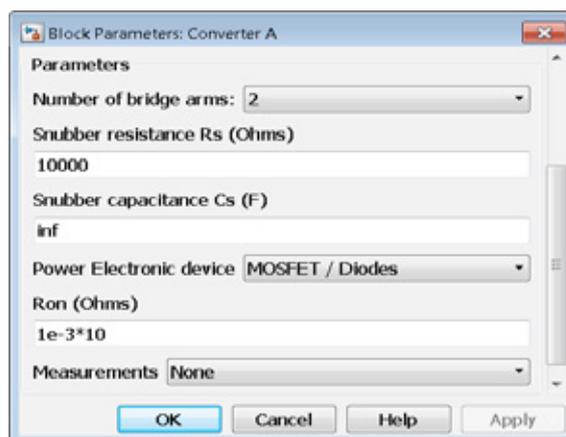


Рис. 6. Параметры блоков Converter A и Converter B

Для работы модели в SimPowerSystems необходимо добавить блок Powergui, в котором необходимо установить следующие параметры:

- Simulation type: Discrete;
- Solver type: Tustin/Backward Euler (TBE);
- Sample time: Ts.

Результаты математического моделирования шагового двигателя в SimPowerSystems приведены на рис. 7, 8, 9 и 10.

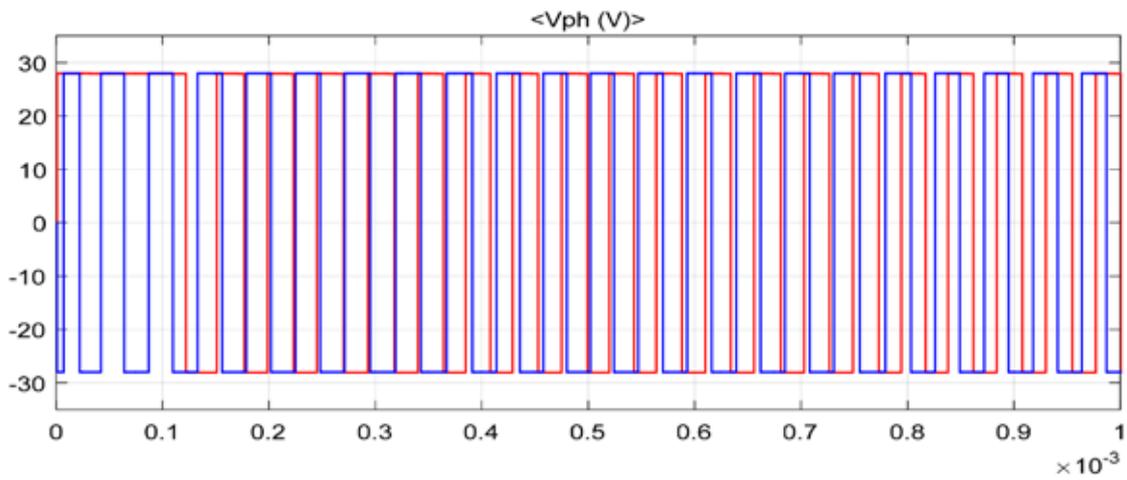


Рис. 7. Напряжения на двух обмотках шагового двигателя

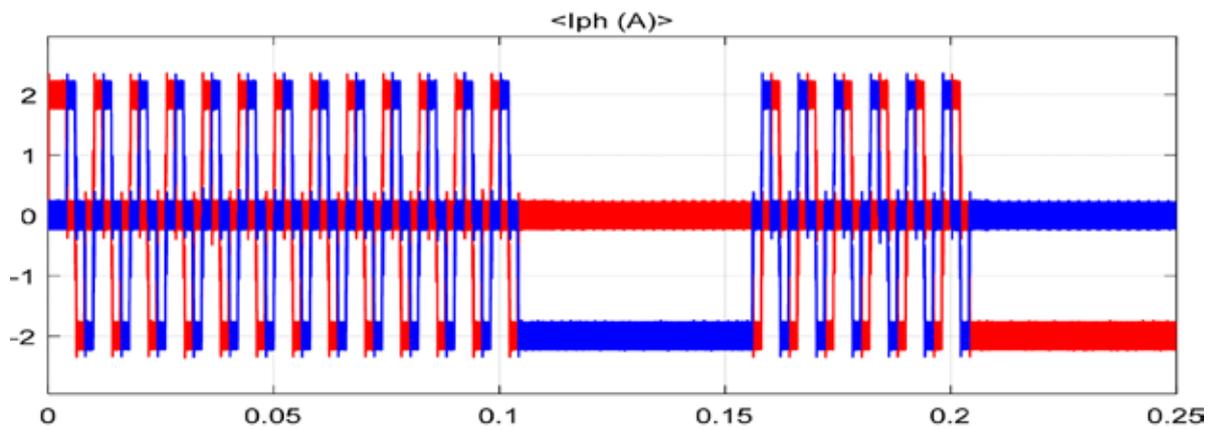


Рис. 8. Токи на двух обмотках шагового двигателя

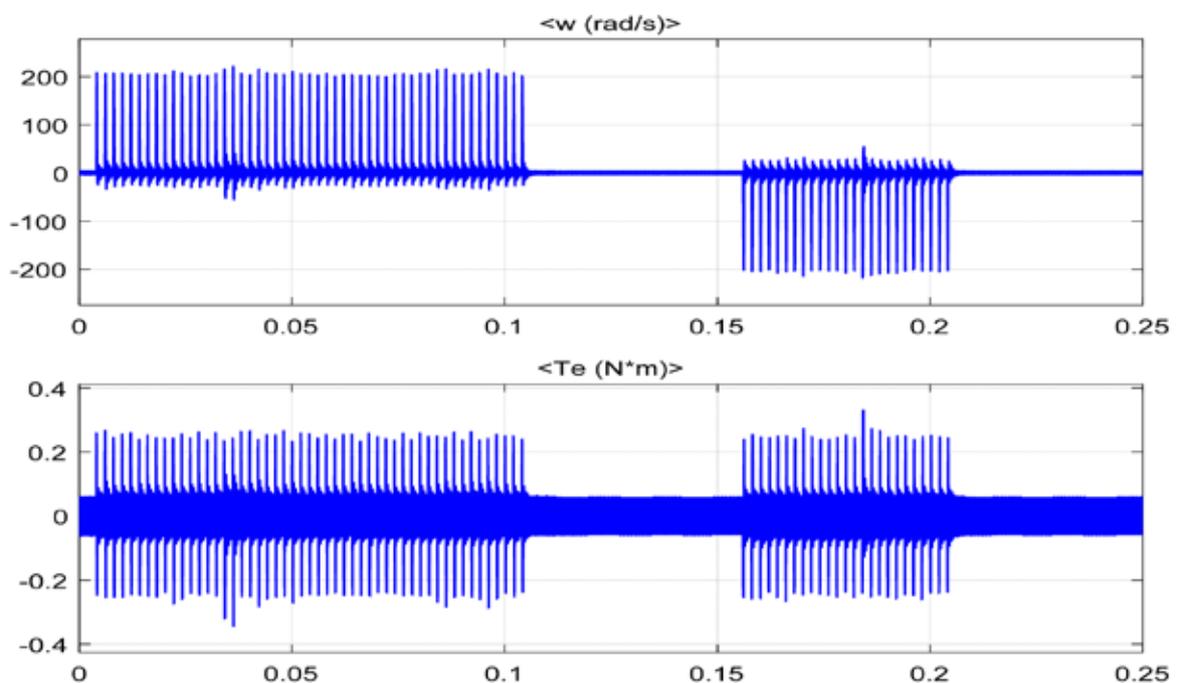


Рис. 9. Скорость и электромагнитный момент шагового двигателя

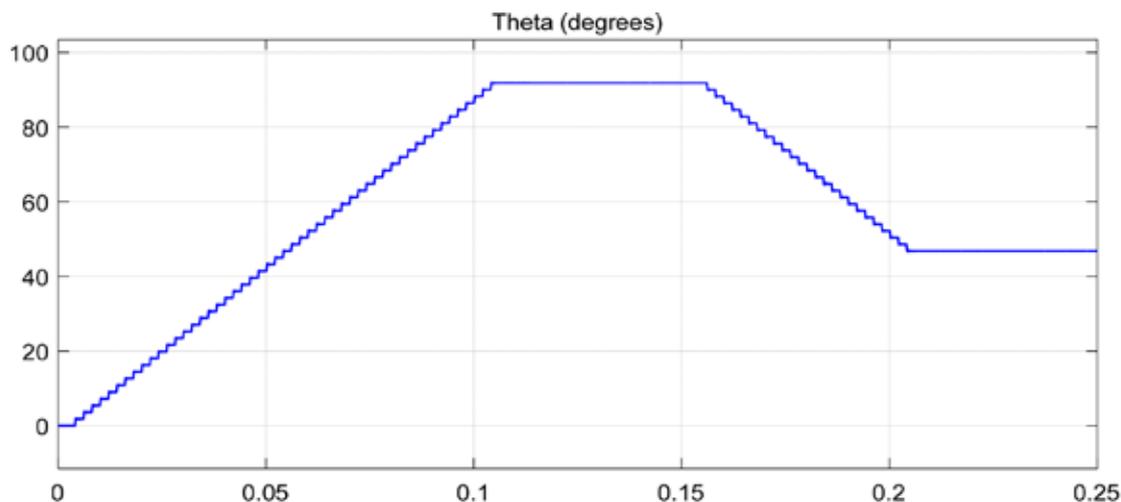


Рис. 10. Угол поворота на валу шагового двигателя

*Примечание:* во избежание ошибок при запуске расчета модели необходимо открыть меню Simulation, выбрать Model Configuration Parameters. В открывшемся окне в меню Diagnostics перейти к пункту Connectivity и установить значение Mux blocks used to create bus signals: error, как показано на рис. 11.

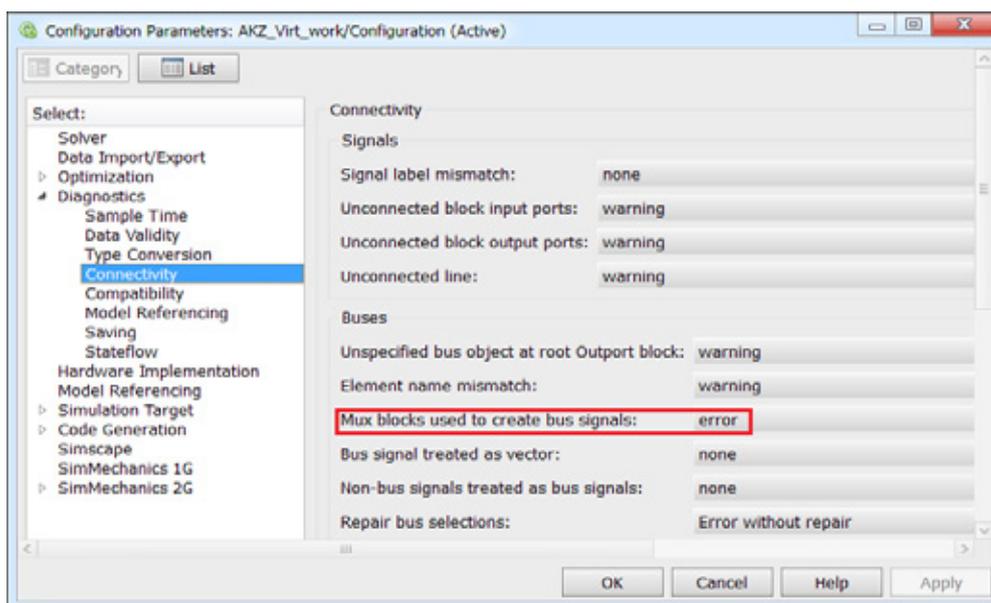


Рис. 11. Окно параметров модели

Литература:

1. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.
2. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. — СПб.: КОРОНА принт, 2007. — 320 с.
3. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 288 с.
4. Simscape Power Systems Examples [Электронный ресурс] // MathWorks. — Режим доступа: [www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples.html](http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples.html).
5. Емельянов, А.А., Бесклеткин В.В., Авдеев А.С., Габзалилов Э.Ф., Прокопьев К.В., Ситенков А.А., Пестеров Д.И., Юнусов Т.Ш. Математическое моделирование короткозамкнутого асинхронного двигателя в пакете SimPowerSystems // Молодой ученый. — 2016. — № 14. — с. 28–34.

## Математическое моделирование электропривода на базе явнополюсного синхронного двигателя в пакете SimPowerSystems

Емельянов Александр Александрович, доцент;  
 Бесклеткин Виктор Викторович, ассистент;  
 Авдеев Александр Сергеевич, студент;  
 Габзалилов Эльвир Фиргатович, студент;  
 Прокопьев Константин Васильевич, студент;  
 Ситенков Александр Александрович, студент;  
 Пестеров Дмитрий Ильич, студент;  
 Юнусов Тимур Шамильевич, студент;  
 Устинов Артем Павлович, студент

Российский государственный профессионально-педагогический университет

Целью данной работы является овладение технологией сборки модели электропривода на базе явнополюсного синхронного двигателя в пакете SimPowerSystems для использования в лабораторной работе по дисциплине «Математическое моделирование в электромеханических устройствах» [1], [2], [3], [4], [5].

Общая схема системы электропривода на базе явнополюсного синхронного двигателя дана на рис. 1.

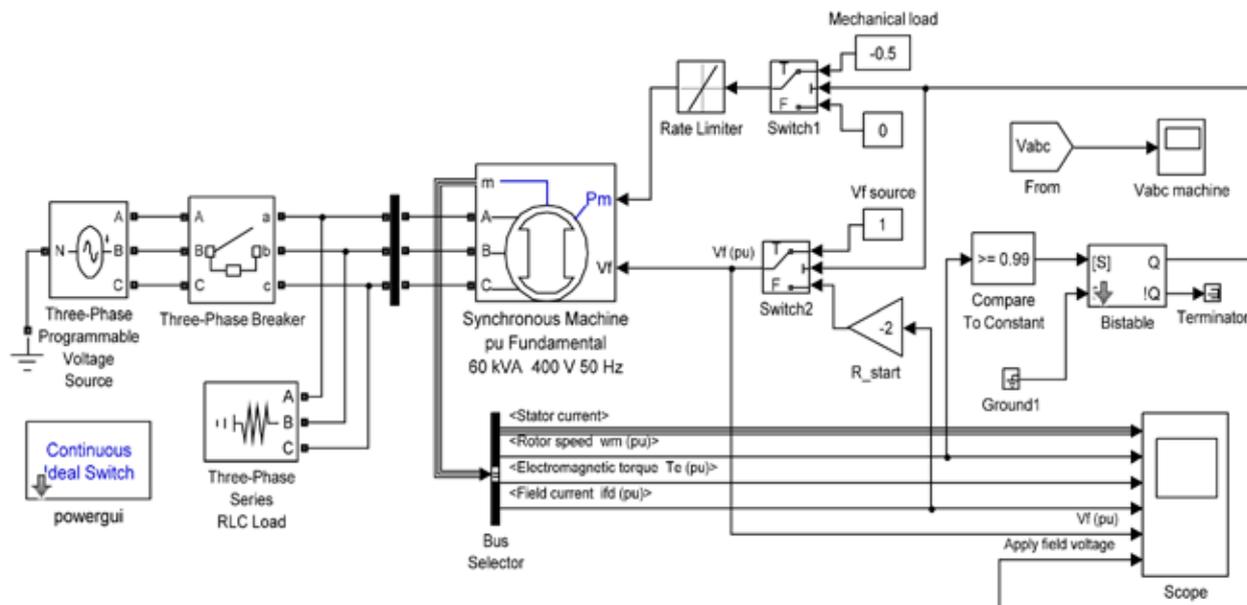


Рис. 1. Схема системы электропривода с явнополюсным синхронным двигателем

Параметры источника трехфазного напряжения (Three-Phase Programmable Voltage Source) и трехфазного переключателя (Three-Phase Breaker) даны на рис. 2.

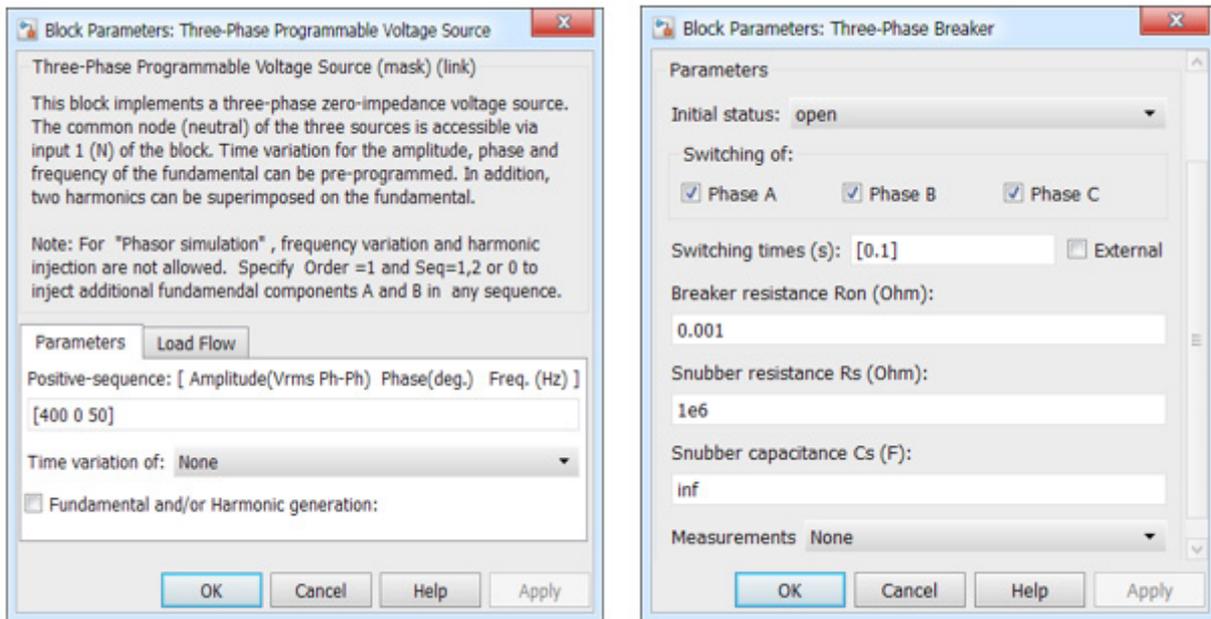


Рис. 2. Окна параметров источника трехфазного напряжения и трехфазного переключателя

Параметры блока powergui и трехфазной последовательной RLC нагрузки (Three-Phase RLC Load) даны на рис. 3.

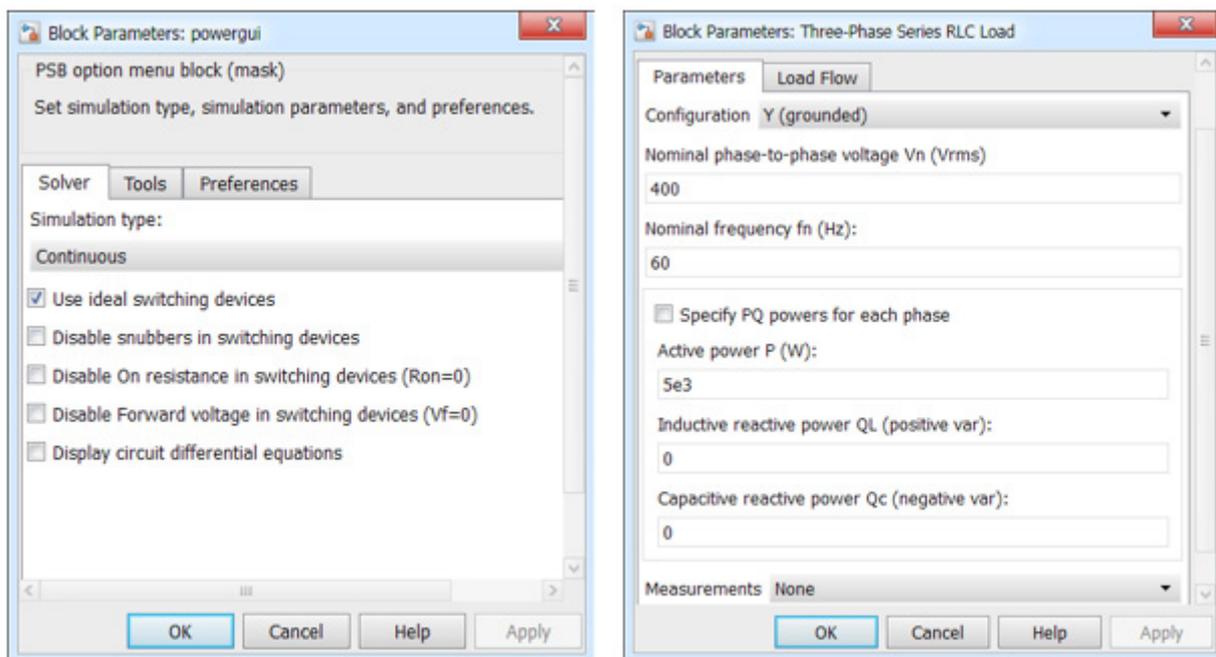


Рис. 3. Окна параметров блока powergui и трехфазной последовательной RLC нагрузки

В блоке явнополюсного синхронного двигателя (Synchronous Machine pu Fundamental) задаем параметры двигателя (рис. 4).

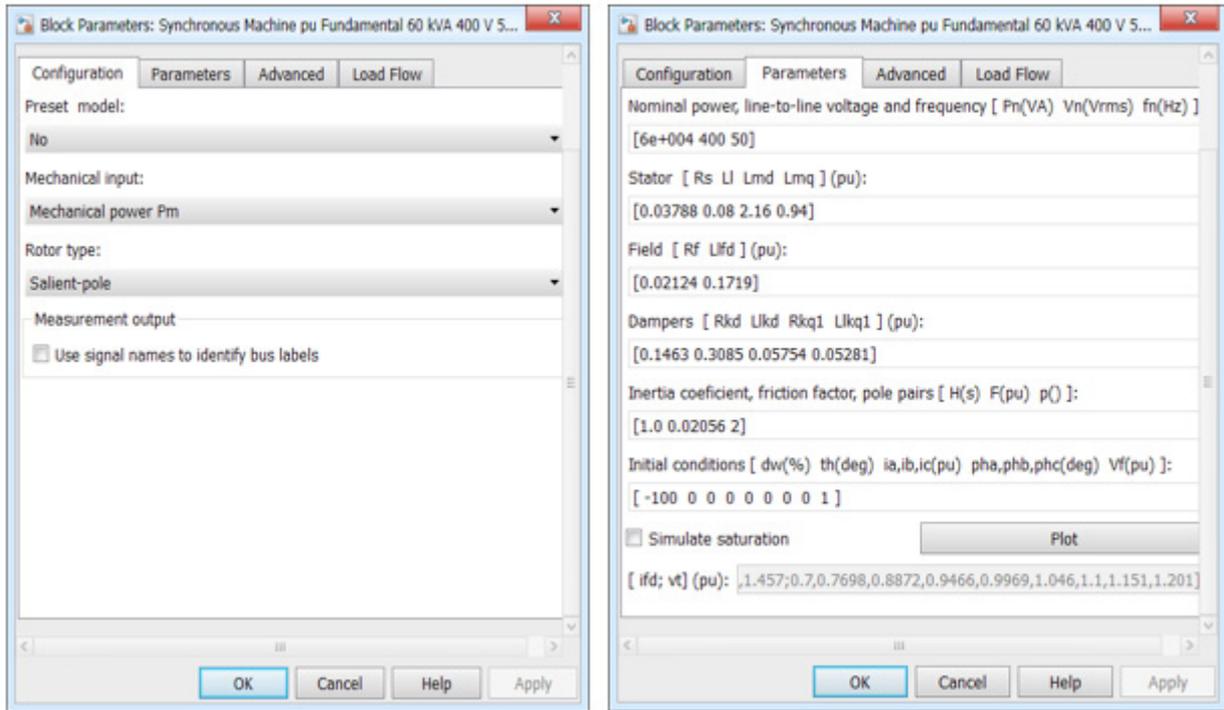


Рис. 4. Окна конфигурации и параметров явнополюсного синхронного двигателя

Параметры блоков ограничения скорости изменения сигнала (Rate Limiter) и переключателей (Switch1 и Switch<sup>2</sup>) даны на рис. 5.

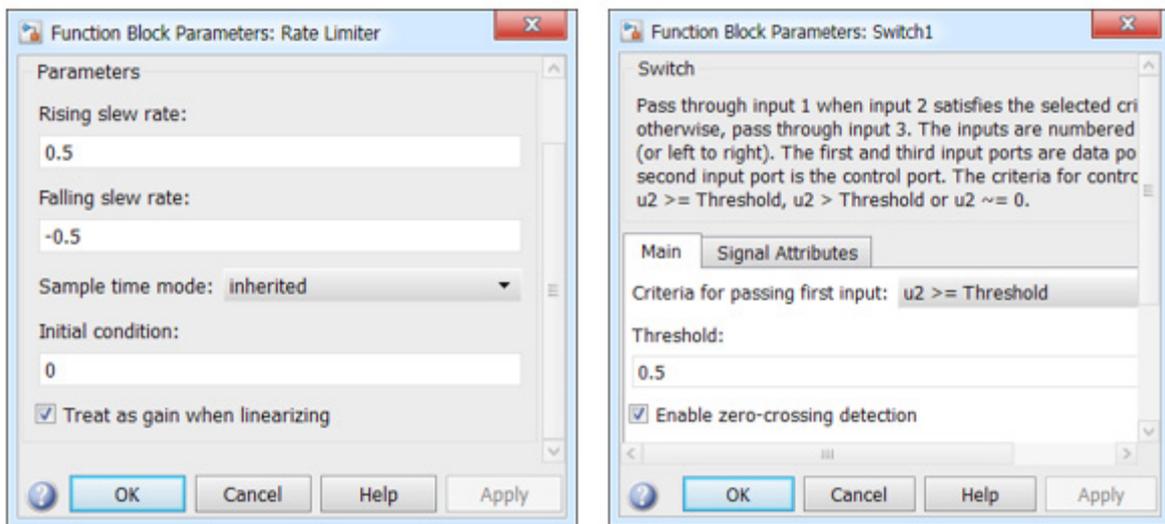


Рис. 5. Окна параметров блоков ограничения скорости изменения сигнала и переключателей

Параметры блоков сравнения входного сигнала с заданной константой (Compare To Constant), приема сигнала (From) и блока установки устойчивого состояния (Bistable) показаны на рис. 6.

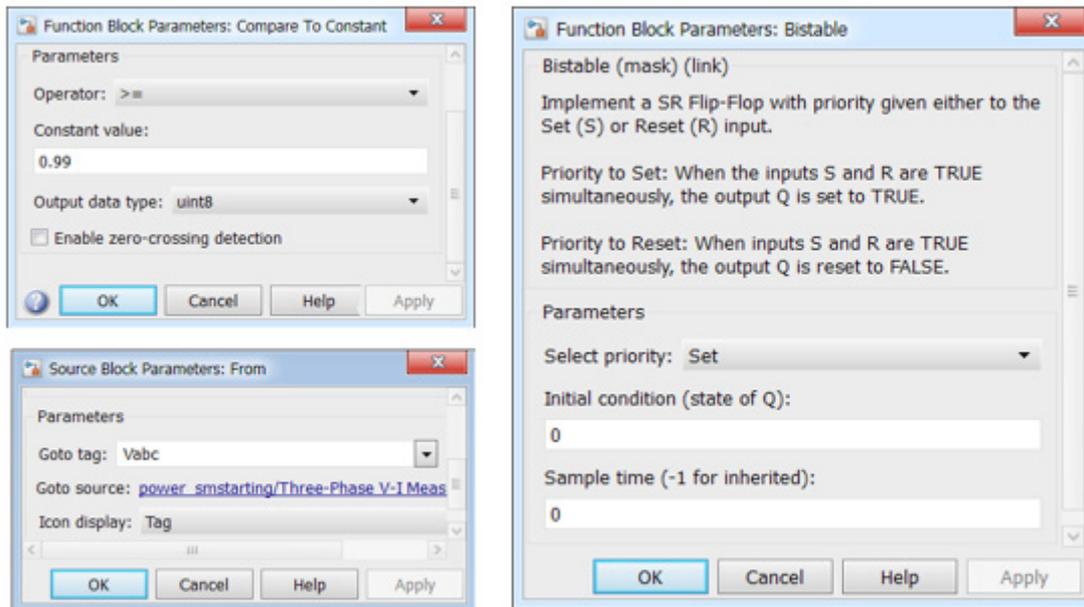


Рис. 6. Окна параметров блоков сравнения, приема сигнала и блока установки устойчивого состояния

Для работы модели в SimPowerSystems необходимо добавить блок Powergui, в параметрах которого во вкладке Solver установить галочку Use ideal switching devices.

Результаты математического моделирования явнополюсного синхронного двигателя в SimPowerSystems представлены на рис. 7 и 8.

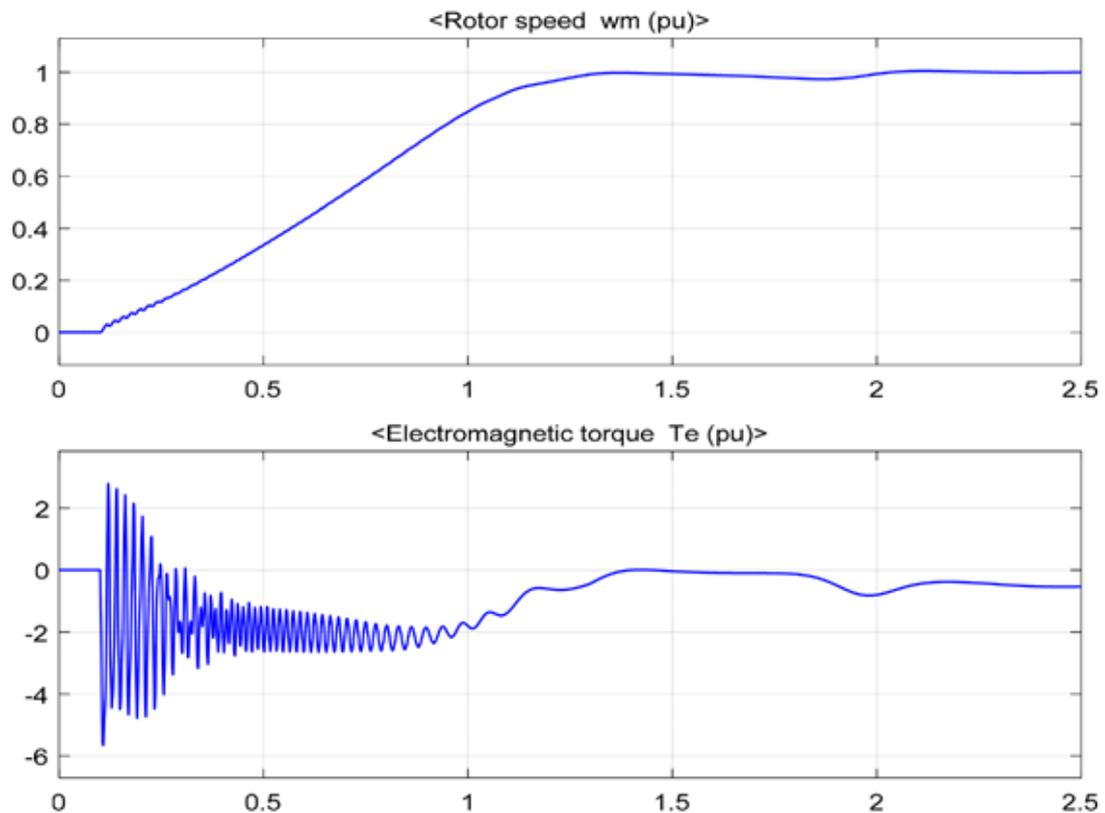


Рис. 7. Скорость и электромагнитный момент явнополюсного синхронного двигателя

На рис. 8 показана картина асинхронного пуска синхронного двигателя. При времени  $t = 1,3$  с происходит подача напряжения на обмотку возбуждения, и ротор двигателя входит в синхронизм.

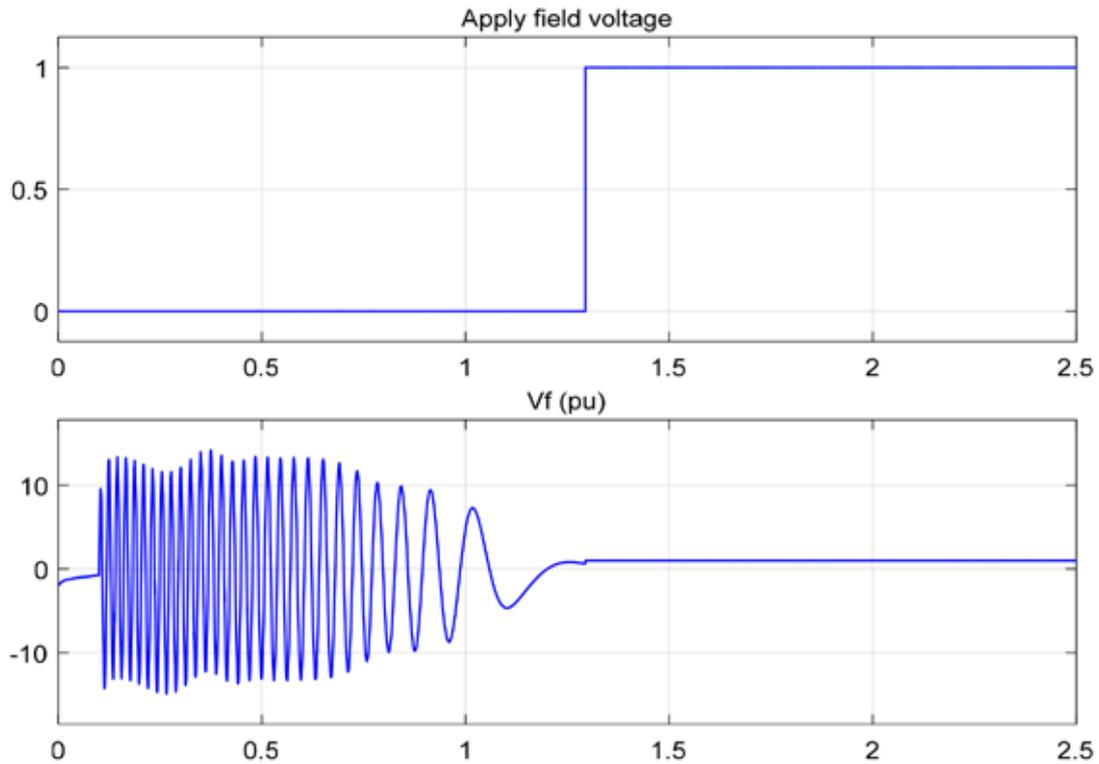


Рис. 8. Асинхронный пуск синхронного двигателя

*Примечание:* во избежание ошибок при запуске расчета модели необходимо открыть меню Simulation, выбрать Model Configuration Parameters. В открывшемся окне в меню Diagnostics перейти к пункту Connectivity и установить значение Mux blocks used to create bus signals: error, как показано на рис. 9.

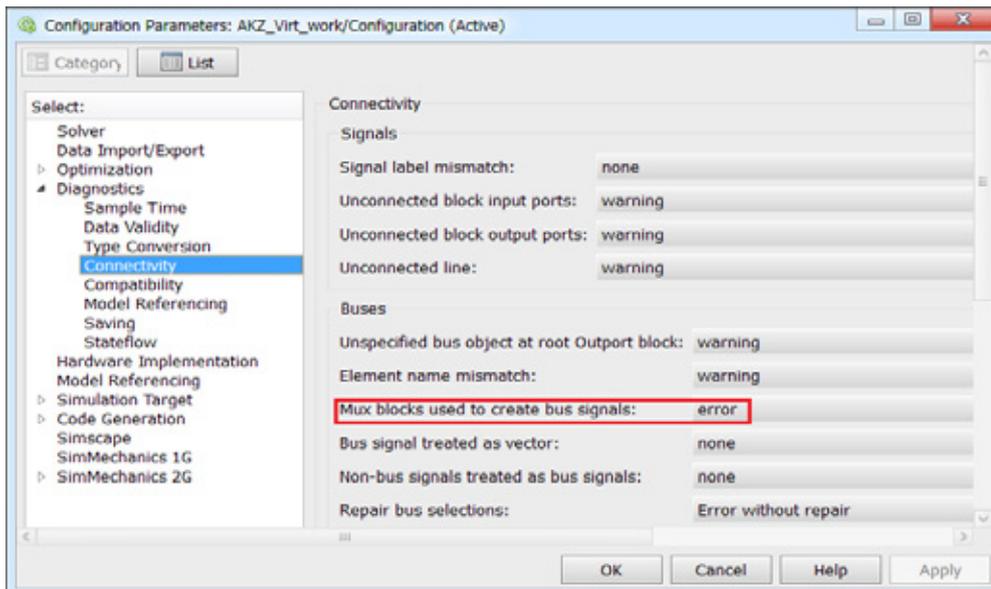


Рис. 9. Окно параметров модели

Литература:

1. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.
2. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. — СПб.: КОРОНА принт, 2007. — 320 с.
3. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 288 с.
4. Simscape Power Systems Examples [Электронный ресурс] // MathWorks. — Режим доступа: [www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples.html](http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples.html).
5. Емельянов, А.А., Бесклеткин В.В., Авдеев А.С., Габзалилов Э.Ф., Прокопьев К.В., Ситенков А.А., Пестеров Д.И., Юнусов Т.Ш. Математическое моделирование короткозамкнутого асинхронного двигателя в пакете SimPowerSystems // Молодой ученый. — 2016. — № 14. — с. 28–34.

## Математическое моделирование электропривода на базе вентильного реактивного двигателя в пакете SimPowerSystems

Емельянов Александр Александрович, доцент;  
Бесклеткин Виктор Викторович, ассистент;  
Авдеев Александр Сергеевич, студент;  
Габзалилов Эльвир Фиргатович, студент;  
Прокопьев Константин Васильевич, студент;  
Ситенков Александр Александрович, студент;  
Пестеров Дмитрий Ильич, студент;  
Юнусов Тимур Шамильевич, студент;  
Устинов Артем Павлович, студент

Российский государственный профессионально-педагогический университет

Целью данной работы является овладение технологией сборки модели электропривода на базе вентильного реактивного двигателя в пакете SimPowerSystems для использования в лабораторной работе по дисциплине «Математическое моделирование в электромеханических устройствах» [1], [2], [3], [4], [5].

На рис. 1 показана схема электропривода на базе вентильного реактивного двигателя.

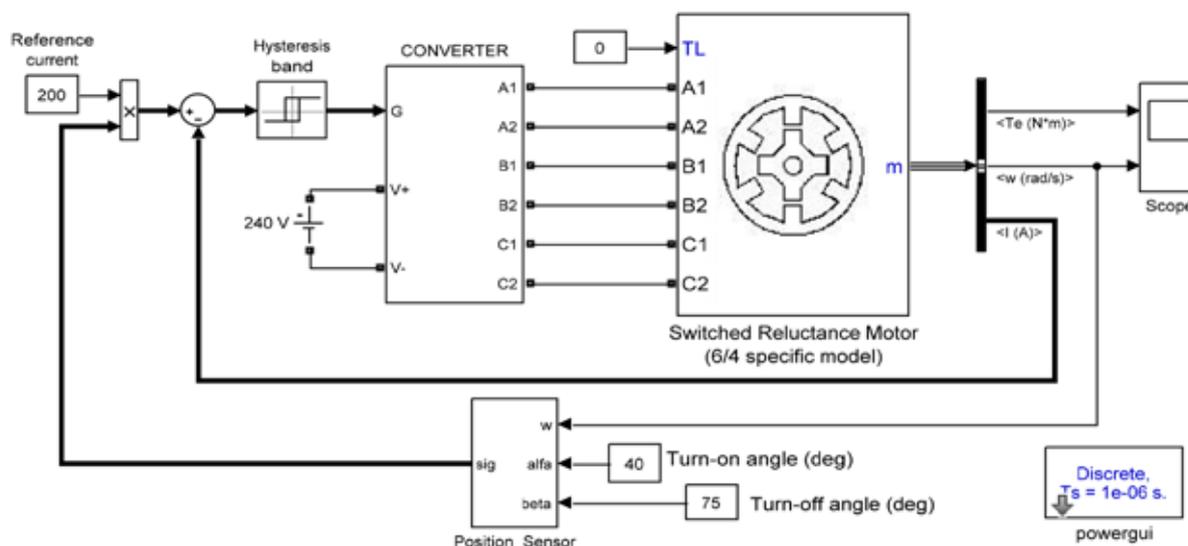


Рис. 1. Электропривод на базе вентильного реактивного двигателя

На рис. 2 показано расположение блока вентильного реактивного двигателя (Switched Reluctance Motor) в библиотеке SimPowerSystems (Simscape). Параметры этого блока представлены на рис. 3.

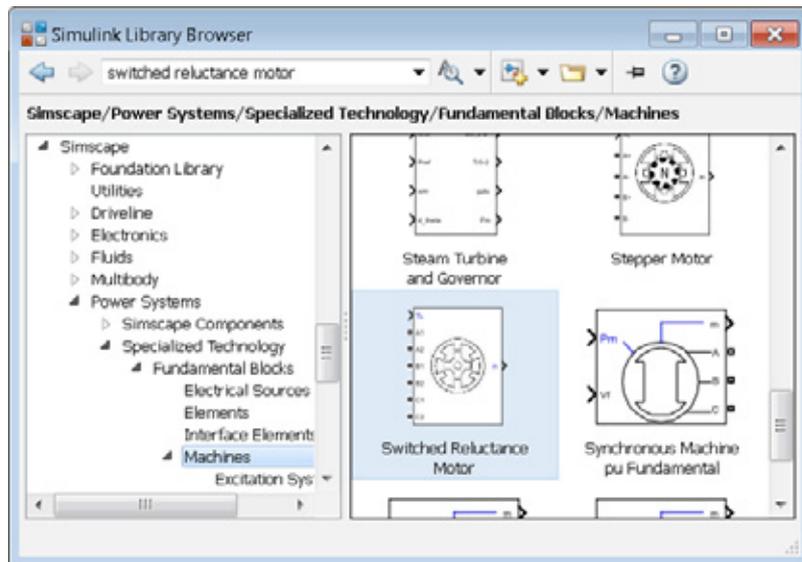


Рис. 2. Расположение блока Switched Reluctance Motor

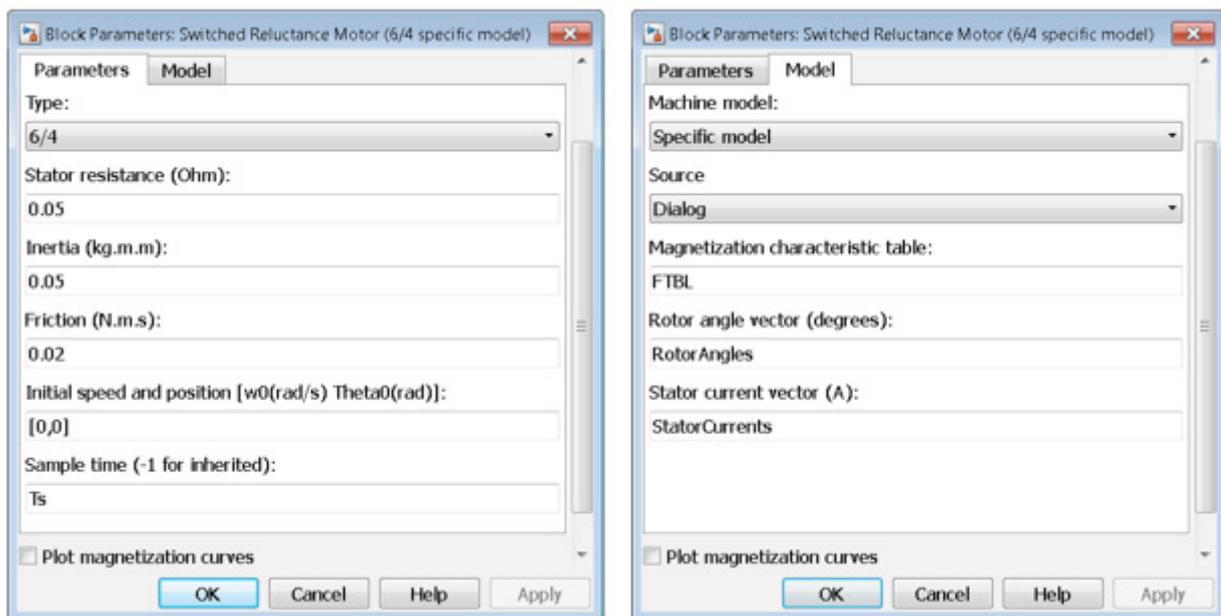


Рис. 3. Параметры блока Switched Reluctance Motor

Мостовой коммутатор (Converter) представляет собой блок Subsystem и включает в себя схему, показанную на рис. 4. Блок Converter подключен к источнику питания (DC Voltage Source) с постоянным напряжением 240 В. Диапазон гистерезиса (Hysteresis band) задается блоком Relay со следующими параметрами:

- switch on point: 10;
- switch off point: — 10;
- output when on: 1;
- output when off: 0;
- input processing: Inherited.

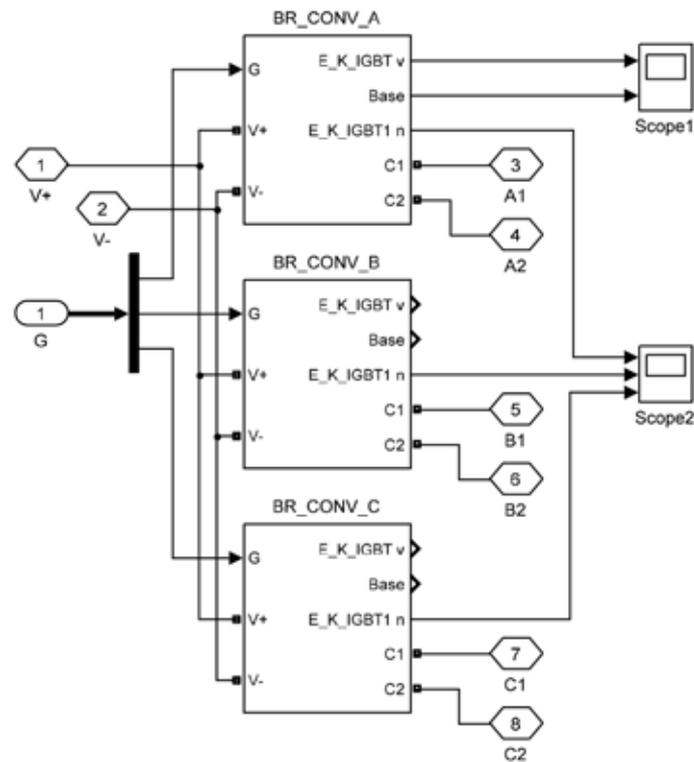


Рис. 4. Мостовой коммутатор (Converter) на транзисторах IGBT

Порты подключения V+, V-, A1, A2 и т. д. представлены блоками Connection port из раздела Elements библиотеки SimPowerSystems.

Блоки BR\_CONV A, B и C имеют одинаковую структуру, приведенную на рис. 5.

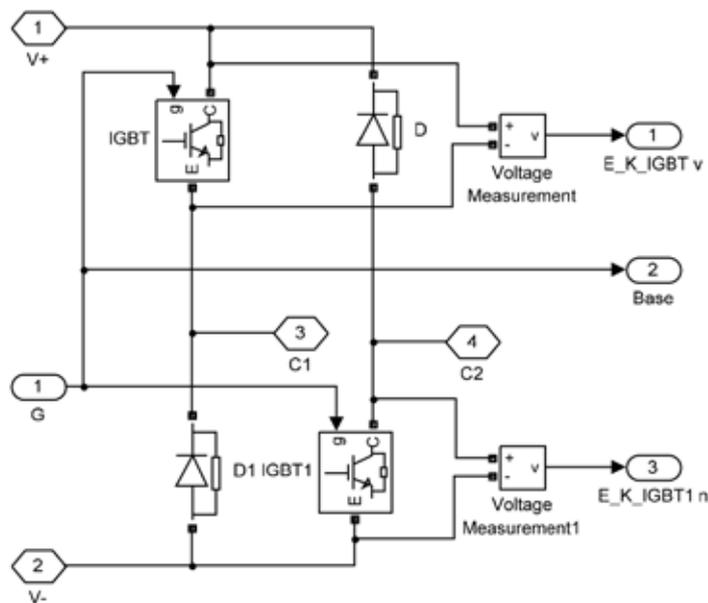


Рис. 5. Структура блоков BR\_CONV

IGBT-транзисторы и диоды (D и D1) находятся в разделе Power Electronics библиотеки SimPowerSystems (Simscape) (рис. 6). Их параметры представлены на рис. 7, а и 7, б.

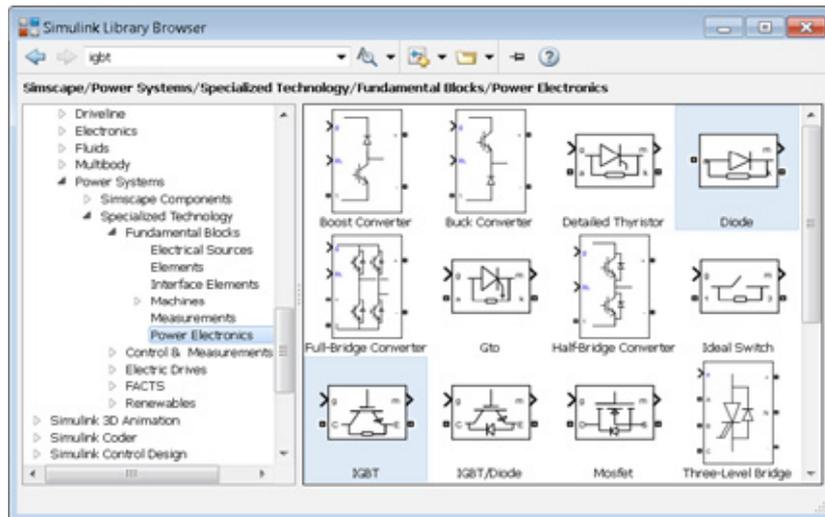


Рис. 6. Расположение блоков IGBT и Diode

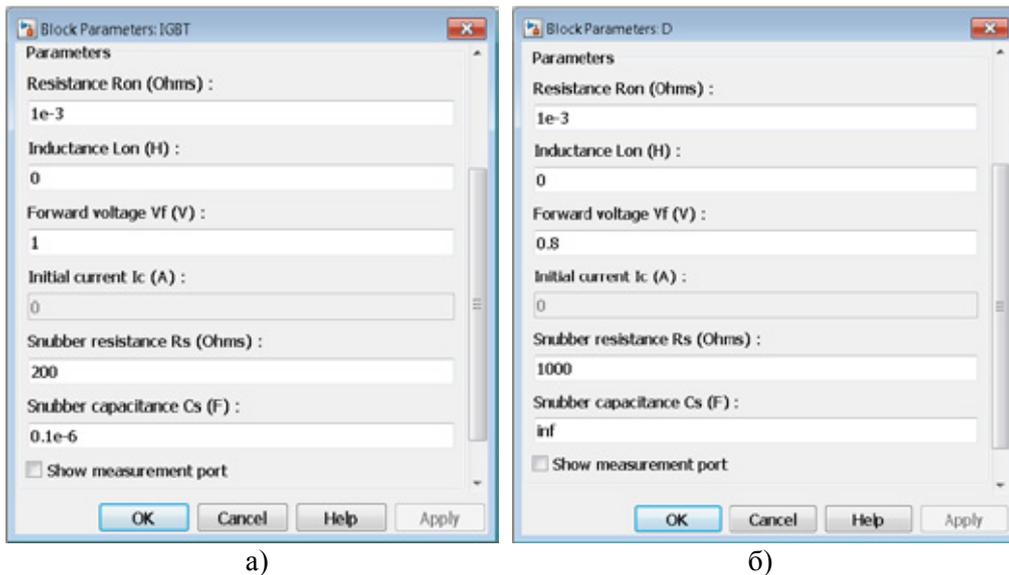


Рис. 7. Параметры блоков: а) IGBT; б) Diode

Датчик положения (Position Sensor) показан на рис. 8. Логический оператор (Logical operator) со значением AND, операторы сравнения (Relational operator) «>=» и «<=» входят в группу блоков Logic and Bit Operations библиотеки Simulink. Функция (Math function) со значением mod находится в разделе Math Operations, а блок дискретного интегратора (Discrete-Time Integrator) — в Discrete.

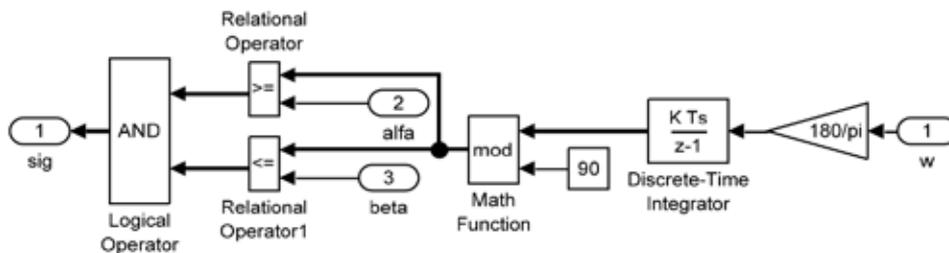


Рис. 8. Датчик положения (Position Sensor)

Параметры дискретного интегратора приведены на рис. 9.

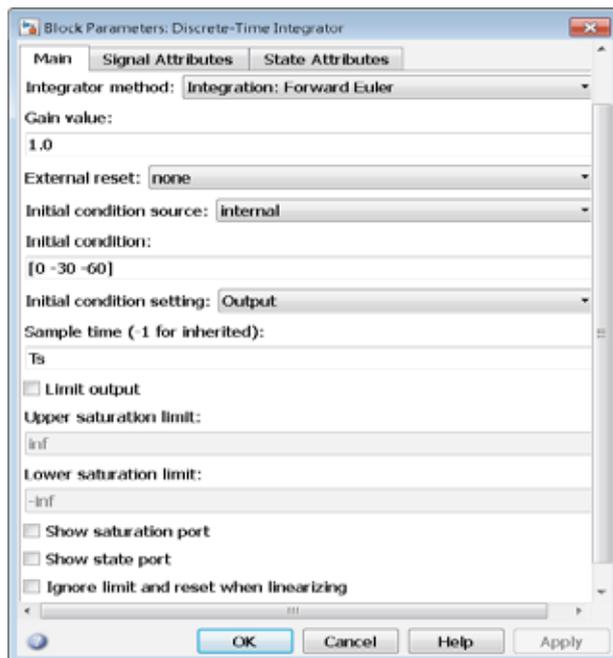


Рис. 9. Параметры дискретного интегратора (Discrete-Time Integrator)

Для работы модели необходим блок Powergui, который можно найти в разделе Fundamental Blocks библиотеки SimPowerSystems (Simscape). Параметры этого блока следует задать в соответствии с рис. 10.

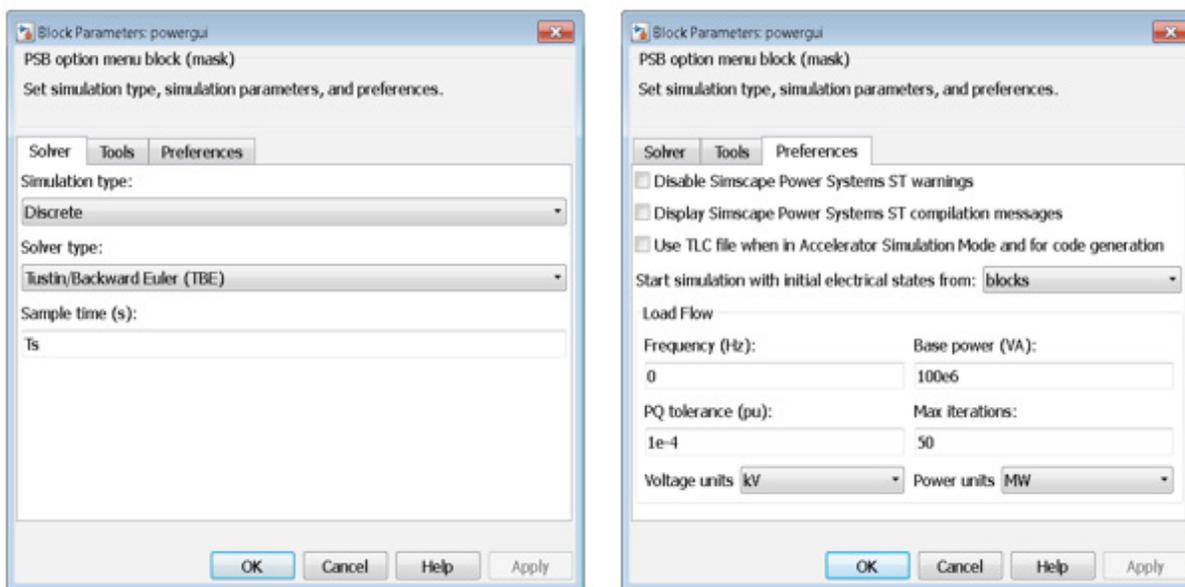


Рис. 10. Параметры блока Powergui

Характеристики двигателя выводятся на осциллограф Scope с помощью блока Bus Selector (библиотека Simulink/Signal Routing).

Результаты моделирования электропривода на базе вентильного реактивного двигателя даны на рис. 11, 12 и 13.

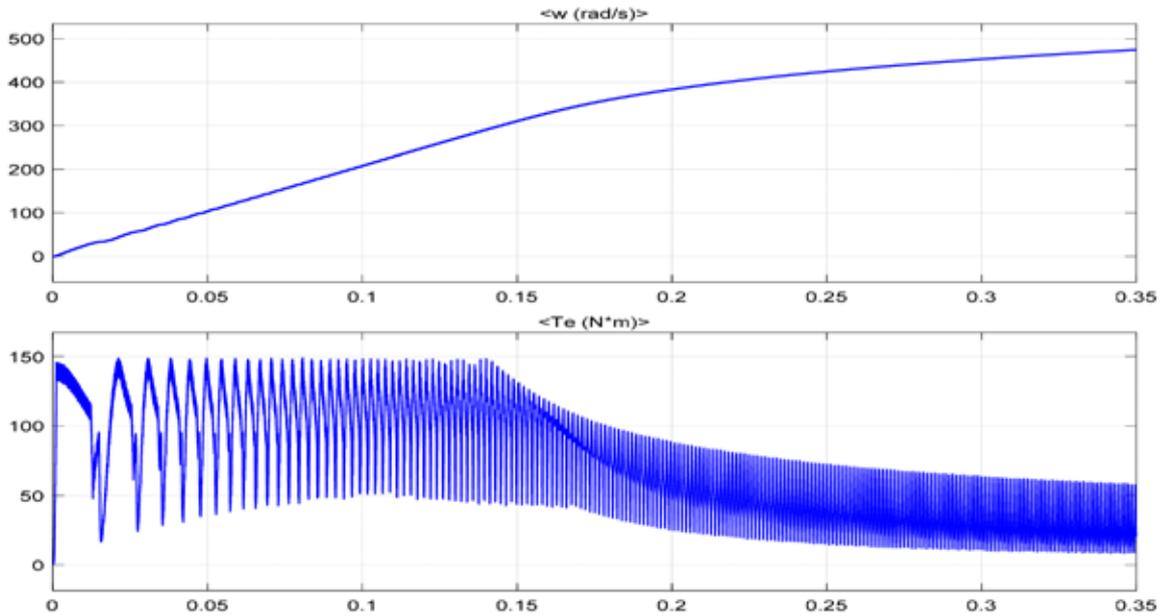


Рис. 11. Графики скорости и электромагнитного момента

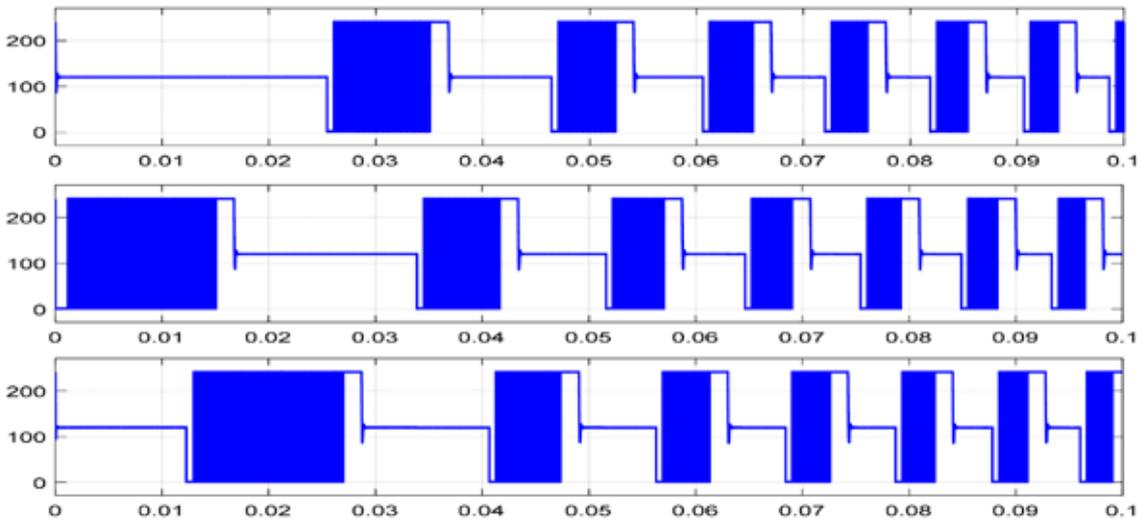


Рис. 12. Напряжения на нижних транзисторах эмиттер-коллектор по трём фазам А, В, С на осциллографе Scope2

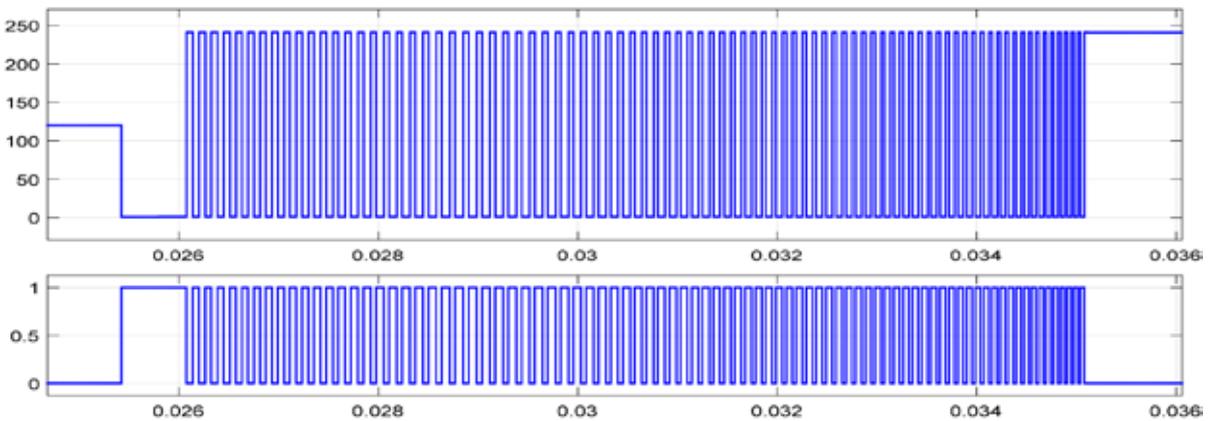


Рис. 13. Сравнение сигналов эмиттер-коллектор транзистора IGBT (верхний график) и сигналы на базе этого же транзистора на осциллографе Scope 1

*Примечание:* во избежание ошибок при запуске расчета модели необходимо открыть меню Simulation, выбрать Model Configuration Parameters. В открывшемся окне в меню Diagnostics перейти к пункту Connectivity и установить значение Mux blocks used to create bus signals: error, как показано на рис. 14.

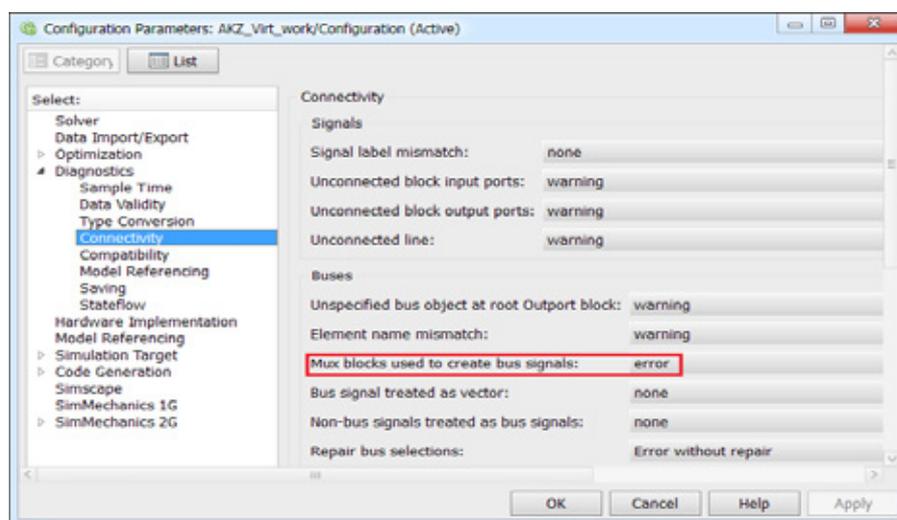


Рис. 14. Окно параметров модели

Литература:

1. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.
2. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. — СПб.: КОРОНА принт, 2007. — 320 с.
3. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 288 с.
4. Simscape Power Systems Examples [Электронный ресурс] // MathWorks. — Режим доступа: [www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples.html](http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples.html).
5. Емельянов, А.А., Бесклеткин В.В., Авдеев А.С., Габзалилов Э.Ф., Прокопьев К.В., Ситенков А.А., Пестеров Д.И., Юнусов Т.Ш. Математическое моделирование короткозамкнутого асинхронного двигателя в пакете SimPowerSystems // Молодой ученый. — 2016. — № 14. — с. 28–34.

## Исследование способов увеличения резкости рентгеновских снимков объектов технических систем

Журба Антон Владимирович, студент;  
Соколов Александр Олегович, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе исследуются различные методы повышения резкости цифровых изображений.*

**Ключевые слова:** цифровые изображения, фильтр Собела, фильтр Лапласа

В современном мире визуальное восприятие является одним из основных источников получения информации человеком. Таким образом, многие отрасли, имеющие непосредственное отношение к получению, обработке, хранению и передаче информации ориентируются на то, чтобы она представлялась в виде изображений. Особое значения улучшение и коррекция изображения принимает при неразрушающем контроле и медицинской диагностике, а также научных исследованиях, проводимых различными рентгеновскими методами. По этой причине возникает инженерная

задача по улучшению качества изображений для визуального восприятия и для оценки изображений техническими средствами. В настоящее время с этой задачей можно справиться только с использованием цифровых методов обработки.

## 1. Цифровое изображение в современном мире

Цифровое изображение — это представление информации в виде функции двух переменных  $f(x, y)$ , где  $x$  и  $y$  — пространственные координаты на плоскости, а сама функция определяет интенсивность или градацию серого в этой точке. Они состоят из конечного числа элементов, которые называются пикселями. Цифровое изображение удобно для хранения, передачи, преобразования по сравнению с аналоговыми изображениями и несет за собой большой информационный поток [1].

Для получения цифровых изображений используются фоточувствительные элементы. Самым простейшим устройством для регистрации уровня освещенности является фотодиод, сигнал на выходе которого, пропорционален уровню освещенности чувствительной области в данный момент. На аналогичном принципе строятся все приборы с зарядовой связью (ПЗС), так как каждый элемент ПЗС-матрицы представляет собой фоточувствительный элемент. Обычно для этого используются МДП конденсаторы, которые накапливают заряд и после с помощью управляющего потенциала заряд постепенно перетекает в соседние элементы ПЗС-матрицы.

## 2. Основы фильтров повышения резкости цифровых изображений

Главная цель повышения резкости заключается в подчеркивании мелких деталей изображения или улучшении тех деталей, которые оказались расфокусированы вследствие неудовлетворительного качества съемки. Повышение резкости изображений используется в различных отраслях человеческой деятельности.

Повышение резкости достигается за счет пространственного дифференцирования. Дифференцирование усиливает перепады и другие разрывы и не выделяет области с медленными изменениями уровней яркости.

Производные дискретной функции определяются в терминах разностей. Первая производная должна быть: равной нулю на участках с неизменной яркостью; в остальных случаях она имеет ненулевое значение. Аналогично вторая производная должна быть: неравной нулю в начале и в конце ступеньки или склона яркости; в остальных случаях принимает нулевое значение.

Производная первого порядка одномерной функции  $f(x)$  определяется как разность яркостей соседних пикселей:

$$\frac{df(x)}{dx} = f(x+1) - f(x) \quad (1)$$

Аналогично, вторая производная определяется как разность соседних значений первой производной:

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = f(x+1) + f(x-1) - 2f(x) \quad (2)$$

Для выделения сходства или различия между производными первого и второго порядков, рассмотрим пример на рисунке 1.

На рисунке показана упрощенная дискретная схема профиля, содержащая минимальное количество точек, требуемое для анализа поведения первой и второй производных вблизи отдельной точки, линии, склона и контура объекта.

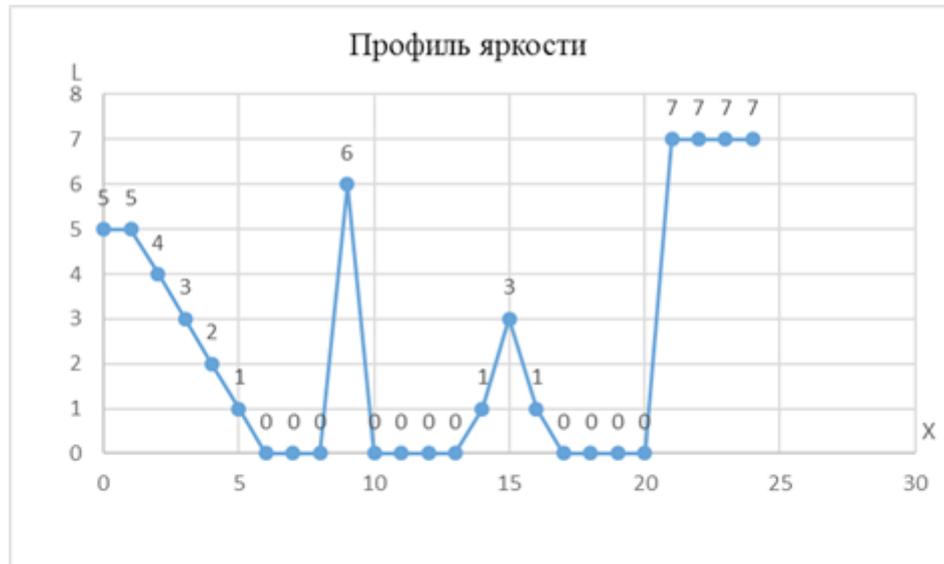
Рассмотрим поведение производных разных порядков при движении по горизонтальной оси изображения слева направо. Видно, что первая производная дает в результате «толстые» контуры, а вторая — значительно более тонкие. На отдельной точке отклик второй производной получается большим, поэтому она является более действенной для этой задачи.

Рассмотрим изотропные фильтры — эти фильтры инвариантны к повороту, т. е. при повороте изображения и последующее применение фильтра дает тот же результат, что и применение фильтра с последующим поворотом.

Простейшим изотропным оператором, который основан на производных, является лапласиан (оператор Лапласа), определяющийся как:

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{d^2 f(x, y)}{dx^2} + \frac{d^2 f(x, y)}{dy^2} \quad (3)$$

Для его записи в дискретном виде используют частные производные:



Строка изображения	5	5	4	3	2	1	0	0	0	6	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0
Первая производная		-1	-1	-1	-1	-1	0	0	6	-6	0	0	0	1	2	-2	-1	0	0	0	7
Вторая производная		-1	0	0	0	0	1	0	6	-12	6	0	0	1	1	-4	1	1	0	0	7

Рис. 1. Нахождение производных разных первого и второго порядков

$$\frac{d^2 f(x, y)}{dx^2} = f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y) \tag{4}$$

$$\frac{d^2 f(x, y)}{dy^2} = f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y) \tag{5}$$

тогда лапласиан равен:

$$\nabla^2 f(x, y) = f(x+1, y) + f(x-1, y) - 4f(x, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) \tag{6}$$

Это уравнение может быть реализовано с помощью маски, которая представлена на рисунке 2 (а), дающая результат, который изотропен для поворотов на углы, кратные 90°.

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

а

0	1	0
1	4	1
0	1	0

в

1	1	1
1	-8	1
1	1	1

б

1	1	1
1	8	1
1	1	1

г

Рис. 2. Маски оператора Лапласа

Если используемая маска имела отрицательные центральные коэффициенты, тогда для повышения резкости, изображение-лапласиан следует вычитать, а не прибавлять.

В обработке изображений первые производные реализуются через модуль градиента, который определяется как вектор-столбец:

$$\nabla f = \begin{pmatrix} G_x \\ G_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{df}{dx} \\ \frac{df}{dy} \end{pmatrix} \tag{7}$$

Модуль этого вектора равен:

$$|\nabla f| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = \sqrt{\frac{df^2}{dx^2} + \frac{df^2}{dy^2}} \tag{8}$$

Компоненты вектора градиента являются линейными операторами, но модуль вектора, очевидно, нет, поскольку он выражается через операции возведения в квадрат и извлечения квадратного корня. С другой стороны, частные производные в уравнении (7) не являются инвариантными к повороту (изотропными), но модуль вектора градиента таковым является.

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

а

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

б

Рис. 3. Маски фильтров, основанных на первой производной

Уравнение 8 реализуется при помощи масок, представленных на рисунке 3 и называется оператором Собела. Маска 3 (а) предназначена для нахождения горизонтальных контуров, а маска 3 (б) для нахождения вертикальных контуров.

**Заключение**

Представленные в работе методы дали возможность повышения резкости рентгеновских снимков объектов технических систем, что позволило повысить информативность данного типа изображений.

Литература:

1. Гонсалес, Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1071 с.
2. Миронов, Д. А. Большая энциклопедия цифровой фотографии. М.: Эксмо, 2012. 328 с.
3. Фисенко, В. Т., Фисенко Т. Ю., Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 192 с.
4. JETCOM [электронный ресурс]. URL: <http://www.jetcom.ru/production/file-formats> (дата обращения: 19.04.2016).
5. Торстен, Б., Меллер, Эмиль Райф, Атлас рентгенологических укладок. М.: Медицинская литература, 2009. 512 с.

## Картографический сервис оценки экологической ситуации в акватории Финского залива

Зайнагутдинов Руслан Илюсович, студент;

Васильев Дмитрий Анатольевич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В работе были рассмотрены картографические сервисы и их применение для решения экологических задач.*

*Был произведен анализ данных мониторинга экологической ситуации в акватории Большого порта Санкт-Петербурга. Далее был получен маршрут движения нефтяного танкера при помощи сервиса MarineTraffic. Скриншот маршрута был нанесен как растровое изображение в приложении ArcMap платформы ArcGIS for Desktop 10.2.2 и был оцифрован. Таким образом, на карту можно нанести маршруты всех судов, проходящих в акватории Финского залива. Следом принято гипотетическое условие — авария нефтяного судна. Зная примерное место разлива и время, было найдено судно — виновник аварии, благодаря возможностям сервиса MarineTraffic. Стали известны данные судна, его размеры, тоннаж, осадка и т. д. Благодаря полученным данным построена модель разлива нефти и нанесена на карту, наряду с маршрутом, в приложении ArcMap. Это позволит посчитать границы разлива, провести анализ экологической проблемы и приступить к её решению.*

**Ключевые слова:** картографический сервис, мониторинг, MarineTraffic, растровое изображение, ArcMap, ArcGIS for Desktop 10.2.2

Интерактивные ГИС-карты базируются на уникальной технологии геоинформационных систем (ГИС) и интегрированы с базами данных по наземным объектам различных видов. Основное их назначение — предоставление картографической информации, которая зачастую дополняется иными географически привязанными данными. Поэтому они могут оказаться полезными при поиске того или иного пункта на местности, а также для получения сведений о климатических условиях в этом пункте, национальных и религиозных особенностях, расписании движения транспорта, информации о расположении на предполагаемом маршруте заправочных станций, ресторанов, отелей и т. п. Особую важность такие карты приобретают при решении экологических задач, в том числе оценке уровня загрязнения при разливах нефти и поиске источника аварии.

### 1. Движение и характеристики судов на карте

**АИС — автоматическая идентификационная система.** Автоматическая идентификационная система, со-

кращенно АИС (от англ. АИС — Automatic Identification System) — система, позволяющая идентифицировать и отследить движение судна в режиме реального времени с точностью до 10 метров. Использование АИС позволяет установить местонахождение судов для повышения уровня безопасности в море, избежать столкновения судов.

АИС передает данные о судне с помощью волн ОВЧ (Очень высоких частот) / УКВ (Ультра коротко волнового) диапазона. Если по-простому, АИС — это передатчик, установленный на судне, который транслирует в радиоэфир определенные данные: статическую информацию — которая не изменяется во время плавания, и динамическую — которая обновляется в реальном времени. Динамические данные АИС получает от подключенных к нему приборов (в частности, от GPS).

Ни спутниковая, ни мобильная связь в АИС не используется, только радиочастоты, поэтому прием и передача данных АИС совершенно бесплатна (только сам прибор и его первоначальная установка, разумеется, оплачивается судовладельцем).

**MarineTraffic** — судна на карте онлайн. Основным предназначением сайта [marinetraffic.com](http://marinetraffic.com) является отслеживание позиций, и информации судов в реальном времени.

Система основана на АИС. Приемные станции АИС полностью покрывают диапазон в 40 морских миль (около 75 км) и периодически получают информацию от некоторых более удаленных судов.

В общем случае, данные на карте обновляются в реальном времени. Однако, позиции некоторых судов могут обновляться с задержкой, например, когда судно вышло за пределы приема сигнала. Также, некоторые позиции могут отображаться с задержкой до одного часа, что не является большой погрешностью, если судно в океане (учитывая небольшие скорости судов и огромные расстояния).

**ArcMap** — основное приложение картографической платформы **ArcGIS for Desktop**. Приложение применяется для отображения и исследования наборов геоданных, с его помощью можно задавать условные обозначения, готовить карту к печати и публикации. ArcMap также яв-

ляется приложением, используемым для создания и редактирования наборов данных. Так же представляет географическую информацию как набор слоёв и прочих элементов карты. На карте обычно присутствуют фреймы данных, включающие слои карты для данного экстенда, масштабная линейка, стрелка севера, заголовок, поясняющий текст, легенда и т. д.

## 2. Решение задачи поиска потенциальных источников нефтяного загрязнения с использованием картографических сервисов.

### 2.1 Получение маршрута движения нефтяного танкера в MarineTraffic.

Для начала открываем ресурс [MarineTraffic.com](http://MarineTraffic.com) и находим судно, которое будем использовать в нашей модели, в данном случае это нефтяной танкер EBRU. (Рисунок 2). Это нефтехимический танкер с тоннажем 3510 тонн плавающий в акватории Финского залива, отличный пример для рассмотрения. (Рисунок 1)

IMO: <b>9280184</b>	Валовая вместимость: <b>2435</b>
MMSI: <b>273335780</b>	Дедвейт: <b>3510 t</b>
Позывной: <b>UBOK3</b>	Наибольшая длина судна x
Флаг: <b>Russia [RU]</b>	Наибольшая ширина:
AIS Type: <b>Tanker</b>	<b>92.86m x 14.1m</b>
	Год постройки: <b>2004</b>
	Статус: <b>Активно</b>

Рис. 1. Основные данные о судне

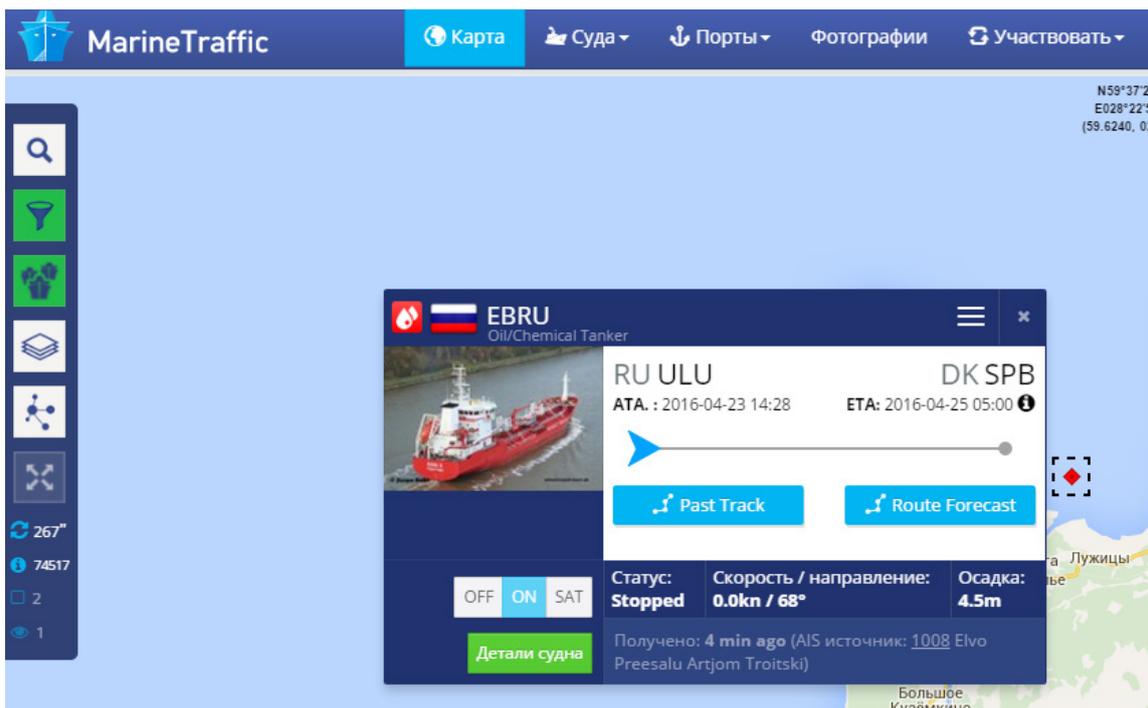


Рис. 2. Местоположение судна

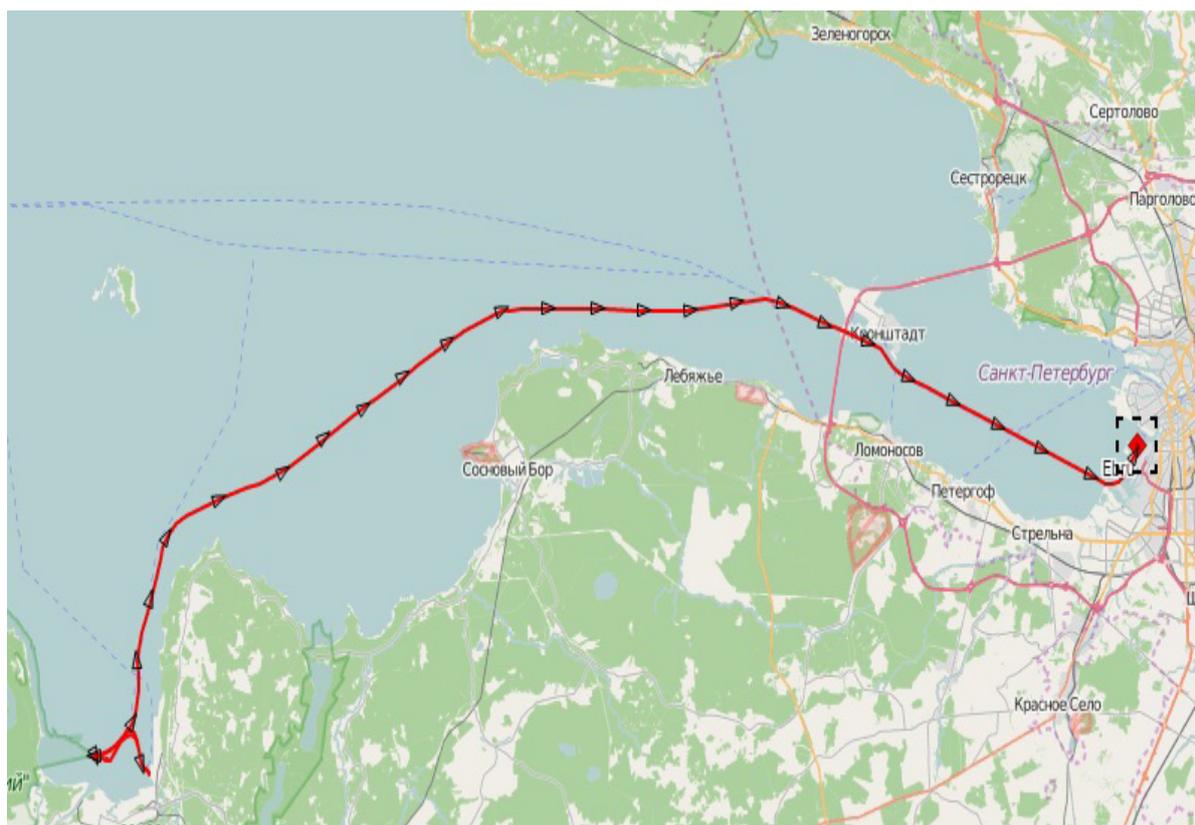


Рис. 3. Маршрут судна

Далее выбираем временной промежуток, с 23 по 25 апреля 2016 года, и просматриваем маршруты судна. Выбрав тот, что нас устраивает, маршрут порт Усть-Луга -> Большой порт Санкт-Петербург, делаем скриншот. (Рисунок 3)

### 2.2 Нанесение маршрута в ArcGIS.

Переходим к нанесению маршрута и информации судна в среде ArcGIS ArcInfo 10.2.2.

Для начала запускаем ArcMap и открываем проект Marine\_Traffic.mxd, содержащий топоснову в системе координат Pulkovo 1942 GK Zone 6N. После чего добавляем изображение маршрута верхним слоем. Так как система координат в MarineTraffic и выбранная нами разные, при нанесении скриншота получается довольно криво, и в итоге приходится подгонять изображение под то что нам нужно (Рисунок 4). Используя пространственную привязку, я подгоняю изображение по нескольким ключевым точкам, например Кронштадт и Большой порт Санкт-Петербурга.

После подгона изображения я оцифровываю маршрут, для большей наглядности и чтобы после убрать скриншот (Рисунок 5). Маршрут судна представляет собой линейный класс пространственных объектов *Marshrut*, находящийся в базе геоданных Лен. обл.. К маршруту я добавляю ключевые точки мониторинга АИС (слой *March\_Point*) с описанием. В описание входят: имя судна — «Name»; скорость в узлах — «Speed (Kn)»; дата маршрута — «Date»;

тип судна — «Type»; время нахождения судна в данной точке — «Time»; IMO и MMSI коды судна.

Таким образом, на карту можно нанести маршруты всех судов, проходящих в акватории Финского залива. Это необходимо для определения потенциальных нарушителей в случае аварийного разлива нефти.

### 2.3 Совмещение с данными экологического мониторинга и моделирования.

#### 2.3.1 Мониторинг экологической ситуации по результатам контроля.

Данные оценки качества воды в акватории финского залива собраны по результатам мониторинга проводимых ФБУ «Балтийская дирекция по обеспечению надзора на море». Данные были представлены в форме протоколов в формате word, таблиц excel и др. Необходимо было конвертировать эти данные в базу геоданных ArcGIS. Данные из различных источников сначала были перенесены в таблицу Excel. Координаты постов наблюдений были получены в формате: градусы, минуты, секунды. Для занесения в базу необходимо было их перевести в десятичные градусы, что было сделано с помощью онлайн калькулятора. (ссылку)

Систематизированные в Excel данные по постам наблюдения показаны на рисунке 6.

По данным из таблицы Excel был создан слой постов наблюдения мониторинга «Большого порта Санкт-Петербурга».

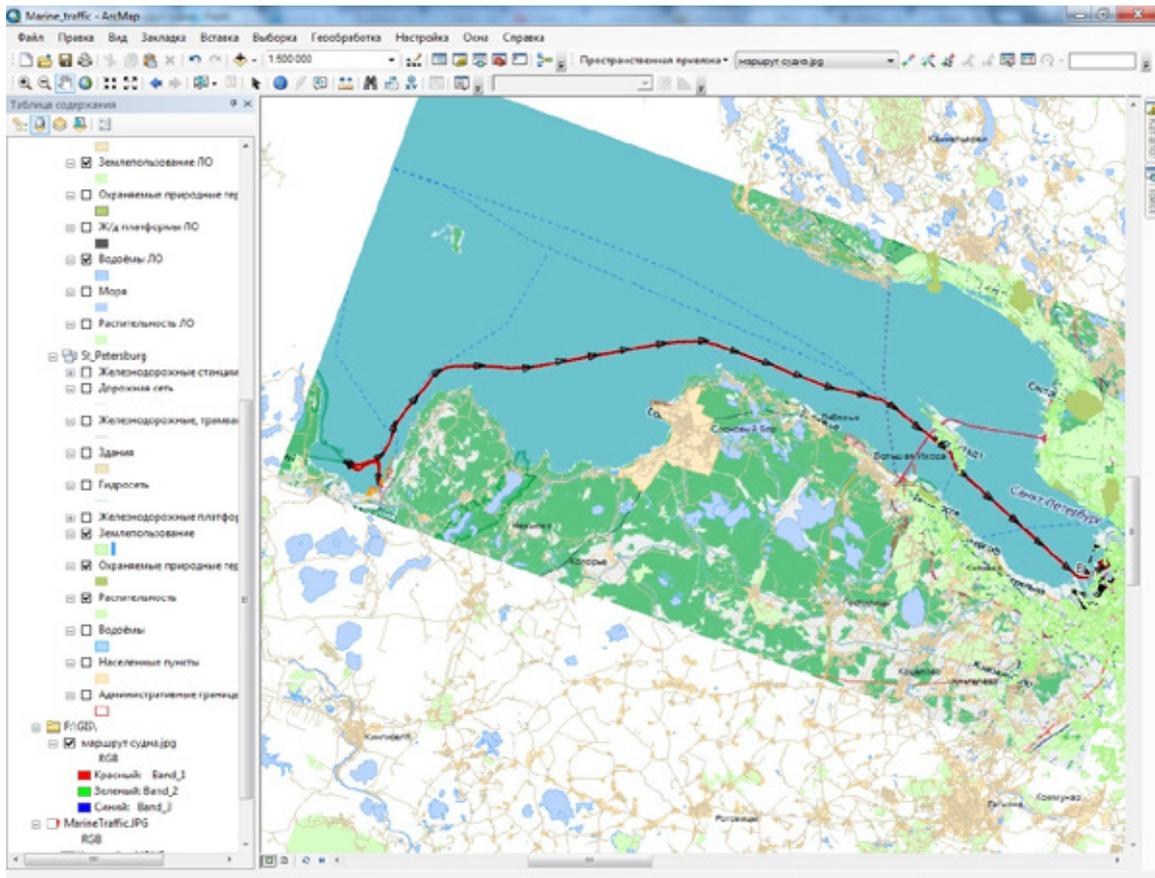


Рис. 4. Привязка растра маршрута в ArcMap

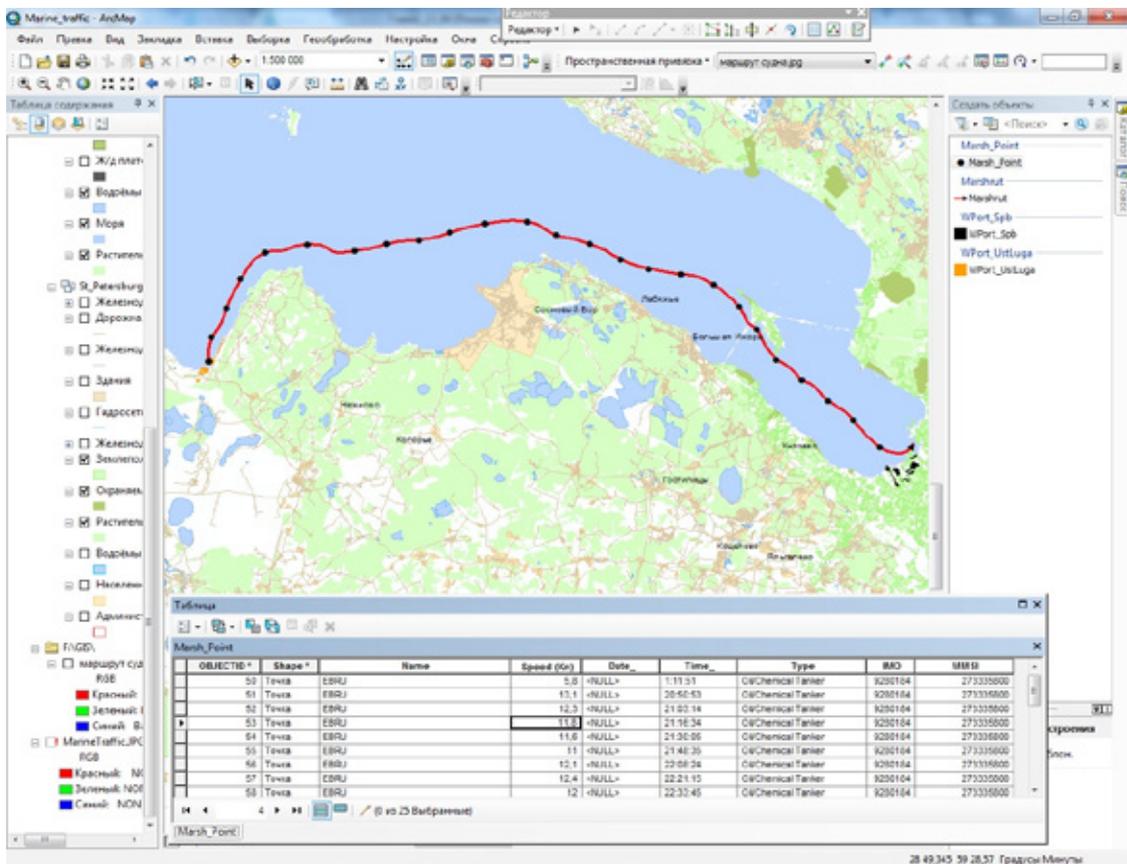


Рис. 5. Оцифровка маршрута в ArcMap

Code	CORD_N	CORD_E	DISTRICT
A1	59,680198	28,405186	Акватория порта Усть-Луга
A2	59,680545	28,423382	Акватория порта Усть-Луга
A3	59,69096	28,418576	Акватория порта Усть-Луга
N1	59,702602	28,428875	Контейнерный терминал в порту "Усть-Луга"
N2	59,720626	28,423382	Контейнерный терминал в порту "Усть-Луга"
N3	59,732415	28,426129	Контейнерный терминал в порту "Усть-Луга"
N4	59,750092	28,440548	Контейнерный терминал в порту "Усть-Луга"
R1	59,799259	28,450848	Бухта Новая Гавань Ручьи
S1	59,702587	28,417203	Акватория порта Усть-Луга
S2	59,71577	28,402096	Акватория порта Усть-Луга
S3	59,729642	28,390423	Акватория порта Усть-Луга
S4	59,749745	28,40347	Акватория порта Усть-Луга
W1	59,780916	28,37463	Подходной канал к устью р.Луга
W2	59,789224	28,345105	Подходной канал к устью р.Луга
W3	59,800297	28,327252	Подходной канал к устью р.Луга
W4	59,824853	28,28056	Подходной канал к устью р.Луга
X1	59,691002	28,297548	Станция отбора проб в Усть-Луге
X2	59,701199	28,350598	Станция отбора проб в Усть-Луге
X3	59,701213	28,304362	Станция отбора проб в Усть-Луге
X4	59,707097	28,331372	Станция отбора проб в Усть-Луге
X5	59,685406	28,347851	Станция отбора проб в Усть-Луге
X6	59,679063	28,392138	Станция отбора проб в Усть-Луге
X7	59,686245	28,402044	Станция отбора проб в Усть-Луге
X8	59,682843	28,413384	Станция отбора проб в Усть-Луге
X9	59,702413	28,387333	Станция отбора проб в Усть-Луге
X10	59,707775	28,413382	Станция отбора проб в Усть-Луге

Рис. 6. Данные постов наблюдения

Результаты контроля качества воды так же были собраны в таблицу Excel. Для каждой точки были введены данные мониторинга за разные промежутки времени.

Для оценки уровня загрязнения значений концентраций нефтепродуктов и взвешенных веществ были подделены на ПДК (Предельно Допустимую Концентрацию)

и нормированные характеристики были представлены в виде диаграмм.

Диаграмма концентрации нефтепродуктов представлена на рисунке 8.

Диаграмма концентрации взвешенных веществ представлена на рисунке 9.

DISTRICT	DATA	PH	Electr	Xpk	BOD	COD	BHA	Azot_ob	Vzvesh	Cu	Zn	Cd	Cr	SPKS	Belpk	Ass	Mylnost
Морской порт Санкт-Петербурга	17.11.2010	7,2	213	30,8	0,022	1,42	0,34	0,5	0,84	0,024	0,043	0,0026	0,0057	2,24	1,484	0,025	27,2
Морской порт Санкт-Петербурга	17.11.2010	7,22	220	38	0,02	1,48	0,34	0,5	8	0,023	0,039	0,0024	0,0062	2,08	0,0736	0,025	23,8
Морской порт Санкт-Петербурга	17.11.2010	6,79	237	40,9	0,02	1,55	0,39	0,5	0,15	0,015	0,007	0,0023	0,0086	1,73	1,532	0,025	26,7
Морской порт Санкт-Петербурга	17.11.2010	6,7	245	33	0,025	1,33	0,55	1,37	25,2	0,014	0,006	0,0023	0,0082	1,82	0,0622	0,025	20,7
Морской порт Санкт-Петербурга	17.11.2010	6,84	248	43,8	0,031	1,65	0,58	1,40	0,34	0,013	0,007	0,0023	0,0081	1,51	1,186	0,025	15,2
Морской порт Санкт-Петербурга	17.11.2010	6,82	252	42,8	0,028	1,62	0,51	1,38	8	0,014	0,009	0,0024	0,0083	1,61	0,0684	0,025	17,7
Морской порт Санкт-Петербурга	17.11.2010	6,57	252	37,4	0,035	1,68	0,55	1,38	0,15	0,011	0,009	0,0023	0,0081	1,78	1,23	0,025	21,9
Морской порт Санкт-Петербурга	17.11.2010	7,38	179	36,7	0,033	1,65	0,61	1,58	4,8	0,01	0,006	0,0024	0,0134	1,98	0,0871	0,025	32,7
Морской порт Санкт-Петербурга	17.11.2010	7,33	158	37,3	0,033	1,71	0,55	1,38	1,82	0,009	0,009	0,0023	0,0081	0,85	1,83	0,025	22,5

Рис. 7. Результаты контроля

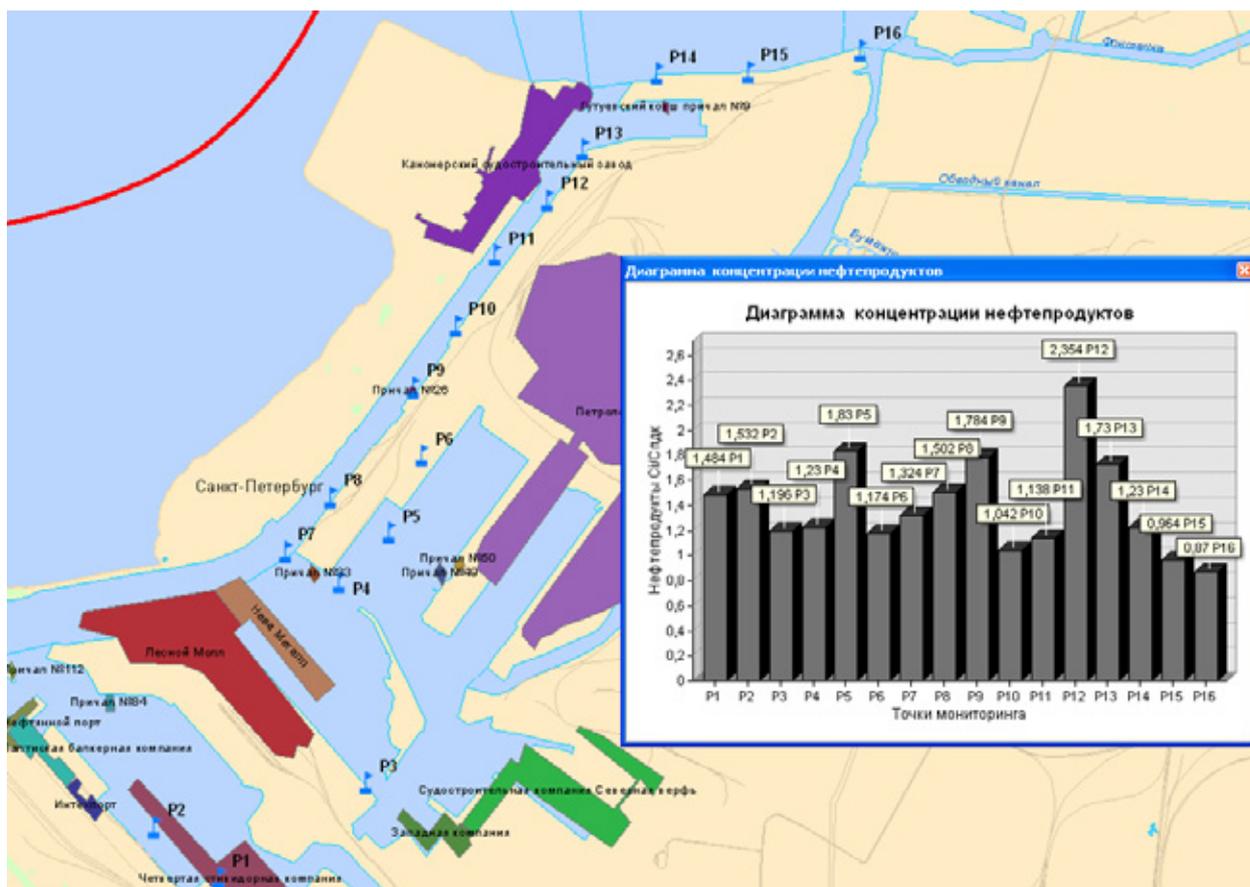


Рис. 8. Диаграмма концентрации нефтепродуктов

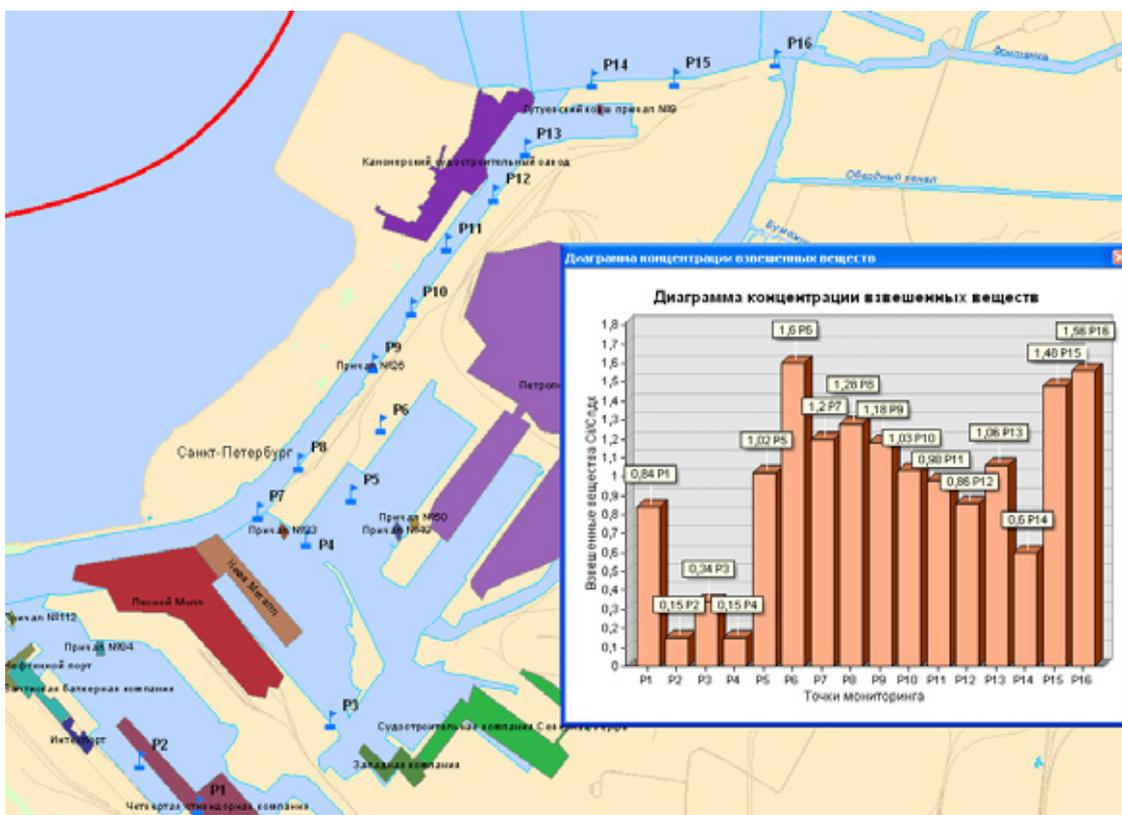


Рис. 9. Диаграмма концентрации взвешенных веществ

Из диаграмм видно, что наибольший уровень загрязнения по нефтепродуктам находится в районе причала № 9 и по взвешенным в причале № 26. Общий уровень загрязнения превышает ПДК в среднем в 2 раза, что говорит о необходимости обеспечения контроля возможных источников загрязнения, то есть нефтехимических судов разгружающих груз в Большом порту Санкт-Петербурге.

### 2.3.2 Моделирование аварийных разливов нефти.

Одним из способов прогнозирования экологической ситуации является математическое моделирование аварийных разливов нефти.

Рассмотрим гипотетическую модель разлива нефти. Для этого выбрав одну из ключевых точек в акватории, мы принимаем её за место аварии, и накладываем на неё модель растекания нефти. (Рисунок 10.).

После этого на карту наносятся маршруты судов, проходящих в акватории незадолго до возникновения аварии (Рисунок 11).

Совмещение модели разлива и маршрутов судов позволит определить источник загрязнения.

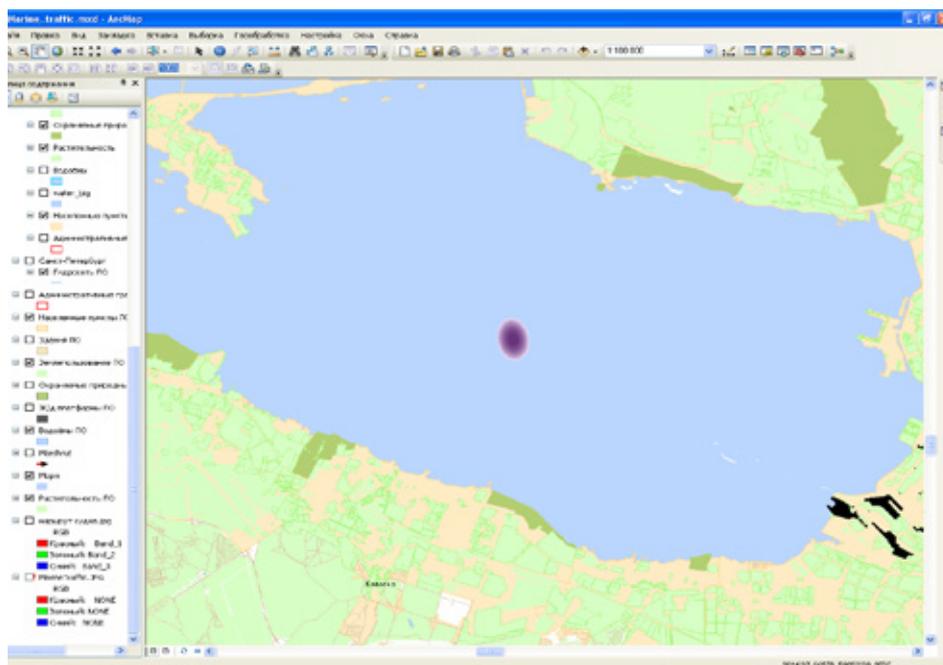


Рис. 10. Модель разлива нефти в результате аварии

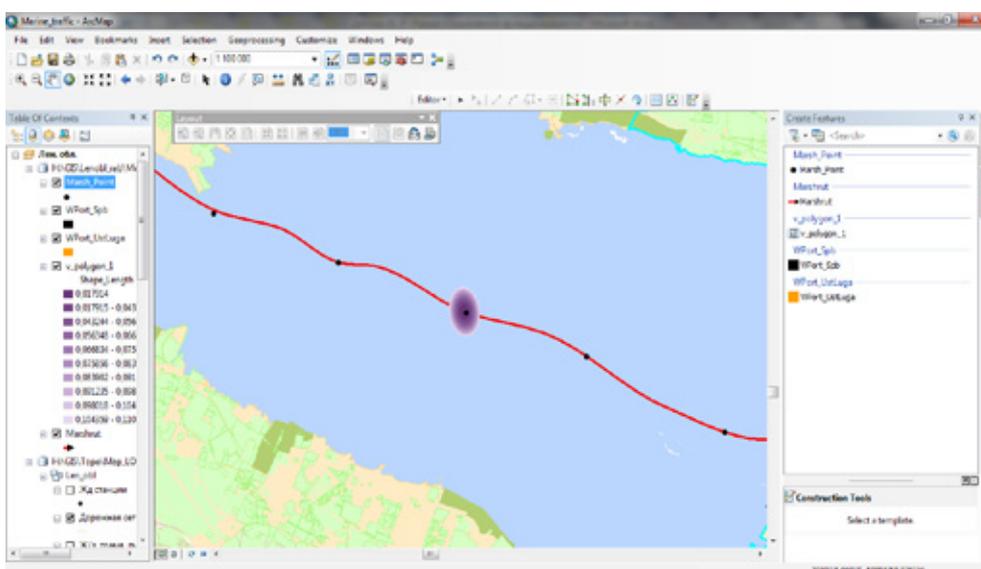


Рис. 11. Наложение модели на маршрут

### Заключение

В работе были рассмотрены картографические сервисы и их применение для решения экологических задач.

Произведен анализ данных мониторинга экологической ситуации в акватории Большого порта Санкт-Петербург, показавший значительное загрязнение нефтепродуктами и необходимость выявления виновников загрязнения.

Разработан подход получения маршрутов движения нефтяных танкеров при помощи сервиса MarineTraffic и представления их как векторное изображение в приложении ArcMap платформы ArcGIS for Desktop 10.2.2.

Таким образом, на карту можно нанести маршруты всех судов, проходящих в акватории Финского залива. Далее было принято гипотетическое условие — авария нефтяного судна. Зная примерное место разлива и время, было найдено судно — виновник аварии, благодаря возможностям сервиса MarineTraffic. Стали известны данные судна, его размеры, тоннаж, осадка и т. д. Благодаря полученным данным была построена модель разлива нефти и нанесена на карту, наряду с маршрутом, в приложении ArcMap. Это позволит посчитать границы разлива, провести анализ экологической проблемы и приступить к её решению.

### Литература:

1. Аналитика // Экология — Крупнейшие разливы нефти в истории человечества [Электронный ресурс] — <http://neftegaz.ru/analysis/view/7509>
2. Разлив нефтепродуктов на Волге [Электронный ресурс] — [http://ria.ru/trend/volga\\_nefteproducty\\_20090713](http://ria.ru/trend/volga_nefteproducty_20090713)
3. Движение судов он-лайн в реальном времени (АИС) [Электронный ресурс] — <http://www.answer-logistic.ru/online-besplatnye-servisy/dvizhenie-sudov-on-lajn-ais.html>
4. Откуда берутся позиции судов [Электронный ресурс] — <http://www.ships.com.ua/>
5. Экологическая опасность увеличения транспортировки нефти через Финский залив [Электронный ресурс] <http://www.svoboda.org/content/article/109293.html>
6. Краткий обзор ArcMap [Электронный ресурс] — <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/main/map/a-quick-tour-of-arcmap.htm>
7. Браун, Л. А. История географических карт. — Москва: Центрполиграф, 2006. — 479 с.
8. Журкин, И. Г., Шайтура С. В. Геоинформационные системы. — Москва: Кудиц-пресс, 2009. — 272 с.
9. Дейт, К. Дж. Введение в системы баз данных Introduction to Database Systems. — 8-е изд. — М.: Вильямс, 2005. — 1328 с.
10. «Обзор онлайн-картографических сервисов» Светлана Шляхина. 3 марта 2010 года [Электронный ресурс] — [http://www.3dnews.ru/software/online\\_maps\\_review](http://www.3dnews.ru/software/online_maps_review)

## Влияние демпфера и согласующего слоя на работу электроакустического тракта в непрерывном режиме

Кокнаев Александр Сергеевич, студент;  
Селюк Никита Николаевич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе рассматривается влияние демпфера и согласующего слоя на работу электроакустического тракта в непрерывном режиме работы. Моделирование производилось в специализированном программном пакете MicroSim Design Lab (PSPice).*

**Ключевые слова:** пьезопреобразователь, согласующий слой, демпфер, электроакустический тракт, непрерывный режим, PSPice

Неотъемлемой частью любого ультразвукового дефектоскопа является электроакустический преобразователь, с его помощью излучаются и принимаются ультразвуковые волны. Свойства электроакустического преобразователя во многом определяют характеристики дефектоскопа в целом. Электроакустический тракт, в частности преобразователь состоит из различных слоев и

материалов. Свойства слоя и материала так же влияют на характеристики дефектоскопа.

### 1. Методы расчета пьезопреобразователей

— Метод решения волновых уравнений, которые описывают колебания пьезопластин;

— метод схем-аналогов.

Первый метод требует решения системы, которая состоит из большого числа уравнений даже при небольшом числе слоев, составляющих тракт. В большинстве случаев наиболее удобным является использование второго метода (эквивалентных схем-аналогов), основанного на использовании принципа электромеханических аналогий и расчетов с применением теории электрических цепей. Также второй метод удобно реализовать при помощи специализированного программного пакета MicroSim Design Lab (PSpice).

### 1.1 Применение метода схем-аналогов в программной среде PSpice.

Есть несколько типов схем-аналогов пьезопреобразователей. Бывают в виде четырех и шестиполюсников. Наиболее часто в литературе используется схема-аналог, предложенная Л. Я. Гутиным и У. Мезоном.

Для работы со схемами-аналогами существует пакет электротехнических программ MicroSim Design Lab (PSpice), но по ходу работы обнаружилось, что оперировать частотнозависимыми сопротивлениями в это пакете не представляется возможным. В данной программе не предусмотрено задание величины сопротивления резисторов, зависимой от частоты.

Поэтому вместо схемы Гутина-Мэзона мы использовали схему М. Рэдвуда, в которой элементов, показывающим акустические свойства пьезопластины, является отрезок длинной линии.

### 1.2 Расчет электроакустического тракта.

Вычислим необходимые параметры для построения схем-аналога в программной среде PSpice.

Под электроакустическим трактом понимается область среды, в которой осуществляется интересующее нас взаимодействие ультразвука и вещества или объекта. Средой является слой воды, сам преобразователь пьезокварцевый.

## 2. Модель электроакустического тракта в непрерывном режиме

В натуральных условиях в такой схеме при непрерывном режиме работы будут происходить многократные отражения сигнала между излучателем и приемником. Чтобы избежать таких многократных отражений в нашей модели, в нее введен источник напряжения управляемый напряжением (E2). Резистор R10 необходим для согласования с выходом линии задержки T3.

## 3. Влияние акустического сопротивления демпфера на работу тракта

АЧХ преобразователя и форма импульсного сигнала на выходе тракта зависят от степени демпфирования пьезопреобразователей. Рассмотрим АЧХ при разных сопротивлениях демпфера.

На рисунках 3 и 4 представлены зависимости максимальной амплитуды сигнала от акустического сопротивления демпфера и ширины частотной характеристики от акустического сопротивления демпфера. Видно, что при увеличении акустического сопротивления демпфера максимальная амплитуда уменьшается, а ширина частотной характеристики напротив увеличивается.

Таблица 1. Данные для работы электроакустического тракта

Параметр	Тип преобразователя
	пьезокварцевый
Площадь пьезопластины, $S$ (м <sup>2</sup> )	$3,14 \cdot 10^{-4}$
Пьезопостоянная, $e_{ii}$ (Кл/м <sup>2</sup> )	0,17
Коэффициент трансформации, $K$	0,038
Собственная емкость, $C$ (Ф)	$8,7 \cdot 10^{-12}$
Сопротивление нагрузки (волновое сопротивление среды), $R_1$ (Ом)	471 (вода)
Акустическое сопротивление преобразователя, $Z_0$ (Ом)	4776
Время задержки, $TD$ (с)	$250 \cdot 10^{-9}$
Частота (МГц)	2
Диаметр пластины (мм)	20
Пересчитанное $Z_0, Z^*$ (Ом)	3310000
Пересчитанное $R_1, R_1^*$ (Ом)	326200 (вода)

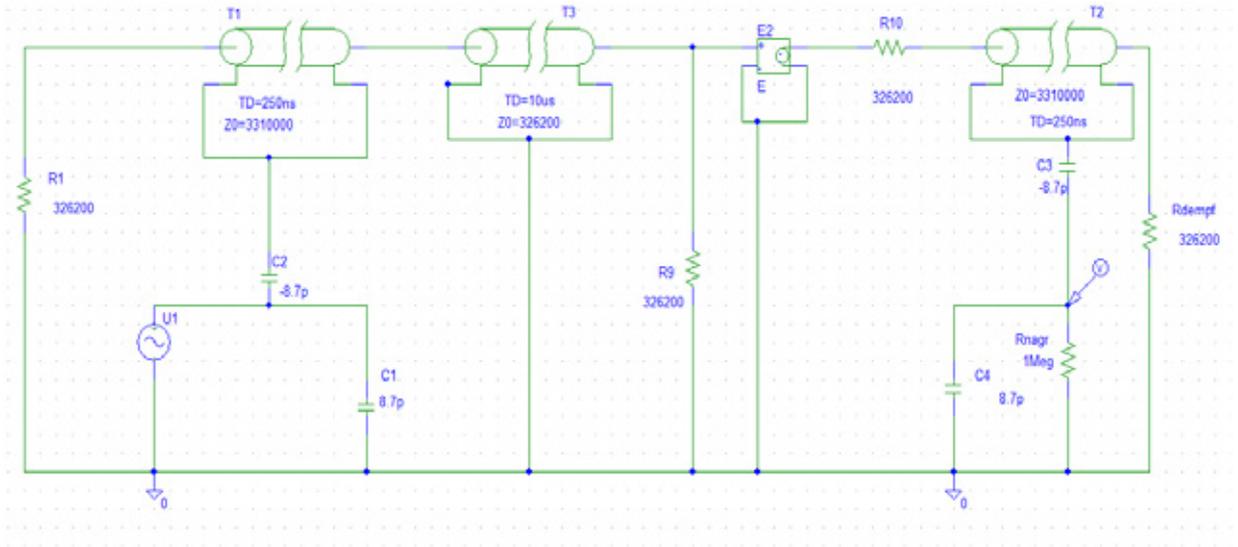


Рис. 2. Электроакустический тракт в непрерывном режиме

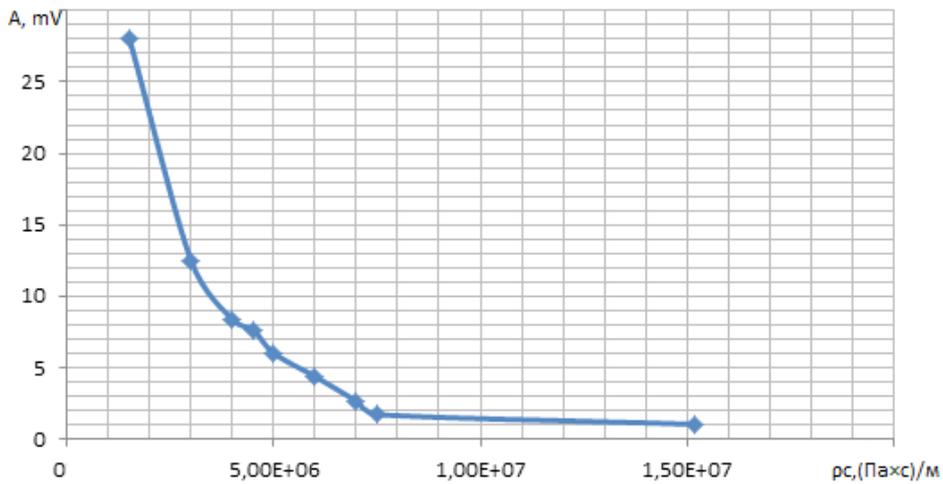


Рис. 3. Зависимость максимальной амплитуды сигнала от акустического сопротивления демфера

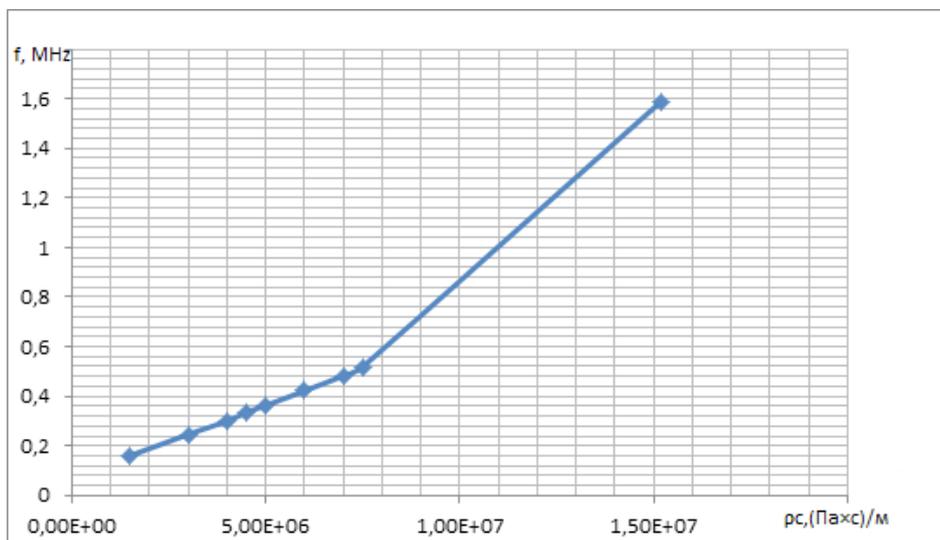


Рис. 4. Зависимость ширины частотной характеристики на уровне (-3дБ) от акустического сопротивления демфера

#### 4. Влияние акустического сопротивления согласующего слоя на работу тракта

Амплитуду и длительность сигнала на выходе электроакустического тракта можно изменять не только меняя акустическое сопротивление демпфера, но и вводя согласующие слои между пьезопластиной и акустической нагрузкой (средой).

Теоретически при работе в непрерывном режиме оптимальное значение акустического сопротивления согласующего слоя определяется как  $\sqrt{Z_{\text{преоб}} \times Z_{\text{слоя}}}$ . Однако, как показано в работе [15] при работе с короткими импульсами целесообразно использовать более низкое значение сопротивления согласующего слоя.

Если сравнивать рисунки 5 и 6 то видно, что при  $\rho c = 3 \times 10^6$  (Па×с)/м. получается более закономерная

форма спада импульса, а при  $\rho c = 4 \times 10^6$  ((Па×с)/м). спад колебаний в конце импульса не монотонен, что может вызывать затруднения при работе аппаратуры.

#### Заключение

Моделирование электроакустического тракта с помощью специализированного программного пакета PSpice доказало, что он может быть использован для расчета пьезопреобразователей с помощью метода схем-аналогов. В данном методе мы использовали схему Редвуда, которая строится из отрезков длинных линий.

Расчет в программном пакете PSpice наиболее удобный, менее трудоемок и наглядно показывает сущность метода. Данная программа позволит за короткое время посмотреть множество вариантов и сочетаний свойств эле-

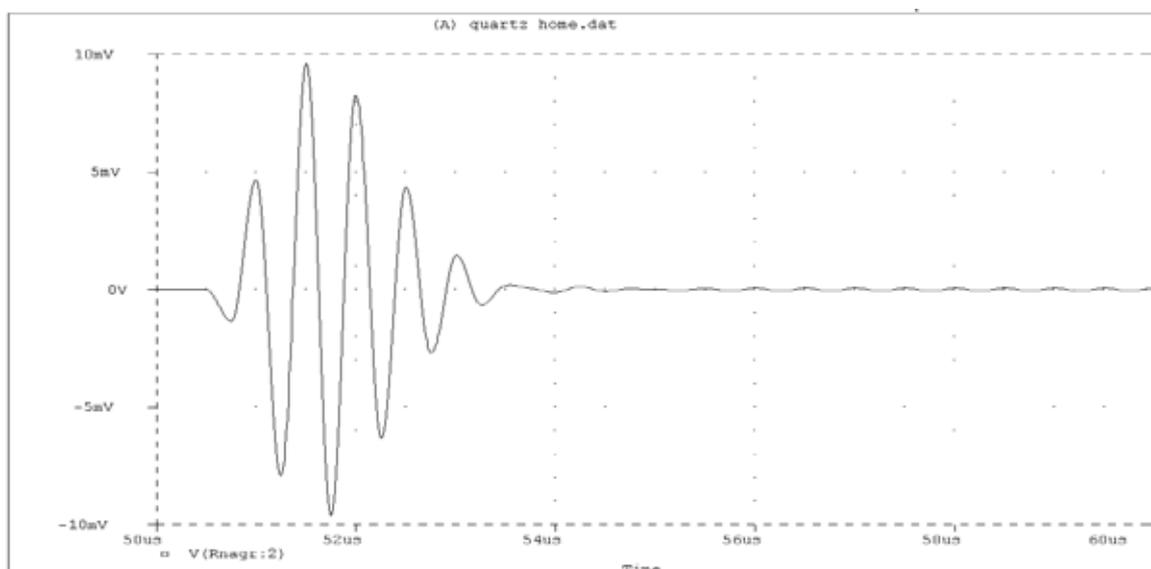


Рис. 5. Короткий импульс при акустическом сопротивлении согласующего слоя  $\rho c = 3 \times 10^6$  (Па×с)/м

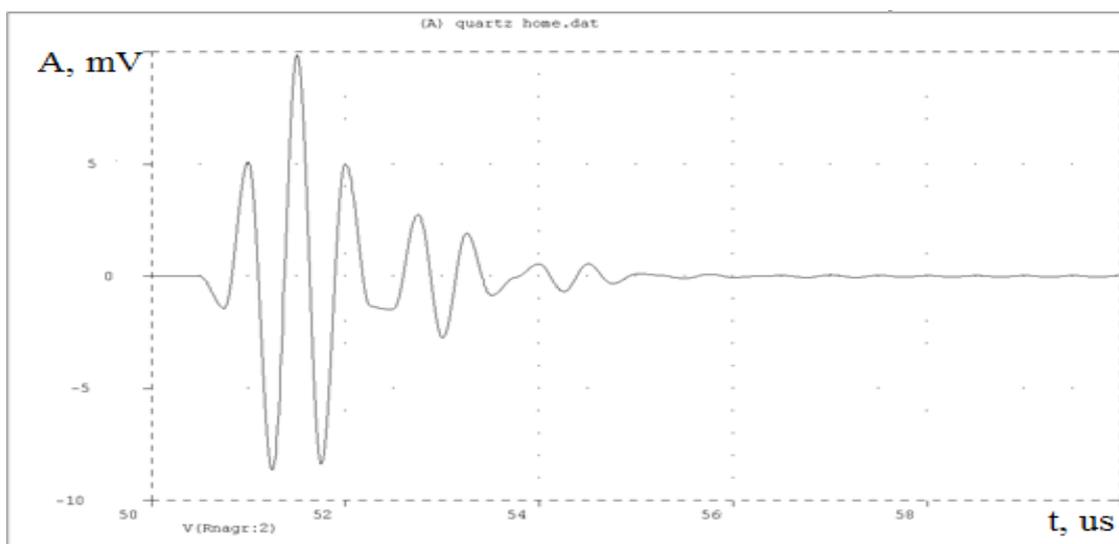


Рис. 6. Короткий импульс при акустическом сопротивлении согласующего слоя  $\rho c = 4 \times 10^6$  (Па×с)/м

ментов пьезопреобразователя и получить оптимальные сочетания свойств и характеристик.

Приведенные в работе расчеты позволяют рекомендовать использовать в установках с иммерсионным электроакустическим трактом для получения коротких акустиче-

ских импульсов, используя одновременно демпфирование и согласующие слои.

Результаты также показали целесообразность использования моделирования и расчета параметров электроакустических трактов программные средства на основе пакета PSpice.

#### Литература:

1. Голубев, А. С. Преобразователи ультразвуковых дефектоскопов / Л.: 1986.
2. Теория и расчет электроакустических преобразователей / Сост.: Г. С. Габидулин. Л.: 1968.
3. Харитонов, А. В. Теория электроакустических преобразователей / Л.: 1978.
4. Харитонов, А. В. Электрические схемы-аналоги электроакустических преобразователей / Л.: 1979.
5. Голубев, А. С., Иванов В. Е., Яковлев Л. А. О преобразовании упругой энергии в электрическую при отражении ультразвуковой волны от пьезовибратора // Акустический журнал, 1965, т. XI, с. 52–56.
6. Меркулов, Л. Г., Федоров В. А., Яковлев Л. А. О полосе пропускания ультразвуковой линии задержки с многократными отражениями / Л.: Известия ЛЭТИ, 1971, вып. 95, с. 17–22.
7. Хайнеман, Р. PSPICE. Моделирование работы электронных схем / М: ДМК Пресс, 2002.
8. Разевиг, В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0 / М.: «Солон-Р», 2000.
9. Лепендин, Л. Ф. Акустика / М: Высшая школа, 1978.
10. Электроакустические преобразователи / Сост.: А. Г. Кузьменко, Л. А. Никифоров. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001.
11. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий / Под ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 1976.
12. Скучик, Е. Основы акустики / М.: Мир, 1976.
13. Домаркас, В. Й., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи / Вильнюс: Минтис, 1975.
14. Пьезоэлектрические преобразователи. Справочник / Л.: Судостроение, 1984.
15. Коновалов, С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. — СПб.: Политехника, 2014.

## Исследование радиационных нагрузок малых космических аппаратов на солнечно-синхронных орбитах в программном пакете Omere, Srim

Кокнаев Александр Сергеевич, студент;

Селюк Никита Николаевич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе исследовалась радиационная стойкость внешней защиты космических аппаратов на солнечно-синхронных орбитах. Использование малых космических аппаратов и наноспутников на низких солнечно-синхронных орбитах позволяет значительно улучшить качество навигации объектов.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, радиационная стойкость, солнечно-синхронные орбиты, заряженные частицы, поглощенная доза

Одним из наиболее перспективных направлений в проектировании и электронике является разработка малых космических аппаратов (КА). Не высокие весовые и габаритные размеры позволяют значительно снизить затраты на запуск таких КА. Однако в условиях импортозамещения использование зарубежных радиационно-стойких комплектующих накладывает ограничение на их применение в современных малых КА — наноспут-

никах (весом от 1 до 10 кг). Поэтому является актуальной задача оценки и прогнозирования радиационной стойкости внешней оболочки (защиты), препятствующей прохождению заряженных частиц космического пространства и защищающей электронные компоненты (ЭК) КА.

### 1. Обстановка на солнечно-синхронных орбитах.

Космические аппараты, находящиеся в космическом пространстве, движутся по различным траекториям — орбитам. Перемещение по ним происходит по инерции, и при этом на космический аппарат воздействует только гравитация Земли.

### 1.1 Конструктивные и функциональные особенности малых космических аппаратов.

По современной классификации космические аппараты делятся по своей массе на три основных группы. Большие спутники имеют массу больше 10 тонн. Спутники последней весовой категории подразделяются на следующие группы: мини, вес которых составляет 100–1000 кг, микро массой 10–100 кг, нано, не превышающие весовые габариты в 10 кг и пико до 1 кг.

По мере совершенствования космических технологий, массы и размеры служебных и целевых систем космических аппаратов становятся все меньше, что приводит к снижению потребляемой ими энергии. Во многих случаях те задачи, которые решались решаются до сих пор многотонными космическими аппаратами, способны выполнять спутники, которые легче и меньше их в десятки раз.

Малые космические аппараты обладают многими преимуществами перед многотонными спутниками. Важным пунктом является то, что малые спутники позволяют значительно увеличить скорость получения данных наблюдения потребителем за счет создания необходимой по численности группировки небольших аппаратов.

### 1.2 Влияние факторов космического пространства на малые космические аппараты.

В реальных условиях ионизирующие излучения имеют обычно сложное распределение частиц по энергиям — энергетический спектр. Уровень воздействия проникающей радиации зависит от времени воздействия излучения с данной плотностью потока на вещество и выражается числом частиц, прошедших через площадку в  $1 \text{ см}^2$  за время облучения интегральным потоком. Другими характеристиками воздействия на вещество излучения со сложным энергетическим спектром являются поглощенная доза и коэффициент запаса. Поглощенная доза излучения — это количество энергии, переданное веществу, коэффициент запаса — величина, демонстрирующая способность защиты космического аппарата выдерживать воздействующие на нее нагрузки свыше предельной.

## 2. Конструкция малого космического аппарата

Космический аппарат может состоять из множества дорогостоящих компонентов, которые могут иметь как небольшие, так и крупные размеры. Поэтому следует рационально подходить к форме спутника. В данной работе рассматривались и сравнивались каркасы оболочек в виде куба и шестиугольной призмы. Размеры граней были выбраны 30 и 40 см. В качестве материала оболочки корпуса используется алюминий. Данный выбор обусловлен легкостью металла, его дешевизной, приемлемыми поглоща-

ющими способностями и доступностью. Для таких конфигураций была рассчитана масса внешней защиты из алюминия спутника для трех толщин оболочки: 1 мм, 2 мм, 3,5 мм.

Исходя из полученных данных, можно сказать, что защита спутника в форме куба с гранью в 40 см и толщиной в 1 мм — это 26% от всего веса спутника. В том случае, когда мы увеличиваем толщину защиты до 2 мм, оболочка будет вносить вклад в массу спутника на 52%, т. е. увеличивается на 26% по сравнению с первым случаем. При увеличении толщины защиты до 3,5 мм, ее масса будет занимать 91%, получается, что при переходе с 2 мм на 3,5 мм защита становится тяжелее на 39%.

Если использовать внешнюю защиту в форме куба с гранью в 30 см видно, что масса обшивки становится в 1,8 раз легче, что позволяет использовать защиту в 3,5 мм. В таком случае масса обшивки составит 51% от общей массы, что даже меньше, если использовать оболочку толщиной в 2 мм и грань куба взять 40 см.

Использование обшивки в форме шестиугольной призмы и гранью в 40 см приводит к тому, что масса оболочки составит 34,23% (1 мм), 68,5% (2 мм), 120% (3,5 мм), это означает что максимальной толщиной защиты будет 2 мм и вес составит 6,85 кг, что вносит весомый вклад в массу спутника, однако допустимо в зависимости от массы внутренних комплектующих космического аппарата.

Используя призму с гранью в 30 см можно добиться снижения массы почти в 2 раза и если использовать защиту в 3,5 мм, то вес такой оболочки составит 6,7 кг, что является значительным вкладом в общую массу КА. Такую защиту использовать можно, однако нужно добиться, чтобы вес внутренних комплектующих не превышал 3,2 кг.

В итоге, можно сказать, что оптимальным вариантом будет использовать алюминиевую оболочку в форме шестиугольной призмы с гранью в 30 см, т. к. даже при максимальной толщине защиты — 3,5 мм, вес обшивки будет составлять 67%, что допустимо, однако придется более точно обдумывать состав «начинки» КА. При использовании такой формы спутника объем будет достигать  $0,07 \text{ м}^3$ , если же требуется максимальная защита, тогда наилучшим вариантом будет использовать оболочку из алюминия в форме куба с ребром в 30 см, однако объем такой конструкции будет в 2,6 раз меньше ( $0,027 \text{ м}^3$ ), относительно шестиугольной призмы.

## 3. Исследование поглощенной дозы обшивкой спутника

Рисунок 1. демонстрирует поглощающие способности алюминиевой защиты различных толщин. С увеличением толщины оболочки суммарная поглощенная доза снижается. 3,5 мм алюминия позволяют защитить не радиационно-стойкие компоненты, предельная поглощенная доза которых составляет  $10 \text{ кРад}$ .

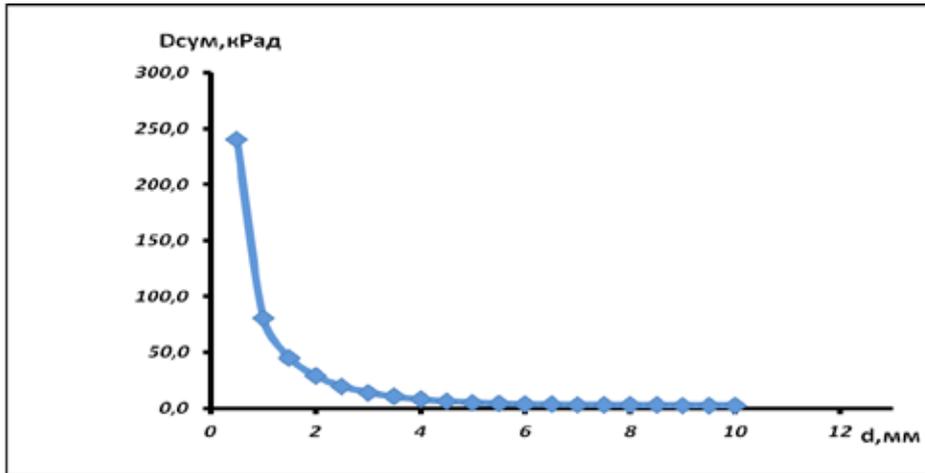


Рис. 1. Зависимость суммарной поглощенной дозы от толщины защиты

#### 4. Моделирование прохождения протонов через защиту космического аппарата

В данной части работы были исследованы интегральные спектры частиц, промоделированные с помощью программы OMERE. Благодаря программному пакету было получено распределение протонов по энергиям от 0,1 до 300 МэВ для высот в диапазоне 550–950 км и толщин. С увеличением высоты орбиты заметен рост концентраций частиц, создающих радиационные нагрузки на космический аппарат, а поглощенная доза снижалась.

С помощью программного пакета SRIM удалось выяснить, какая доля ионизирующего излучения пройдет сквозь корпус изучаемого объекта. В первом случае исследовались взаимодействия частиц со стандартной алюминиевой защитой толщиной в 1 мм, 2 мм и 3,5 мм (проиллюстри-

ровано на рисунках 2, 3, 4.). Очевидно, что объект с самой большей толщиной оболочки успешнее предотвращает прохождение заряженных частиц через его корпус, однако в дальнейшем будет происходить только исследование обшивки толщиной в 2 мм, так как малые космические аппараты имеют ограничение по весу. В итоге было установлено, что оболочка толщиной в 1 мм поглощает 91,1% от всего потока частиц, 2 мм — 92,7%, 3,5 мм — 94,2 мм. С ростом высоты доля поглощенного ионизирующего излучения снижается.

#### Заключение

В ходе работы было проведено исследование влияния толщины защиты на суммарную поглощенную дозу обшивкой спутника. Также изучено влияние толщины за-

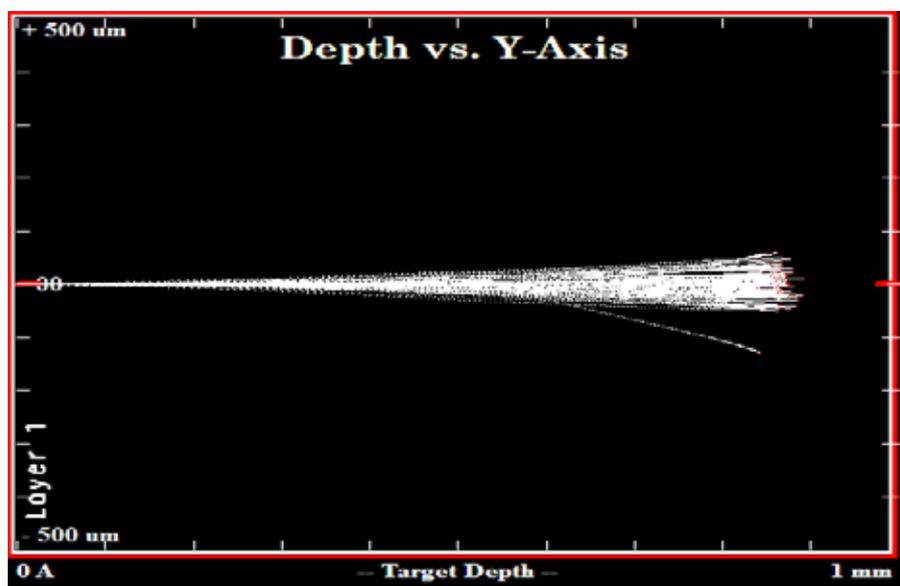


Рис. 2. Прохождение частиц с энергией 12 МэВ через защиту толщиной в 1 мм

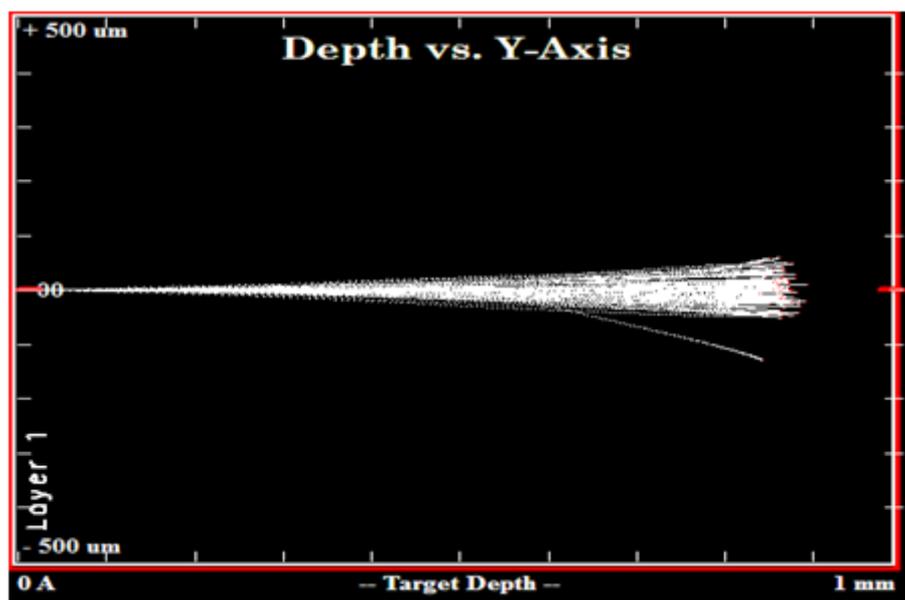


Рис. 3. Прохождение частиц с энергией 12 МэВ через защиту толщиной в 2 мм

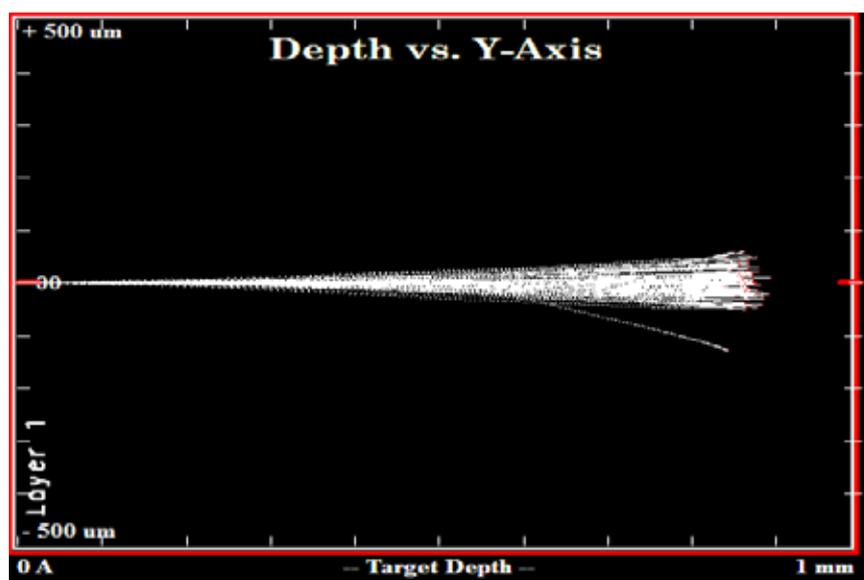


Рис. 4. Прохождение частиц с энергией 12 МэВ через защиту толщиной в 3,5 мм

щиты на массу исследуемого объекта. С увеличением толщины защиты суммарная поглощенная доза уменьшается с 240 кРад до 2,5 кРад. Полному поглощению ионизиру-

ющего излучения соответствует обшивка спутника толщиной в 3,5 мм, однако при этом масса внешней оболочки составит до 90 % от общей.

Литература:

1. С. А. Хейнман. Научно-техническая революция сегодня и завтра. М.: Политиздат, 1977. 328 с.
2. Общественно-аналитическое онлайн-медиа Русская Планета [Электронный ресурс] / <http://rusplt.ru/> по состоянию на 3.04.2016.
3. Л. Мироненко, В. Юдинцев. Повышение радиационной стойкости интегральных схем // Журнал «Новые технологии». 2012, вып. (№) 8. с. 74–87.
4. Unnatural [Электронный ресурс] / <http://unnatural.ru/> по состоянию на 15.04.2016.
5. MediaSat ТВ, Радиовещание и Телекоммуникации [Электронный ресурс] / <http://mediasat.info/> по состоянию на 15.04.2016.

6. Мир Знаний [Электронный ресурс] / <http://mir-znaniy.com/> по состоянию на 15.04.2016.
7. А. А. Акимов, А. А. Гриценко, Р. Н. Юрьев. Солнечно-синхронные орбиты — основные возможности и перспективы // Журнал «Инфосфера». 2015, вып. (№) 68. с. 18–20.
8. И. В. Гецелев, М. В. Подзолко, И. П. Безродных, В. Т. Семенов, В. М. Фадеев, В. П. Ходненко. Влияние ионизирующих излучений в околоземном пространстве на КА «МЕТЕОР-М» № 1 // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009, том 112, (№) 5. с. 29–34.
9. А. И. Акишин, Л. С. Новиков. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. М.: Знание, 1983. 64 с.
10. М. Ю. Овчинников. Малые мира сего // Журнал «Компьютерра». 2007, вып. (№) 5. с. 37–43.
11. К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ, 2014. 340 с.
12. Ziegler, J.F., Biersack J.P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. Oxford, NY.: Pergamon Press, 1985.

## Исследование возможности применения рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного спектрометра БРА-135F в цементной промышленности

Колодинов Владимир Павлович, студент,  
Нерода Алексей Сергеевич, студент,

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе исследуется спектрометр БРА-135F на возможность применения в цементной промышленности. Предложена методика определения элементного состава цементов и продуктов цементного производства (клинкер, сырьевая смесь, песок, известняк).*

**Ключевые слова:** *рентгенофлуоресцентный анализ, пробоподготовка, энергодисперсионный спектрометр, режимы измерений, уравнения связи, контрастность, предел обнаружения*

В последние годы в цементной промышленности проявилась отчетливая тенденция совершенствования управления производственным процессом на основе определения химического состава сырьевых материалов, клинкера и готового цемента. Основная проблема заключается в том, что отсутствует аттестованная методика определения элементного состава на энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных спектрометрах. Поэтому внедрение спектрометра БРА-135F в строительную отрасль, обеспечит стабильность при работе на всех этапах производства, за счет экспрессного элементного анализа цемента, а также сэкономит сырьевые материалы и ресурсы предприятий.

### 1. Выбор режимов измерений

Режимы измерений подбираются таким образом, чтобы на характеристической линии каждого элемента, контрастность имела максимальное значение, а предел обнаружения минимальное. Общая загрузка детектора не должна превышать 30% (данный показатель регулируется значением тока).

С целью выбора оптимальных режимов измерений для определяемых элементов, пределы обнаружения и контрастность находятся по формуле:

$$C_{\text{пр}} = \frac{3C_{\text{хим}}}{\sqrt{KtI_{\text{л}}}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{хим}}$  — аттестованное значение массовой доли компонента в образце %,  $t$  — время экспозиции, с,  $I_{\text{л}}$  — интенсивность линии компонента, имп/с,  $K$  — контрастность.

$$K = \frac{I_{\text{л}} - I_{\text{ф}}}{I_{\text{ф}}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{ф}}$  — фоновая интенсивность, имп/с;

Проведенные измерения и расчеты показали, что оптимальными являются следующие режимы, представленные в табл. 1. В этой таблице указаны определяемые элементы, напряжение и ток на трубке, выбранные первичные фильтры, время экспозиции и значение мертвого времени детектора.

Таблица 1. Режимы измерения

№ режима	Определяемые элементы	Условия измерения			
		Напряжение на трубке, кВ	Ток трубки, мкА	Фильтр	Время экспозиции, с
1	Mg, Al, Si, K	5	400	-	100
2	Ca, Fe	20	40	3	50
3	PI	30	40	6	50

В табл. 2 представлены первичные фильтры спектрометра БРА-135F, у которых указана толщина и плотность.

Таблица 2. Параметры фильтров

№	Материал	Z	n, мкм	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	-	-	-	-
2	Ниобий	41	2	8570
3	Стронций углекислый (SrCO <sub>3</sub> )	38	100	3785
4	Цирконий	40	40	6506
5	Кадмий	48	50	8650
6	Титан	22	1500	4540

Третий режим необходим для регистрации линии некогерентного рассеянного на пробе характеристического излучения анода трубки. Данная линия является оптимальным «внутренним стандартом» для учета матричного эффекта при большом разнообразии химического и минералогического состава градуировочных и анализируемых образцов.

Определение на третьем режиме кальция и железа не оправдано из-за снижения пределов их обнаружения и ухудшения градуировочной зависимости.

## 2. Описание методики измерений в программном комплексе «КЭДА-Е»

Программный комплекс «КЭДА-Е» имеет функции управления прибором, функции настройки, средства проведения качественного и количественного анализа. Комплекс имеет защиту от несанкционированного доступа, который может привести к искажению результатов измерений.

Качественный анализ осуществляется по результатам измерения спектров исследуемых образцов, пользователю предоставляется возможность идентифицировать пики флуоресцентного излучения атомов химических элементов, арифметически и графически преобразовать спектры, выделить фон, сохранить спектр.

Количественный анализ осуществляется по способам множественной регрессии, стандарта-фона; позволяет пользователю упорядочить и группировать исходную информацию, необходимую для решения конкретной аналитической задачи и характеризующую условия измерений, параметры для расчетов и т. д.

Программа «Количественный анализ» позволяет рассчитывать содержания определяемых элементов способами множественной регрессии (Лукас-Туса), стандарта-фона и теоретических поправок.

Основными эффектами, определяющими интенсивность рентгеновской флуоресценции  $I_i$ , являются непосредственное возбуждение определяемого элемента  $i$  тормозным и характеристическим излучением рентгеновской трубки, и его дополнительное возбуждение рассеянным и флуоресцентным излучением прочих элементов  $j$ , присутствующих в пробе. Вклад в величину  $I_i$  дают эффекты высшего порядка. Каждый из этих эффектов является функцией состава пробы и условий возбуждения рентгеновской флуоресценции.

Таким образом, непосредственно измеряемое значение  $I_i$  является сложной функцией спектрального состава первичного излучения, состава пробы и параметров спектрометра, которая не может быть решена в аналитическом виде относительно концентраций определяемых элементов. В программе для расчета концентраций используется полуэмпирическая аппроксимация общего вида:

$$C_i = \left( A_0 + \sum_{j=1}^n (A_{ij} * F_j) \right) * \left( 1 - \sum_{j=1}^n [K_{ij} * (C_j - C_j^{st})] \right), \quad (3)$$

где  $A_0, A_{ij}$  — определяемые в ходе градуировки эмпирические коэффициенты, учитывающие приборные факторы (фон, наложение спектральных линий) и межэлементные влияния,  $K_{ij}$  — теоретические дифференциальные коэффициенты влияния, учитывающие эффекты поглощения первичного и флуоресцентного излучения пробой и (частично) дополнительное возбуждение; коэффициенты влияния представляют собой относительные частные производные от интенсивности определяемого элемента по концентрациям влияющих элементов для гипотетического стандартного образца и могут быть выражены как:

$$K_{ij} = \frac{1}{I_i^{st}} \left( \frac{\partial I_i^{st}}{\partial C_j^{st}} \right), \quad (4)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{I_i^{st}} \left( \frac{\partial I_i^{st}}{\partial C_i^{st}} \right) - \frac{1}{C_i^{st}}, \quad (5)$$

$C_i, C_j$  — содержания элементов  $i, j$  в анализируемом образце;

$$F_j = \begin{cases} I_j \\ I_i * I_j \\ I_i / I_p \\ I_i / \sqrt{I_p} \end{cases}, \quad (6)$$

$C_j^{st}$  — содержания элементов  $j$  в гипотетическом стандартном образце, для которого рассчитывались теоретические коэффициенты влияния,  $F_j$  — факторы регрессионной части уравнения, определяемые либо как интенсивности  $I_j$  влияющих элементов, либо как произведение интенсивности определяемого элемента  $I_i$  на интенсивность влияющего элемента  $I_j$  (регрессионное уравнение Лукас-Туза), либо как частное от деления интенсивностей, где в качестве делителя используется интенсивность рассеянного излучения  $I_p$  с энергией 12,15 кэВ (если это целесообразно, энергия рассеянного излучения может быть изменена), или квадратный корень из интенсивности рассеянного излучения с той же длиной волны (способ стандарта-фона).

Интенсивности, используемые в уравнении связи (3), предварительно корректируются на просчеты и аппаратный дрейф.

Градуировка заключается в выполнении измерений ГО и расчета градуировочных коэффициентов (ГК). При проведении расчетов ГК в основное уравнение (3) для каждого элемента подставляют значения теоретических поправочных коэффициентов  $K_{ij}$  и концентраций  $C_j$ ; далее по измеренным и скорректированным скоростям счета аналитических линий ГО известного химического состава методом наименьших квадратов находят эмпирические ГК и их значимости, вычисляемые как отношения ГК к погрешностям их оценки. Приведем пример получившейся градуировки для алюминия:



Рис. 1. Градуировочная зависимость для Al на методику без предварительной сушки ГСО/ОСО

### 3. Выбор уравнений связи

В основе физической модели возбуждения рентгеновской флуоресценции лежат предположения об идеально гомогенных образцах с идеально гладкой поверхностью, а также о возможности полного устранения аппаратных эффектов. На практике из-за перечисленных выше факторов реальную физическую модель построить невозможно, поэтому целесообразно заменить ее формальной математической моделью. Правильно построенная математическая модель не должна увеличивать «шумы» исходных данных. При построении математической модели выражение (3) рассматривается как ограниченная непрерывная нелинейная функция состава анализируемого образца, которую по теореме Вейерштрасса с любой наперед заданной точностью можно представить в виде действительного степенного ряда.

Таблица 3. Уравнения связи по каждому элементу и способу подготовки пробы

Элемент	Уравнение связи	Остаточная погрешность градуировки $\sigma_{\text{граф, \% масс.}}$	
		Без предварительной сушки	С предварительной сушкой
Mg	$C = a_0 + a_1 I_{\text{Mg}} + a_2 I_{\text{Mg}} I_{\text{Al}} + a_3 I_{\text{Mg}} I_{\text{Ca}}$	0,5661	0,7539
Al	$C = a_0 + a_1 I_{\text{Al}} / I_{\text{PPI}} + a_2 I_{\text{Al}} I_{\text{Al}}$	0,8334	0,9071
Si	$C = a_0 + a_1 I_{\text{Si}} / I_{\text{PPI}} + a_2 I_{\text{Si}} + a_3 I_{\text{Ca}}$	2,1376	2,7113
K	$C = a_0 + a_1 I_{\text{K}}$	0,0593	0,0584
Ca	$C = a_0 + a_1 I_{\text{Ca}} I_{\text{Ca}} + a_2 I_{\text{Ca}}$	1,1023	1,0558
Fe	$C = a_0 + a_1 I_{\text{Fe}} / I_{\text{PPI}} + a_2 I_{\text{Fe}}$	0,2073	0,1810

Остаточная погрешность градуировки представляет собой величину среднеквадратического отклонения от уравнения регрессии:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n d_{ik}^2}{n-m}}, \quad (7)$$

где  $d_{ik} = C_{ik}^{\text{расч}} - C_{ik}^{\text{атт}}$  — отклонения расчетных содержаний  $C_{ik}^{\text{расч}}$  от аттестованных  $C_{ik}^{\text{атт}}$ ;  $i$  — индекс элемента;  $k$  — индекс ГО;  $n$  — число градуировочных образцов;  $m$  — число градуировочных коэффициентов.

Для построения графиков градуировочных зависимостей используется не только аттестованные значения ГСО и ОСО, но и значения концентраций компонентов, приведённых для ознакомления (т. е. значения, приведённые без аттестованной погрешности). Также из градуировочных зависимостей исключаются некоторые образцы, если те значительно увеличивали остаточную погрешность градуировки. В частности, для кальция исключены образцы цементов с содержанием кальция более 60%.

#### 4. Сравнение и оценка результатов

Проведенные экспериментальные исследования показали, что проведение измерений с помощью способа пробоподготовки прессованием, дают наилучшие результаты. Сплавление и пробы порошкообразной формы, согласно полученным результатам, не обеспечивают необходимые значения предела обнаружения. Приведем спектр, показывающий разницу в способе пробоподготовки:

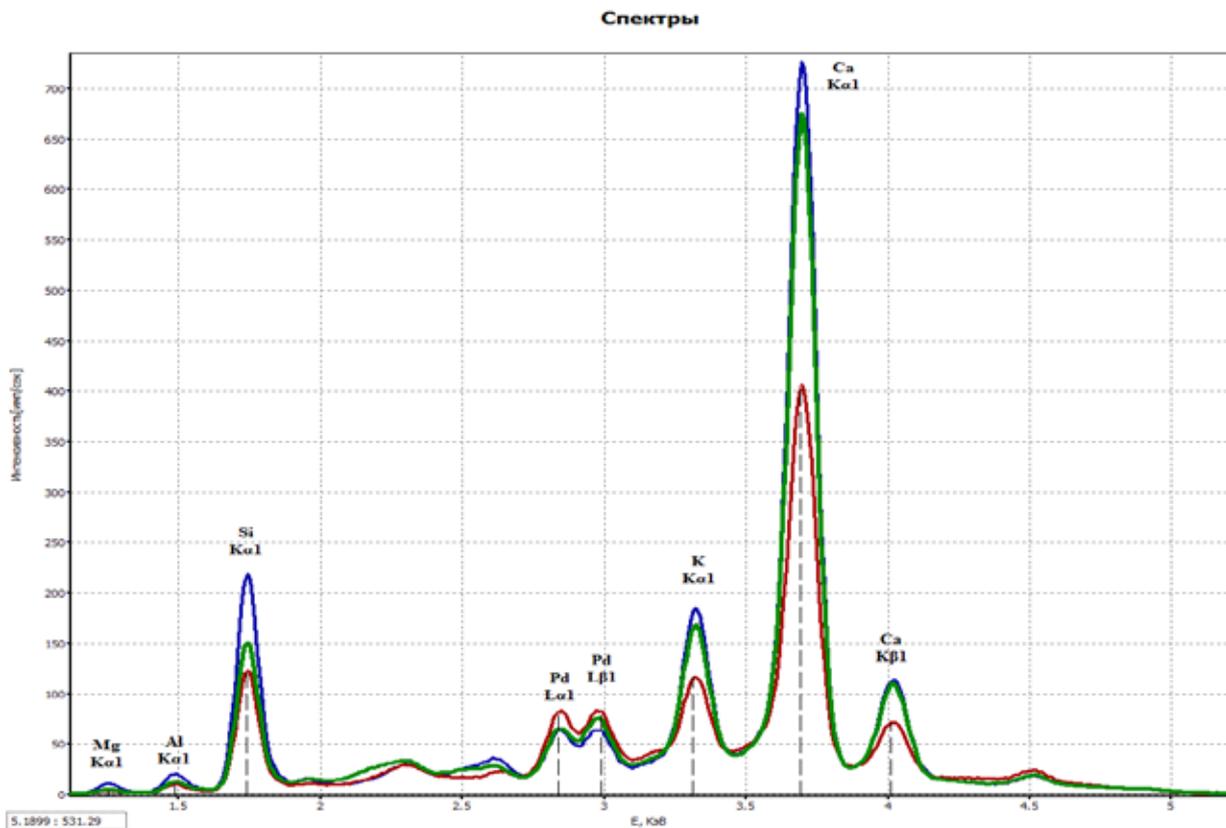


Рис. 2 Спектр интенсивности образца ГСО 3192–85, в режиме измерения № 1 (зеленый спектр — порошковая проба, красный — сплавленная проба, синий — прессованная проба)

Однако, нужно отметить, что цементы и размолотый клинкер довольно плохо поддаются прессованию, которое возможно только с каким-либо связующим, например, борной кислотой. Полученные таблетки очень неустойчивы во времени, т. к. поглощают влагу и углекислоту из воздуха, что осложняет условия хранения и возможность повторного использования эталонных излучателей.

Полученные градуировочные характеристики показали, что количественное определение содержания в насыпных пробах цементов с заданной погрешностью возможно только для железа. Для остальных элементов функциональные зависимости одного или нескольких показателей качества установить не удалось. Это связано, в первую очередь, с от-

носителем низкой повторяемостью результатов, что является следствием неравномерности распределения частиц порошка как по размерам, так и по объему пробы.

Способ подготовки проб насыпкой можно рекомендовать только для полуколичественного анализа, когда погрешность измерений превышает установленные нормы, либо не известна.

Улучшение повторяемости результатов при анализе насыпных проб возможно при реализации опции вращения кюветы с образцом во время измерения.

Значения, приведенные в табл. 8–9 показывают, что предварительная сушка ГСО/ОСО не оказывает влияния на точность и прецизионность измерений. В связи с этим, сделан вывод о нецелесообразности дополнительно высушивать стандартные образцы цементов, сырьевых смесей и продуктов цементного производства при проведении градуировки.

Анализируя значения показателей повторяемости и точности для проб, подготовленных прессованием и насыпкой, можно сделать вывод, что погрешность результатов расчета концентраций, прессованных образцов в среднем в 2–3 раза меньше, чем у насыпных.

Также, в качестве иллюстрации полученных расчетов, построены диаграммы расчетов предела обнаружения (рис. 18–19).

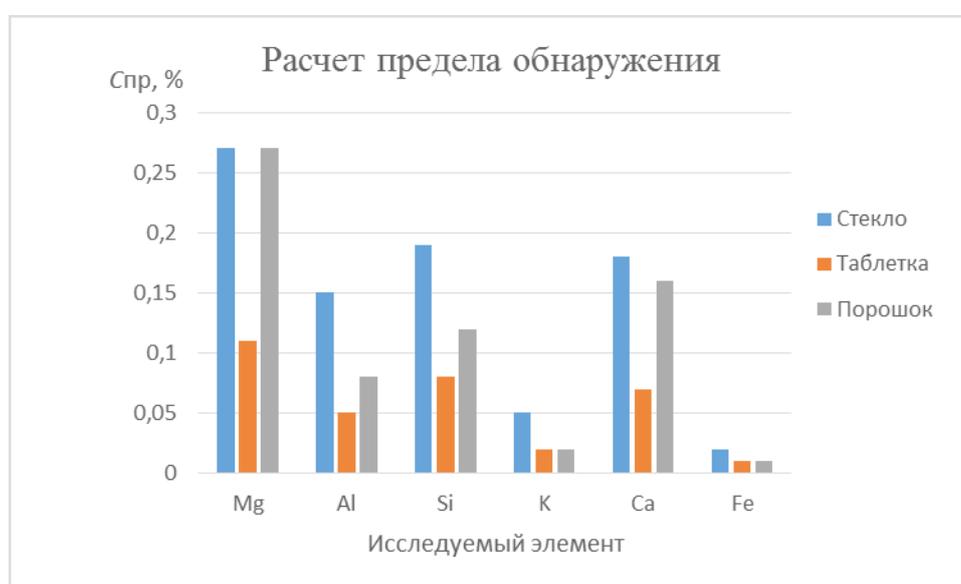


Рис. 3. Диаграмма расчета предела обнаружения элементов образца ОСО — 36–11–2011

### Заключение

В данной работе проведены исследования по возможности применения рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного спектрометра БРА-135F в цементной промышленности.

Результаты данной работы показали, способы пробоподготовки цементов и материалов цементного производства значительно различаются между собой. Для получения лучших результатов целесообразно проводить анализ прессованных проб, так как данный метод пробоподготовки демонстрирует наиболее лучшие результаты как аналитических характеристик, так и метрологических в сравнении с другими способами.

Однако подготовка одного прессованного образца занимает не менее 15 минут. Таким образом, для изготовления 15 образцов потребуется около 4 часов рабочего времени лаборанта, это значительно увеличивает процесс получения данных о химическом содержании образца. В случае, необходимости получения быстрых результатов анализа, когда погрешность измерений превышает установленные нормы, либо не известна, рекомендуется проводить полуколичественный анализ насыпных проб.

Полученные результаты наглядно демонстрируют возможность применения спектрометра БРА-135F на предприятиях цементного производства. Внедрение спектрометра значительно ускорит и улучшит качество производимой продукции на всех этапах.

### Литература:

1. Грязнов, А.Ю. Ускорительная техника и рентгеновских приборы: учеб. Пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. 98 с.

2. Афонин, В. П. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ горных пород и минералов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 256 с.
3. Банкин, М. П. Физико-химические методы в агрохимии и биологии почв: учеб. Пособие. СПб.: Издательство СПб. Ун-та, 2005. 177 с.
4. Бахтиаров, А. В. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ в геологии и геохимии. Л.: Недра, 1985. 189 с.
5. Богданова, И. В. Оперативный контроль качества материалов цементного производства. Л.: Стройиздат, 1983. 184 с.
6. Руководство по эксплуатации БРА-135F, 2014. 73 с
7. Мейер, А. В. Высокочувствительный рентгенофлуоресцентный анализ с полупроводниковыми детекторами. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.
8. Зевин, Л. С. Рентгеновская дифрактометрия. М.: ГИФМЛ 1963. 380 с.
9. РМГ 61—2010. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. М.: Стандартинформ, 2012. 59 с.
10. ГОСТ 5382—91. Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 58 с.
11. Иванов, С. А. Рентгеновские трубки технического назначения. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 250 с.

## Методика создания библиотеки компонентов электрической схемы в виде базы данных в среде САПР Altium Designer

Коноплев Юрий Вячеславович, студент;

Румянцев Роман Сергеевич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе объектом исследования являлась методика создания компонентной библиотеки в виде базы данных для Altium Designer оптимальным методом.*

**Ключевые слова:** *компонентная база, условное графическое обозначение, модель посадочного места, база данных, система автоматизированного проектирования, Altium Designer*

Для работы с компонентами электрической схемы в Altium Designer выделяют три основных метода:

1. Хранение условных графических обозначений (символов «УГО») в библиотеках Sch\_Lib, а моделей посадочных мест — в библиотеке Pcb\_Lib. Таким образом, схема создается из символов УГО, к каждому из которых в свою очередь вручную привязывается соответствующая модель посадочного места, после чего схема передается в РСВ-редактор.

2. Хранение компонентов в интегральных (или как их еще могут называть, — интегрированных) библиотеках. В таком случае к каждому компоненту еще при создании можно привязать соответствующую модель посадочного места, модель условного графического обозначения, добавить различное множество параметров, отображающих его собственные свойства.

3. Использование Database Libraries. В случае с БД-библиотеками компоненты будущих схем хранятся, как и в первом методе, в «разобранном виде»: символы УГО, модели посадочных мест лежат в библиотеках Sch\_Lib, PcbLib. Но тем не менее есть отличие — база данных, где будут создаваться и храниться параметры компонентов (такие как номинал, максимальный ток и напряжение,

ссылки на даташиты (datasheet»s), и проч.). Собственно говоря, благодаря этим параметрам при перетаскивании компонента на схему «на лету» и производится его «сборка» [1].

В данной работе предлагается рассмотреть принцип работы третьего метода, ввиду своего удобства, являющегося универсальным.

### 1. Предварительные этапы создания компонентной базы

Прежде чем приступать к созданию своей библиотеки в виде базы данных, следует отметить, что предварительно рекомендуется учесть важность дальнейшего хранения файлов создаваемого проекта, и их последующего сохранения, в одной папке. Это нужно для того, чтобы ключевые файлы проекта, и относящиеся к нему все ссылки в БД, корректно работали, и могли беспрепятственно взаимодействовать в ходе проведения и выполнения работ, как это делается не только в Altium Designer, но и почти в любой современной САПР.

Для удобства пользователя, в выбранной папке сохранения результатов проекта, будут созданы некоторые ди-

ректории, количество которых определяется предпочтением пользователя-разработчика. Как правило, считается удобным создавать такую директорию, как «Libraries», в которой также будут созданы свои соответственные поддиректории; двумя из которых обязательно будут библиотечные файлы Altium Designer, — «Sch\_Lib», «Pcb\_Lib». Также для удобства делают и такую поддиректорию как «Pdf». Значение этих выбранных поддиректорий следующее:

- «Sch\_Lib» — хранение условных графических обозначений (УГО) компонентов предпочтительных схем;

- «Pcb\_Lib» — хранение посадочных мест компонентов схем;

- «Pdf» — хранение ссылок на datasheet»s.

В эту же директорию «Libraries» будут определены непосредственно сам файл базы данных, т. е. какой-либо простой его вариант в виде документа excel либо access, и здесь же будет осуществлен файл «DbLib», который будет являться собственно интерфейсом базы данных со стороны Altium Designer. [2]

Первыми шагами на пути к созданию своей БД, будет вызов первых двух фундаментальных редакторов, библиотек Sch-Library, и Pcb-Library, для чего в программе действуют последовательность команд:

1. File > New > Library > Schematic Library;
2. File > New > Library > Pcb Library.

Где:

1. библиотека символов,
2. библиотека посадочных мест.

Далее, в Sch-редакторе будут реализованы графические обозначения, соответствующие российским стандартам, интересующего компонента, который будет представлен в будущей базе данных. Выглядит это следующим образом; для начала расставляют должное количество пинов (портов ввода-вывода) выбранного для реализации элемента, которые после будут прикреплены к форме самого компонента, будь то пассивные элементы, или микросхемы. Обязательным, в процессе создания УГО компонента, является задание префикса позиционного обозначения. Затем, уже в Pcb-редакторе создают соответствующее выбранному УГО компонента посадочное место, как правило выстраивая его образ полностью вручную, либо для большего удобства заходя для этого в раздел «Tools», и выбирая более предпочтительный из двух предлагаемых контентов (в зависимости от природы компонента). Стоит отметить, что при создании посадочного места, нужно стремиться к максимальному соответствию его параметров с теми критериями, которые отображены в Datasheet»s выбранного элемента. Большинство Datasheet»s могут быть взяты с интернет-сети, где они находятся в свободном доступе.

После проделанных процедур в обоих редакторах, обычно привязывают УГО элемента к его посадочному месту через команду «Add Footprint», но так как речь идет все-таки о работе с библиотекой в виде БД, то осуществлять эту привязку таким способом совсем необязательно.

Зато очень важным является факт сохранения модели УГО и модели посадочного места в соответствующих библиотеках, находящихся в одной директории («Libraries»). Для еще большего удобства, советуется подписывать модели компонента одним именем в обоих редакторах, — это сведет вероятность ошибочной привязки и несоответствия к минимуму.

Стоит отметить, что при описанном алгоритме создания новых компонентов схемы, или их возможном импорте из каких-либо внешних библиотек, каждый шаг, выполняемый в проекте, рекомендуется сохранять. Это способствует работе программы без ошибок.

После того, как необходимые пользователю компоненты в нужном количестве реализованы в обоих редакторах, и выполнены предпочтения, описанные выше, предлагается перейти непосредственно к созданию библиотеки в виде базы данных.

## 2. Создание компонентной базы в виде файла формата, предназначенного для многофункциональной работы с таблицами (Excel)

Начинают саму реализацию базы данных с создания ее в файле формата, предназначенного для многофункциональной работы с таблицами; пусть то будет access или же excel, с которым в общем-то в основном и принято работать при поставленной задаче.

Для этого, соответственно в excel создают новый файл, где в первой строке будут названия атрибутов, а в остальных их значения, соответствующие выбранным компонентам, по итогу вошедшим в осуществляемую библиотеку.

Для хорошей работы БД нужно ввести минимум 5 атрибутов.

Purt Number — Название компонента, инициализирующее его в библиотеке.

Library Ref — Наименование символа.

Footprint Ref — Наименование посадочного места.

Library Path — Место хранения символа.

Footprint Path — Место хранения посадочного места.

Этих атрибутов более чем достаточно, однако на практике этим количеством в большинстве случаев не ограничиваются, и создают дополнительные, такие, например как:

- Value — Номинал элемента;

- ComponentLink1URL — ссылка на даташит (Datasheet);

- ComponentLink1Description — Название ссылки на даташит (Datasheet).

После заполнения строки атрибутов, в графу «Purt Number» вносят все необходимые компоненты. Для большего удобства, допускается приписывать номиналы к названию компонента.

В графу «Library Ref» заносят соответственно названия УГО всех выбранных элементов.

Затем в графу «Footprint Ref» вписывают соответственно названия всех посадочных мест.

В графе «Library Path» указывают место хранения символов (библиотека Sch\_Lib1)

В графе «Footprint Path» пишут наименование места хранения посадочного места (библиотека Pcb\_Lib1).

Value — соответственно номинал компонента.

Последние два атрибута выполняют функционал добавления справочных данных о компонентах.

Таким образом, в «ComponentLink1URL» указывают путь хранения заведомо загруженного из внешних источников на ПК справочного контента; ссылка на даташит (DataSheet) \ название файла даташита (DataSheet).

В «ComponentLink1Description» пишут название ссылки, т. е. как в данном случае, — «DataSheet».

Следует заметить, что в дальнейшем для оптимального использования БД, листы файла excel, располагаемые в нижнем левом углу, следует подписывать латиницей, так как это самый восприимчивый для распознавания файлов язык любой современной САПР. Листов, как правило, делают не в единичном количестве, опять-таки для большего удобства при использовании. Это могут быть грамотно рассортированные по группам компоненты, такие как например пассивные элементы или же микросхемы. Такое многообразие позволяет от части централизованно управлять некоторыми значимыми атрибутами компонентов (рис. 1)

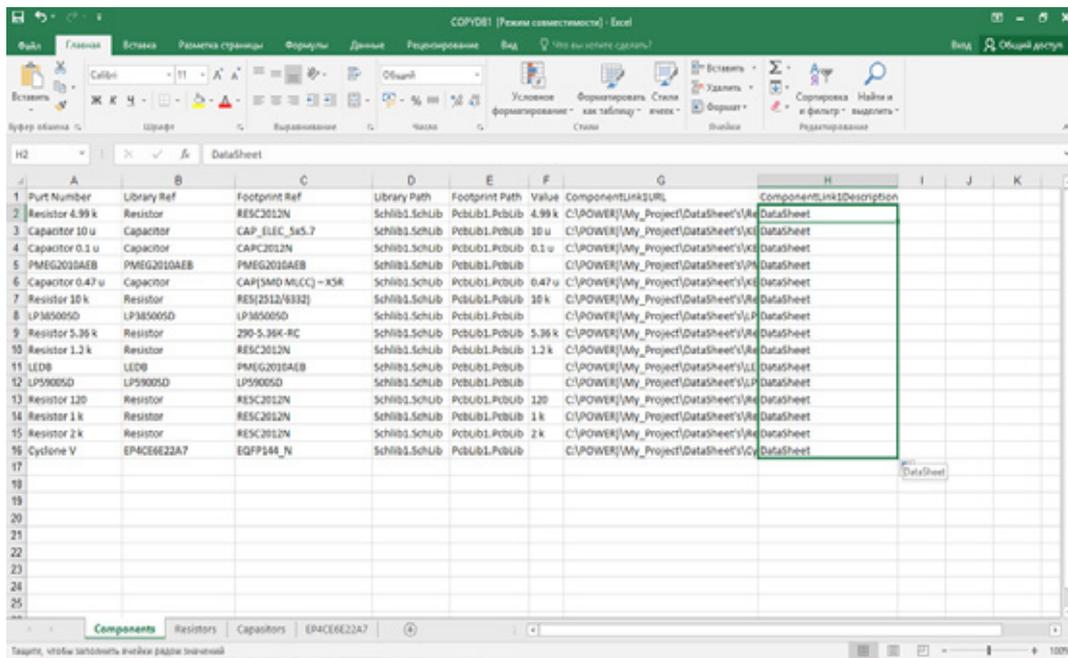


Рис. 1. Вид многолистовой базы данных в формате excel

Получившаяся БД будет сохранена в ту же директорию «Libraries» в том же формате excel.

### 3. Создание базы данных в Altium Designer.

Далее переходят к заключительным этапам создания БД. Для этого в программе Altium Designer выбирают соответственно команды

File>New>Library>Database Library.

В панели «Projects» появляется заготовка БД «Database\_Libs1. Dblib». Закрепившуюся ее в проекте нужно сохранить, нажав на символ дискеты в основной панели, расположенной в левом верхнем углу, а в окне «Database\_Libs1. Dblib» источником данных следует выбрать формат excel, — тогда как выглядеть окно будет следующим образом (рисунок 2).

В данном окне видны большинство опций и параметров для работы с формирующейся БД. В адресной строке «Browse», указывается путь к файлу БД в формате, специализирующемся на многофункциональной

работе с таблицами. Команда «Connect», означающая подключения, может сменяться на «Reconnect», при последующих возможных изменениях базы, таких как например переименовки адреса по которому прослеживается путь к файлу, указание другого пути, указание другого excel-файла, или выбора другого формата (например access). Атрибутивное окно задается после выбора указания адреса файла в корневой директории на ПК проектировщика.

После указать путь к этому файлу через команду «Browse» (рисунок 3)

И затем нажав на «Connect», осуществить подключение. После этого можно увидеть, что в верхней левой области подгрузились все листы, созданные ранее в БД-excel, снизу подгрузились некоторые атрибуты базы, где по умолчанию берется первый атрибут таблицы в качестве ключевого поля (рисунок 4).

Если раздел «Field Mappings» отображает некоторые атрибуты, то раздел «Table Browser» показывает компоненты, хранящиеся в соответствующем листе базы (атри-

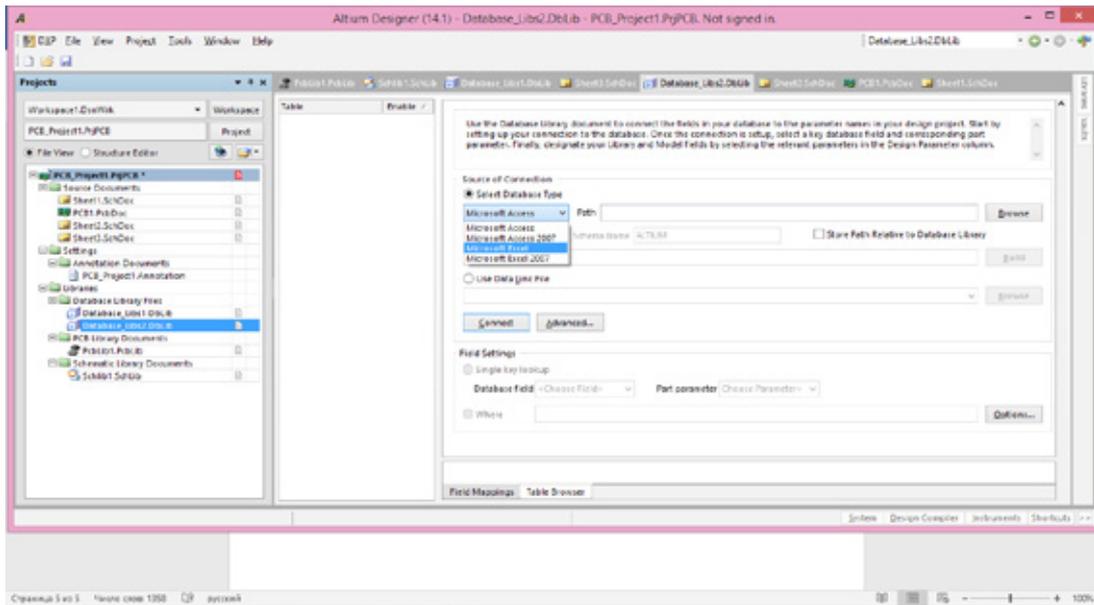


Рис. 2. Окно «Database\_Lib1. Dblib»

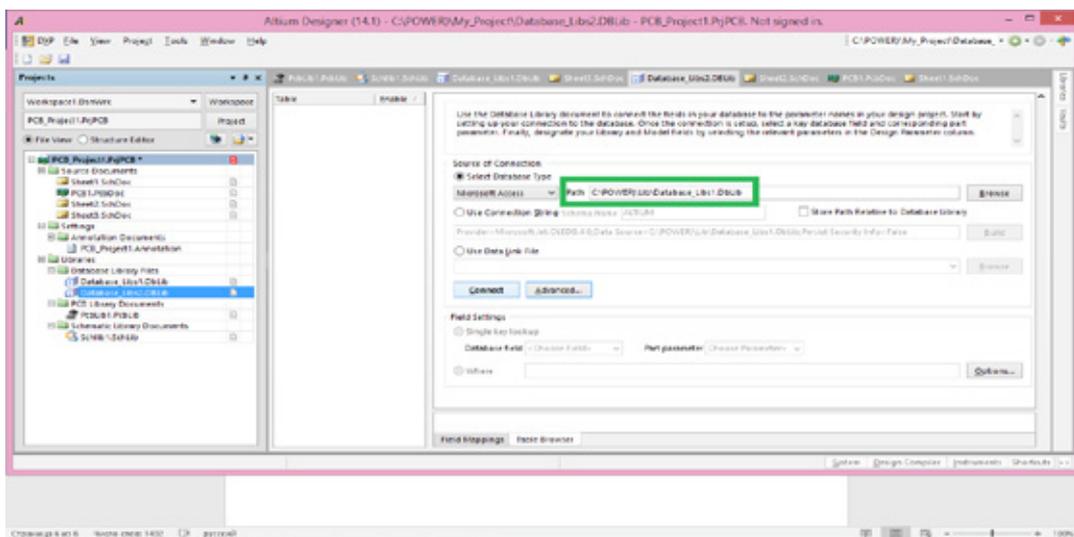


Рис. 3. Указание пути к файлу excel

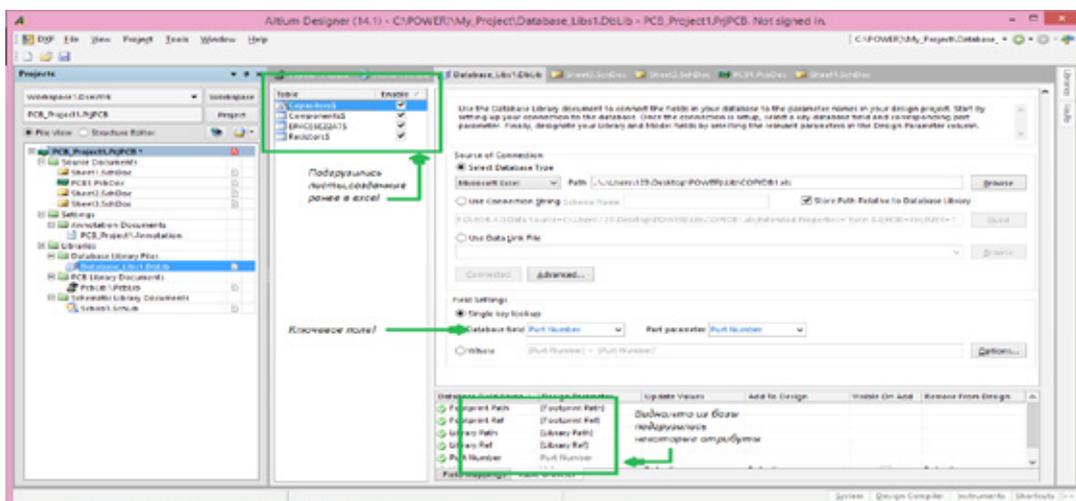


Рис. 4. Взятие первого атрибута таблицы в качестве ключевого поля

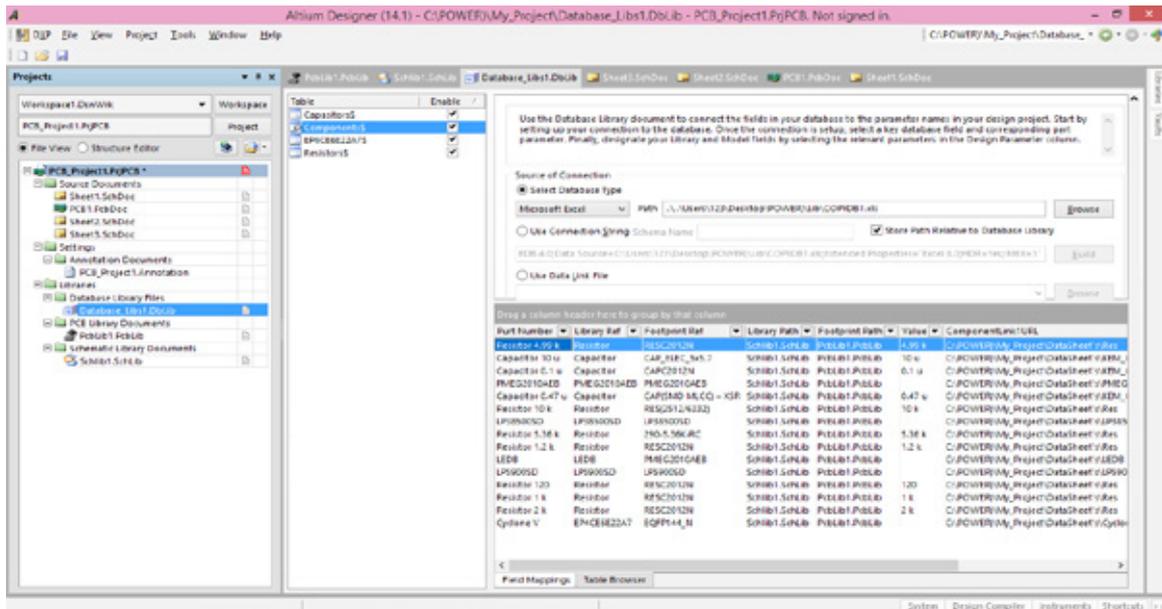


Рис. 5. Раздел «Table Browser», показывающий компоненты, хранящиеся в соответствующем листе базы

буты можно сортировать путем нажатия на соответствующий символ) (рисунок 5).

Для дальнейшего использования созданной библиотеки в виде Базы Данных, достаточно вызвать панель «Libraries», далее вызвать раздел «Libraries», и подключить библиотеку командой «Install», для чего нужно будет указать тип файла как «\*DBLIB», вместо установленного по умолчанию «\*INTLIB», затем выбрать созданную библиотеку, закрыв после этого вызванное окно.

Библиотека считается полностью готовой. Для ее тестирования нужно зайти в панель «Libraries», выбрать эту библиотеку в списке, и свободно перетаскивать любой нужный элемент на заготовку схемы.

**Заключение**

БД-библиотеки совмещают в себе преимущества двух первых методов организации компонентов: с одной стороны все разнообразие символов и посадочных мест сведено к минимуму, с другой — на схему перетаскивается уже готовый компонент с максимумом информации о нем, привязанными ПМ, моделями, и прочими характеристиками, выбранными авторами будущих проектов. Помимо того, появляется возможность интегрировать базу данных в систему складского и бухгалтерского учета. Однако это важно скорее для организаций, нежели чем для рядового разработчика.

**Литература:**

1. <http://we.easyelectronics.ru/blog/CADSoft/1383.html>, — БД-библиотеки для Altium Designer (дата обращения 22.04.2016)
2. <https://www.youtube.com/channel/UCG7N5CqXpyK8nQjr1EmMgng>, — Videоканал Алексея Сабунина (дата обращения 16.05.2016)

## Исследование электрофизических свойств структур Pt-TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pt, полученных методом атомно-слоевого осаждения

Нерода Алексей Сергеевич, студент;  
Колодинов Владимир Павлович, студент;  
Сегодник Антон Валерьевич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В данной работе исследовались электрофизические свойства структур Pt-TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pt. Из-за особых преимуществ перед другими методами, был использовано атомно-слоевое осаждение (оксид Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — активный переключающий слой, оксид TiO<sub>2</sub> — резервуар кислородных вакансий). Увеличение кислородных вакансий способствует повышению концентрации ловушек в запрещенной зоне Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и появлению проводимости. Многоуровневое переключение наглядно отображено в графиках ВАХ.*

**Ключевые слова:** энергонезависимые ячейки, мемристор, атомно-слоевое осаждение, резистивное переключение, структуры, FRAM, MRAM, PCRAM, ReRAM

Интенсивное развитие электроники в области хранения и обработки информации привело к появлению энергонезависимых элементов памяти. Одним из основополагающих продуктов подобного типа является FLASH память (используется полевой транзистор). Также существуют другие виды энергонезависимой памяти (функциональность за счет изменения сопротивления при фазовом переходе материала, изменение магнитного момента доменов, резистивное переключение и пр.).

В крупных электронных компаниях (например, IBM) проводят исследования связанные с возможностью использования оксидных пленок для разработки универсальной памяти. Основным моментом исследований является сосредоточение на применении биполярного переключения (для перехода из высокоомного в низкоомное состояние необходима поляризация структур напряжением различной полярности). Такой класс переключения наблюдается в сложных оксидах.

В работе исследовались МДМ системы типа Pt-TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pt. Получены мемристивные структуры с многоуровневым переключением.

### 1. Современное состояние и направление развития элементов резистивной памяти на основе металлооксидов

На сегодняшний день основная проблема электроники — поиск альтернативы FLASH памяти. Она относится к п/п электрически перепрограммируемой памяти и хранит биты в виде электрических зарядов. Поиск альтернативы связан с уменьшением (микроминиатюризации) электронных компонентов. По мере уменьшения FLASH чипов увеличивается количество битов на одну ячейку и уменьшается количество электронов. В дальнейшем возникают сложности, связанные с считыванием/хранением информации.

На сегодняшний день существует несколько вариантов, способных заменить FLASH память:

1. **FRAM** (сегнетоэлектрическая память) — оперативная память в которой для облегчения энергонезависимости используется слой сегнетоэлектрика. Достоинства: низкое энергопотребление, быстрая запись, более высоко число перезаписи. Недостатки: наличие конденсатора для хранения дополнительных зарядов, которые способствуют изменению состояния сегнетоэлектрика с приемлемой скоростью.

2. **MRAM** (магниторезистивная память) — память, основанная на магнитных запоминающих элементах, интегрированных в CMOS технологический процесс. Ячейка такого типа представляет собой структуру из нескольких слоев: с фиксированной поляризацией, слой тонкого д/э туннельного барьера и свободного магнитного слоя. Достоинства: благодаря принципиально другой технологии работы битовых ячеек, число перезаписи практически бесконечно. Недостатки: достаточно мощное электрическое поле для записи, т. о. магнитные элементы расположены далеко друг от друга, следовательно, большие размеры магниторезистивной памяти; высокое энергопотребление.

3. **PCRAM** (память с изменением фазового состояния) — память, принцип действия которой основан на фазовых переходах (способность некоторых материалов быстро изменять фазу стабильного физического состояния). Достоинства: возможность дальнейшего масштабирования. Недостатки: стоимость технологического процесса; маленькая активная область воздействия (связана с более высокой плотности программируемого тока, порядка 10<sup>7</sup> А/см<sup>2</sup> в активной фазе).

4. **ReRAM** (резистивная память) — память, основным элементом которой является мемристор, который представляет из себя сопротивление, зависящее от прошедшего через него заряда. Достоинства: упрощенная структура (минимальный размер топологических элементов, до 9 нм); низкая стоимость на бит; малое напряжение на перезапись; низкое энергопотребление; высокая скорость записи/перезаписи; возможность трехмерной интеграции.

Мемристор обладает достаточно простой структурой — слой металлооксида между двумя металлическими электродами. Наиболее хорошо исследованным является оксид титана  $Ti_nO_{2n-1}$  толщиной 5–40 нм, на котором впервые наблюдался мемристорный эффект, а также другие оксиды металлов:  $ZrO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $VO_2$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $MoO_2$ ,  $WO_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Ni_2O_3$ ,  $Co_2O_3$ .

Как видно, самым привлекательным направлением является — использование систем на основе мемристора, ввиду больших достоинств и незначительных недостатков.

### 2. Технология получения тонкоплёночных структур Pt-TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pt

Структура, показанная на рисунке 1 сделана по сэндвич технологии.

Основное влияние на свойства итоговых структур оказывают материалы подложки. Однако существуют огра-

ничения: допустимая рабочая температура, температурного коэффициенты линейного расширения и пр.

Схематичное изображение двуслойной мемристорной структуры и условия создания подобной структуры представлено на рисунке 2.

Верхние электроды Pt были сформированы электроннолучевым испарением с использованием металлической маски. Площадь верхних электродов была  $10^{-4}$  см<sup>2</sup>. В качестве верхних электродов могут использоваться различные материалы. Верхние электроды формируются на завершающей стадии создания мемристорных структур, дополнительные требования к материалам и технологии их получения не предъявляются. С целью ограничения количества используемых материалов и технологий для формирования верхних электродов также использовалась платина.

### 3. Метод атомно-слоевого осаждения (ALD)

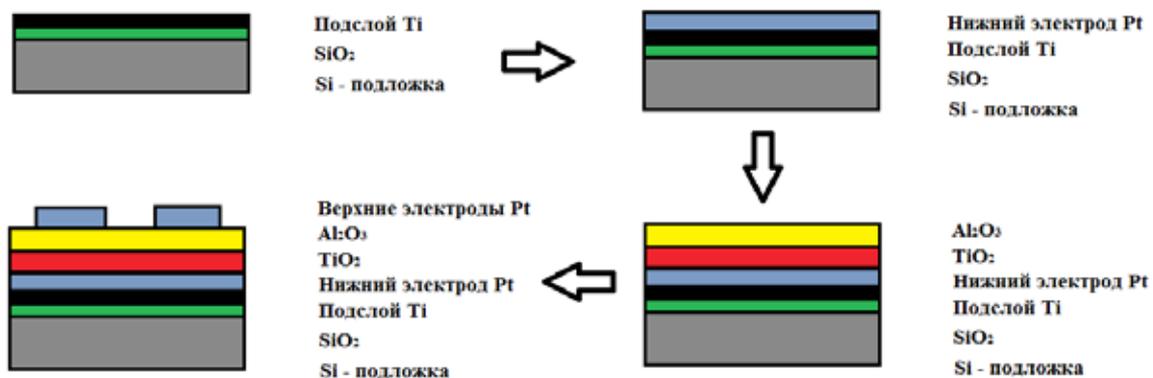


Рис. 1. Схематическое отображение структуры Pt-TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pt

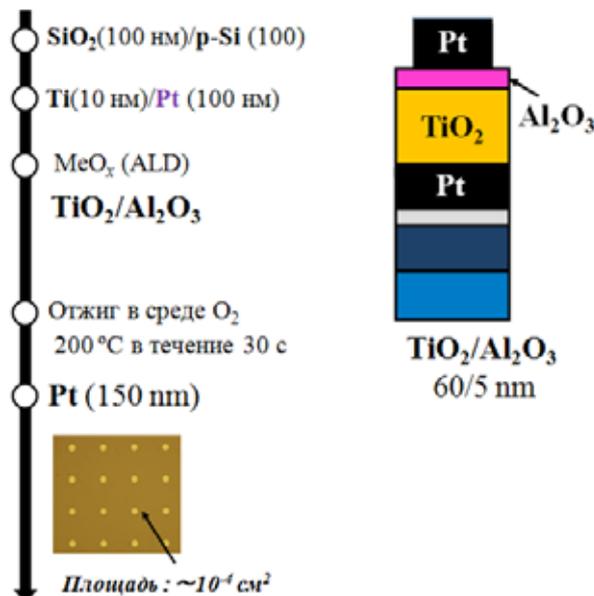


Рис. 2. Мемристорная структура

Принцип метода заключен в нанесении металлооксидных пленок на подложку, расположенную в вакуумной камере, под действием паров двух реагентов (прекурсоров). Прекурсоры, встречаясь на поверхности, образуют монослой тонкопленочного покрытия. Иллюстрация механизма ALD — процесса представлена на рисунке 3.

Весь процесс можно разделить на четыре основных этапа:

- 1) Ввод в камеру паров триметилалюминия (создание активных поверхностных групп);
- 2) Продувка камеры газом-носителем (удаление остатков прекурсора и продуктов реакции);
- 3) Ввод в камеру паров воды (создание оксидной пленки);
- 4) Продувка камеры газом-носителем (удаление остатков паров воды и прекурсора).

Основное преимущество ALD — процесс это прецизионный контроль толщины наносимого покрытия на всем протяжении процесса, начиная от самого первого монослоя. Поэтому в каждый момент времени можно с определенной степенью точности предсказать толщину нанесенного покрытия для данных условий.

Другой особенностью технологии АСО является непрерывность и бездефектность тонкопленочного покрытия, а также возможность выращивания пленок заданного состава. На рисунке 4 представлены чередующиеся ALD — пленки:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 10 нм (более светлые) чередуются со слоями  $\text{TiO}_2$  толщиной 10 нм (более темные).

#### 4. Исследование электрофизических параметров полученных структур

Измерение ВАХ проводилось с помощью прибора Keithley 4200-SCS со встроенным источником напряжения. К основным достоинствам данного устройства можно отнести: высокую чувствительность (диапазон измеряемых величин тока колеблется от 20 фА до 20 мА) и малые временные интервалы съема величин тока (до 1000 в секунду).

ВАХ структур Pt-TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pt типична для мемристоров, демонстрирует биполярное переключение сопротивления между двумя устойчивыми энергонезависимыми состояниями, как показано на рисунке 5. Именно такое поведение является базовым для создания энергонезависимой резистивной памяти.

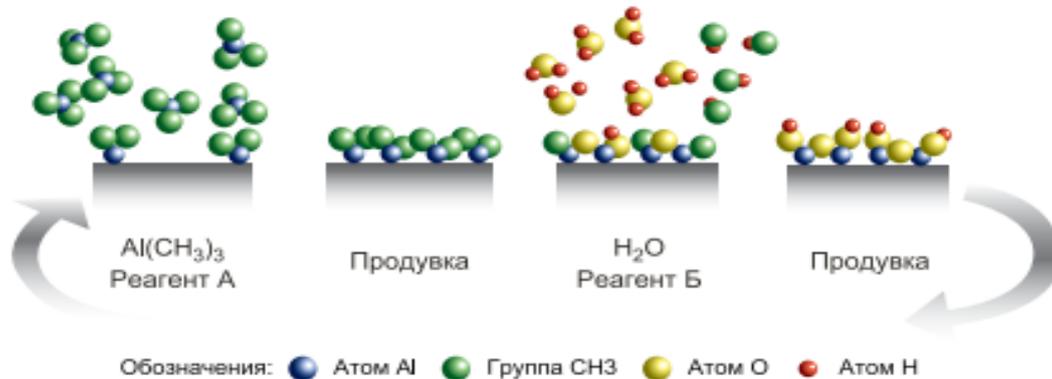


Рис. 3. Схема роста тонкопленочного покрытия ALD-процесса

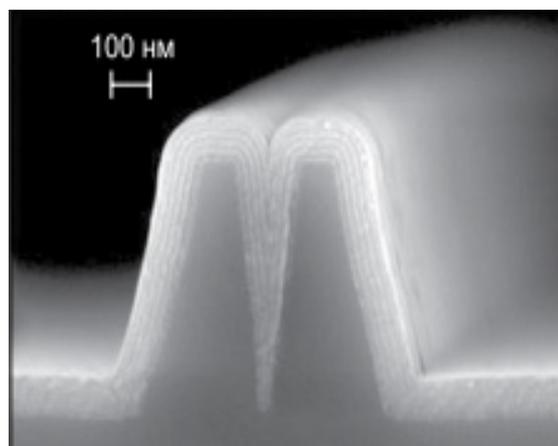


Рис. 4. Чередующиеся ALD-слои

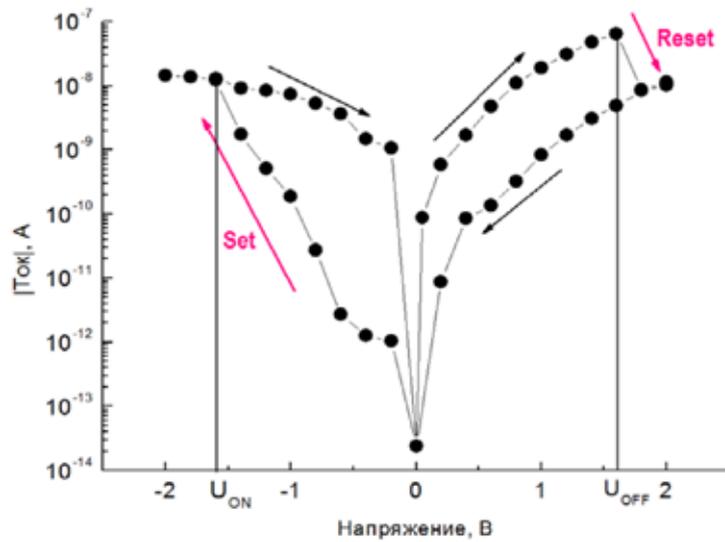


Рис. 5. ВАХ мемристорной структуры в полулогарифмическом масштабе

Слой  $Al_2O_3$  обеспечивает высокое сопротивление (на 7 порядков), учитывая свое удельное сопротивление.

Есть основания полагать, что активный переключающийся слой в этом случае  $Al_2O_3$ , а слой  $TiO_2$  выступает в качестве резервуара кислородных вакансий. Эта структура уверенно демонстрирует многоуровневое переключение, причем без предварительного проведения процесса формовки. Это означает, что изготовленная двухслойная структура готова к переключению сразу после ее синтеза (рисунок 6, а), следовательно, процесс формовки осуществляется уже на этапе технологии: синтез и высокотемпературный отжиг. Такая технология является, предпочтительной, когда происходит создание специализированных вычислительных систем.

Увеличение концентрации кислородных вакансий приводит к увеличению концентрации ловушек в запрещенной зоне  $Al_2O_3$ , что приводит к появлению проводимости в  $Al_2O_3$ -слое. В этом случае зависимость проводимости структуры от разности потенциалов между электродами и, как предполагается, от концентрации локализованных состояний ( $N$ ) в зоне проводимости оксида алюминия, определяется механизмом прыжкового транспорта, когда проводимость обусловлена неупругим туннелированием между ближайшими центрами.

В этом случае, сопротивление слоя диэлектрика будет определяться сеткой случайных сопротивлений (сеткой Абрахамса-Миллера) и, в первом приближении, перколяционным радиусом:

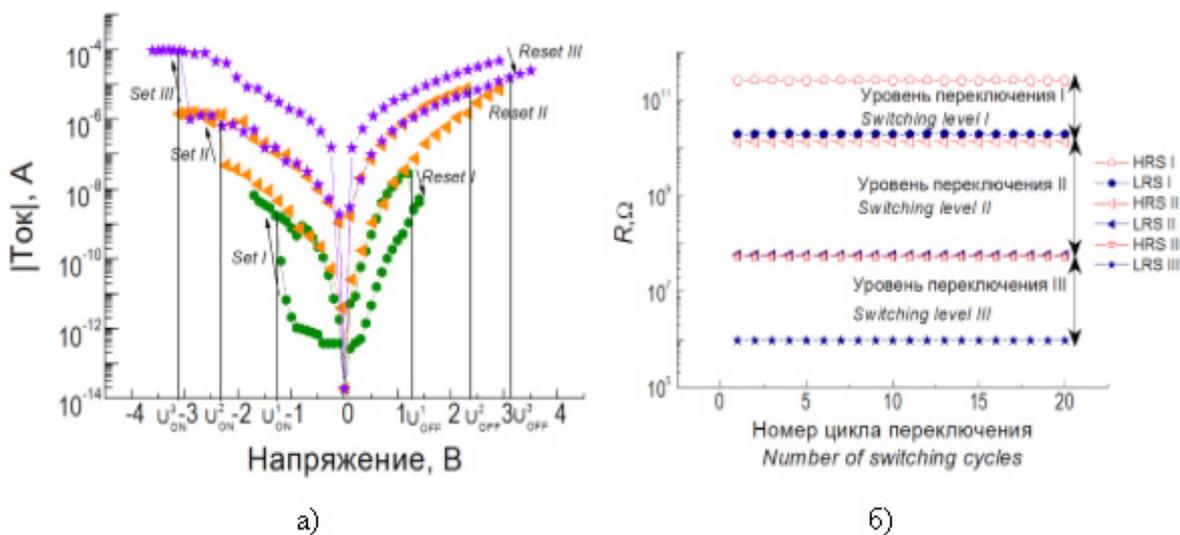


Рис. 6. а) ВАХ в полулогарифмическом масштабе для Pt-TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pt; б) многоуровневое переключение сопротивления

$$r = 0,085N^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\rho = \rho_0 e^{\left(\frac{1,78}{\omega N^{-\frac{1}{2}}}\right)} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\varepsilon \hbar^2}{m_0 e^2} \quad (3)$$

где  $r$  — перколяционный радиус,  $\rho$  — сопротивление слоя,  $\alpha$  — борковский радиус.

Миллер и Абрахамс предложили находить сопротивление перехода электрона между двумя донорами с поглощением и излучением фонона с помощью вычисления тока. В этом случае задача сводится к вычислению электропроводности эквивалентной сетки случайных сопротивлений.

### Заключение

В ходе проведённой работы были исследованы электрофизические свойства структур Pt-TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pt, ко-

торая была получена методом атомно-слоевого осаждения.

В данной структуре наблюдается эффект резистивного переключения. Оксид Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выступает в роли активного переключающего слоя, в то время как оксид TiO<sub>2</sub> выступает в роли резервуара кислородных вакансий. Стоит отметить, что при увеличении числа кислородных вакансий, происходит увеличение концентрации ловушек в запрещенной зоне Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Следовательно, в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — слое, появляется проводимость.

Из ВАХ видно многоуровневое переключение, которое продемонстрировала данная структура. Циклы переключения повторяются с изменением сопротивления. Однако величина приложенного напряжения влияет на разный уровень переключения.

Таким образом, можно говорить о том, что данная структура открывает перспективы для многоуровневых систем, создание которых лежит на основе многослойных структур

### Литература:

1. Принцип работы и устройство флеш — памяти // Информационно — технический дневник гика: <http://hobbyits.com/cifrovye-texnologii/princip-raboty-i-ustrojstvo-flesh-pamyati.html> (дата обращения: 20.04.2016).
2. Память // Index — components: <http://in-comp.ru/index.php/pamyat/fram> (дата обращения: 20.04.2016).
3. Бабурин, С., Самоделов А. Магниторезистивная память MRAM компании Everspin Technologies // Компоненты и технологии. г. 2012, выпуск № 135. с. 51–53
4. Соколов, М., Гришин А. Магниторезистивная память MRAM — быстродействующие ОЗУ и ПЗУ в одной микросхеме // Электронные компоненты. 2007, выпуск № 1. С. 88–89
5. Магниторезистивная оперативная память // Все о hi-tech: [http://all-ht.ru/inf/pc/mem\\_mram.html](http://all-ht.ru/inf/pc/mem_mram.html) (дата обращения: 21.04.2016).
6. Максимов, П. Память на фазовых переходах: проблемы и перспективы // Электронные компоненты. г. 2011, выпуск № 1. с. 76
7. Dmitri, B. Strukov, Gregory S. Snider, Duncan R. Stewart & R. Stanley Williams. The missing memristor found // Nature. г. 2008, выпуск № 453. С. 80–83
8. Елисеев, Н. Мемристоры и кроссбары. Нанотехнологии для процессоров // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. г. 2010 выпуск № 8. с. 84–89.
9. Прототип мемристорной ячейки на основе мдм структур с использованием диэлектрической пленки hfxal1-хоус переменным составом / А. А. Чуприк, А. С. Батурин, К. В. Булах, К. В. Егоров и др. // Журнал радиоэлектроники. г. 2013, выпуск № 6. с. 2–3
10. На пути к нейроморфной мемристорной компьютерной платформе / А. Петров, Л. Алексеева, А. Иванов, В. Лучинин, и др. // Наноиндустрия #1. г. 2016, выпуск № 63 с. 94–108
11. Мемристор. Изготовление структуры и исследование ее свойств: Лабораторный практикум для 5 курса ФФКЭ МФТИ. Долгопрудный: издательство МФТИ, г. 2013. с. 5–7
12. В. К. Ярмаркин, С. Г. Шульман, В. В. Леманов / Резистивное переключение в тонкопленочных структурах Au/TiO<sub>2</sub>/Pt на кремнии // Физика твердого тела. г. 2008, том 50, выпуск № 10, с. 1767–1768
13. Rainer Waser, Masakazu Aono. Nanoionics-based resistive switching memories // Nature Publishing Group. vol 6. november 2007. P. 833

## Управление технологическими процессами с помощью магнитных систем и способы их расчета в ионно-плазменных устройствах напыления материалов

Нерода Алексей Сергеевич, студент;

Колодинов Владимир Павлович, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В данной работе рассматриваются основные моменты, связанные с управлением потоков движения заряженных частиц в ионно-плазменных технологических устройствах. Для увеличения эффективности нанесения материалов на заготовки различной формы и размеров необходимо решить задачу конфигурации магнитного поля. Проведен сравнительный анализ результатов решения с использованием программной среды Matlab и среды моделирования Comsol Multiphysics.*

**Ключевые слова:** ионно-плазменные устройства, вакуумно-дуговой источник плазмы, магнетронные распылительные системы, магнитная система, катодное пятно, соленоид, движение заряженных частиц, магнитостатическая задача, Matlab, Comsol Multiphysics

Вакуумная техника и технология широко применяются для получения поверхностей различной структуры и состава, используемых как в промышленности, так и в экспериментальных исследованиях. Основными ионно-плазменными технологическими устройствами нанесения покрытия с помощью магнитных систем являются:

- магнетронные распылительные системы (аномально тлеющий разряд);
- вакуумно-дуговой источник плазмы коаксиальной конструкции (дуговой разряд).

Математическая постановка задачи заключается в решении самосогласованных нелинейных задач и сводится к расчетам полей, в которых осуществляется движение заряженных частиц и их траекторий. Выбор формы и величины индукции магнитного поля (МП) обусловлен конструкцией используемого вакуумно-дугового устройства, а также требованиями, предъявляемыми к наносимому покрытию и типу обрабатываемого изделия.

### 1. Ионно-плазменные технологические устройства

Создание покрытий плазменными методами нашло широкое применение для решения специализированных технологических задач, из-за особых преимуществ перед другими существующими способами. Получают пленки полупроводников и полупроводниковых структур, различные пленки тугоплавких металлов, многокомпонентных сплавов

Постепенно снижая диапазон рабочих давлений, снижая показатель напряжения на разрядном промежутке распылительных систем, повышая скорость осаждения стремятся увеличить эффективность процесса распыления, уменьшая уровень загрязнений и радиационных дефектов ухищряют области применения ионного распыления.

Основными конструкционными узлами ионно-плазменных устройств являются: система генерации и система управления электронным пучком.

Принцип действия магнетронных распылительных систем основан на аномально-тлеющем разряде, для которого характерно высокое значение управляющего напряжения по сравнению с током разряда. Особенностью данного устройства является более сложное строение магнитной системы, так как она выполняет несколько функций: 1) стабилизирует газовый разряд на поверхности мишени; 2) задает зону распыления материала катода; 3) управляет характером движения заряженных частиц. Таким образом система состоит из набора как соленоидов, так и постоянных магнитов.

Для решения технологической задачи за основу была взята модель вакуумно-дугового устройства коаксиальной конструкции (далее ВДУ), ввиду простоты реализации магнитного узла.

### 2. Вакуумно-дуговой источник плазмы

ВДУ коаксиальной конструкции — это устройство катодного распыления материала под действием дугового разряда. Вакуумная дуга является частным случаем дуги низкого давления с холодным катодом и представляет сильноточный низковольтный разряд, реализуемый в глубоком вакууме и развивающийся в парах материала одного из электродов.

При этом на катоде возникает яркое пятно, которое передвигается с большой скоростью ( $V_{\text{кп}} = 40 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ). Величина плотности тока достигает значений порядка  $j_i = 10^5 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$  (радиус которого  $R_{\text{кп}} = 10^{-4} \dots 10^{-6} \text{м}$ )

Принцип действия устройства основан на испарении материала катода под действием дуги низкого давления с автоэлектронной эмиссией. Дуговой разряд подразделяется на катодную и анодную дугу. Поверхностью анода является сам корпус установки.

Магнитная система включает в себя основные элементы стабилизирующий и фокусирующий соленоиды, однако в зависимости от технологической задачи их количество может быть намного больше двух. Первостепенными условиями работы устройства являются:

1. Величина магнитной индукции внешнего поля должна быть больше значения собственного ( $B_{вн} > B_{соб}$ );
2. Плотность тока стабилизирующего соленоида должна быть выше плотности тока фокусирующего ( $j_s > j_f$ );
3. Температура катодной дуги должна быть выше температуры кипения материала катода ( $T_{кд} > T_{кшп}$ ).
4. Внутренняя площадь поверхности анода должна быть не менее  $S_{опт}$  (значение  $S_{опт} = 1,5 \text{ м}^2$ ).

Количество используемых катодных узлов зависит от требуемых условий итогового покрытия. Основными достоинствами устройства являются: простота исполнения, малый нагрев материала заготовки. Для напыления на заготовки протяженных размеров используют подвижную рамку.

### 3. Взаимодействие заряженного пучка с магнитным полем

Управляющие свойства магнитного поля в зоне транспортировки плазменного потока зависят, прежде всего, от геометрии силовых линий, в зависимости от параметров и структуры соленоидов. В процессе работы, генерируемый плазменный поток заполняет весь рабочий объем. При условии замагничности электронов, когда параметр Холла, равный произведению циклотронной частоты на характерное время их столкновений значительно превышает единицу, движение отрицательно заряженной компоненты осуществляется вдоль силовых линий магнитного поля.

Величина влияния магнитного поля на заряженные частицы электроны и ионы сильно различна. Для их оценки вводят собственные показатели Холла:  $\beta_e$  и  $\beta_i$ . Их отношение пропорционально отношению масс электрона и иона. Соответственно, магнитное поле имеет большее влияние на электроны плазмы и раньше на них воздействует:

$$\beta_e = \omega_e \tau_e \gg 1$$

$$\beta_i = \omega_i \tau_i \leq 1$$

Траектория движения заряженных частиц имеет сложный трехмерный вид, при существовании магнитных и электрических полей. Однако, если относительное изменение этих полей в пределах ларморовского круга достаточно малы, то можно применять адиабатическое приближение. Тогда итоговую скорость частицы представляют в виде суммы скорости дрейфа ведущего центра и скорости вращения по ларморовской окружности вокруг него.

Если  $\vec{F}_e$  и  $\vec{F}_i$  (сила электрического поля) не равны нулю и не зависят от координат, то скорость движения частицы, ортогональной  $\vec{B}$ , представляют как:

$$\vec{v}_\alpha = \vec{v}_{\omega_B} + \vec{v}_d$$

где  $\vec{v}_{\omega_B}$  — скорость ларморовского вращения;  $\vec{v}_d$  — скорость дрейфа, которая ортогональна действующей силе.

Если общие изменения в системе протекают медленно, а параметры характеризующие движения остаются постоянными, то его называют адиабатическим инвариантом. Места, где сгущаются линии магнитного поля, образуются магнитная пробка (или магнитное зеркало), от которой частица отражается.

### 4. Расчет магнитных полей

Расчет магнитных полей представляет из себя сложную магнитостатическую задачу. Для ее решения использовались такие программные пакеты как Matlab и Comsol Multiphysics.

Методика расчета в среде Matlab основана на уравнениях Био-Савара, которые преобразованы с помощью системы цилиндрических координат для аксиально-симметричного поля. Для расчета разбивались на подобласти как области движения заряженных частиц под соленоидами, так и сама структура соленоида. Основные расчетные выражения для продольной и радиальной составляющей:

$$B_z(r, z) = \frac{j\mu\mu_0}{2\pi} \int_R^{R+H} \sum_{\nu=1}^2 (-1)^{\nu+1} \frac{(z - z'_\nu)k_\nu r'}{(r + r')\sqrt{rr'}} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{(1 - h \sin^2 \beta)\sqrt{1 - k_\nu^2 \sin^2 \beta}} \left( \frac{2r}{r + r'} \sin^2 \beta - 1 \right) d\beta dr'$$

$$B_r(r, z) = j \frac{\mu\mu_0}{2\pi r} \int_R^{R+H} \sum_{\nu=1}^2 (-1)^{\nu+1} \sqrt{(z - z'_\nu)^2 + (r + r')^2} \times \left[ \left( 1 - \frac{k_\nu^2}{2} \right) K(k_\nu^2) - E(k_\nu^2) \right] dr'$$

Решение задачи сводится к расчету уравнений по продольной переменной z.

Данные выражения включают в себя эллиптические интегралы первого, второго и третьего родов, а также сокращения:

$$k_\nu = \sqrt{\frac{4rr'}{(z - z')^2 + (r^2 + r')^2}}$$

$$h = \frac{4rr'}{(r + r')^2}$$

COMSOL Multiphysics — среда моделирования, предназначенная для моделирования и решения задач в различных областях физики. Данный программный пакет состоит из набора модулей (модуль плазмы, модуль постоянного и переменного тока), который облегчает процесс моделирования.

Методика расчета основана на решении уравнений Максвелла и методе конечных элементов (включает в себя системы дифференциальных уравнений для более точного воспроизведения физических процессов протекающих в данной технологической задаче.

Таблица 1. Список основных уравнений при решении задачи в среде Comsol Multiphysics

$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$	закона ампера
$\nabla \mathbf{H} = \mathbf{j}$ $\mathbf{B} = \nabla A$	уравнения Максвелла
$\frac{d(\square_p \mathbf{v})}{dt} = \mathbf{F}_t$	уравнение движения заряженной частицы в магнитном поле
$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$	уравнение магнитной изоляции
$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}$ $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$	уравнение электрического и магнитных полей

Итогом построения магнитостатической задачи являются графики поверхностей.

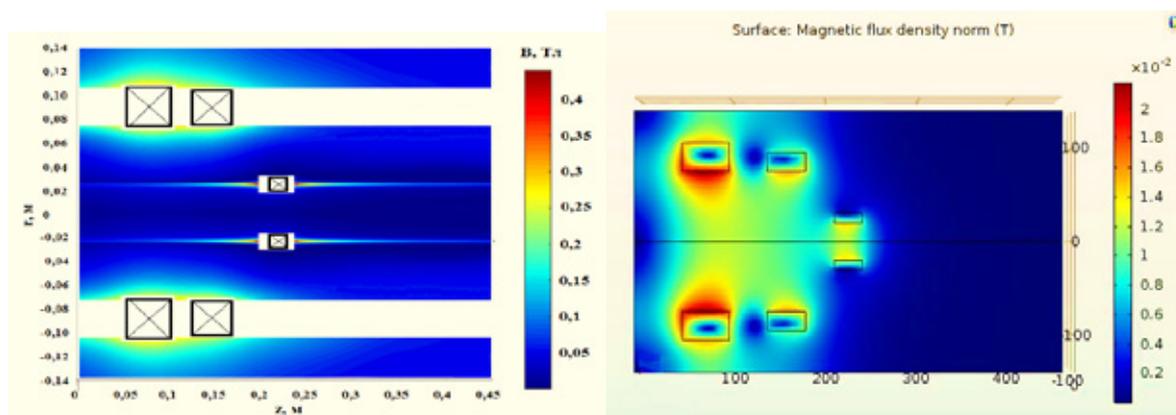


Рис. 1. Результаты работы программ Matlab и Comsol Multiphysics

### Заключение

Результатом вычисления задачи магнитного поля с помощью программы Matlab основанный на методике, которая включает в себя уравнения Био-Савара показывает:

1. Существует определенная погрешность вычисления магнитного поля вблизи соленоидов;
2. Расчет проводится на определенном расстоянии от соленоидов и отсутствует возможность построения задачи с учетом их влияния на технологический процесс.

При построении задачи в программе Matlab расчет проводился с помощью заданных условий плотностей тока, габаритов соленоида и параметров токоведущего провода. Таким образом коэффициент заполнения меди составил порядка единицы, что повлияло также на результат расчета.

Итоги вычисления в среде моделирования Comsol Multiphysics в дальнейшем могут быть использованы при проектировании нестандартных задач, а также существует возможность ее расширения: учет геометрии провода, неидеальность толщины витка проводника соленоида, наблюдать характер движения заряженных частиц в поставленной задаче и прочие условия. Однако самый весомый недочет программы является — ее цена.

### Выводы

Методика расчета в среде моделирования Comsol Multiphysics, основанная на решении уравнений Максвелла и методе конечных элементов позволяет более точно спрогнозировать процессы, проходящие в технологические задачи подобного рода и не только. Итоговый результат работы программы применим для дальнейших технических расчетов, так как программа полностью оптимизирована для решения технологических задач подобного характера. Проведенные исследования математического анализа распределения картины индукции магнитного поля позволяют в дальнейшем смоделировать характер движения заряженных частиц, и спрогнозировать параметры технологических процессов.

### Литература:

1. Сысоев, Ю. А. Проблемы ионно-плазменных технологий на основе вакуумно-дугового разряда и пути их решения // *Авиационно-космическая техника и технология*, 2011, вып. (№) 7. с. 38–42.
2. Ефремов, А. Н., Светцов И. В., Рыбкин В. В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии: учеб. пособие. Иваново.: Из-во ГОУВПО «ИГХТУ», 2006. 260 с.
3. Лисенков, А. А., Ветров Н. З. Вакуумные дуговые источники плазмы. СПб.: Энергоатомиздат, 2000.
4. Вершин, Н. Ф., Страумал Б. Б., Казакевич А. В. Коррозионная стойкость покрытий из оксида и нитрида титана на силикатном стекле, полученных методом вакуумно-дугового напыления // *Электровакuumная техника и технология: тр. научн.-техн. сем., Москва, 1997/98 г.* / НИТУ «МИСиС», Москва, 1999, с. 43–46.
5. Барченко, В. Т., Гончаров В. Д., Лисенков А. А. Вакуумно-дуговой разряд на интегрально-холодном катоде // *Плазменная эмиссионная электроника: тр. III международного Крейнделевского сем., Улан-Удэ, 23–20 июня 2009 г.* / БНЦ СО РАН, 2009. с. 68–73
6. Фурсей, Г. Н. Автоэлектронная эмиссия // *Соровский образовательный журнал*, 2000, вып. (№) 11. с. 96–103.
7. Данилин, Б. С., Неволин В. К., Сырчин В. К. Исследование магнетронных систем ионного распыления материалов. — *Электронная техника. Сер. Микроэлектроника*, (69), с. 37–44.

8. Пат. RU 2180472. Вакуумно-дуговой источник плазмы / Н.З. Ветров, В.Г. Кузнецов, А.А. Лисенков, Н.М. Радциг, И.В. Сабуров. Опубл. 10.03.2002, Бюл. № 3. с.
9. Молоковский, С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Москва Энергоатомиздат, 1991. 303 с.
10. Krzysztof, M.K. Biblioteka problemów eksploatacji: dzialanie i budowa magnetronowych urzadzen rozpylajacych. M.: Radom, 1977. 177
11. Плазменные ускорители / Под общей редакцией Л.А. Арцимовича. — М.: Машиностроение, 1973.
12. Соленоид. Электромагнит // RZA. ORG. UA. Все о релейной защите. URL: <http://rza.org.ua/elteh/read/59> — Solenoid — Elektromagnit\_59.html (дата обращения: 01.06.2016)..
13. Половко, А.М., Ганичев М.В. Mathcad для студента. М.: БХВ-Петербург, 2006. 336 с.
14. Дьяконов, В.П. Matlab: полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2011. 768 с.
15. Красников, Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics. М: НИЯУ МИФИ, 2012, 184 с.
- 16.

## Исследование полосы пропускания преобразователей различных конструкций, состоящих из двух пьезопластин

Прасолов Андрей Сергеевич, студент;

Кашеев Артем Андреевич, студент;

Пасечник Даниил Олегович, студент;

Хайрутдинов Дмитрий Игоревич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)

*В данной работе производится исследование расширения полосы пропускания пластинчатых преобразователей различных конструкций с помощью согласующего слоя или демпфера. На основе полученных данных выявляется наиболее эффективный метод демпфирования.*

**Ключевые слова:** *пластинчатый преобразователь, амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания, широкополосность*

### 1. Расчетная модель преобразователя, основные расчетные формулы

При изучении методов расширения полосы пропускания наиболее просто реализуемыми и анализируемыми являются методы акустического согласования импедансов пьезоактивного элемента и среды и методы механического демпфирования

Возможность расширения полосы пропускания пластинчатых преобразователей различных конструкций с помощью согласующего слоя или демпфера будем рассматривать на базе расчетной модели в виде двух пьезокерамических пластин 1 и 2 (рисунок 1). Будем считать, что преобразователь излучает левым торцом, нагруженным на воду с входным импедансом  $z_V = 1,5 \cdot 10^6 \text{ (Па} \cdot \text{с)/м}$  через согласующий слой с входным импедансом  $Z_V$ . Правым торцом преобразователь нагружен на структуру с входным импедансом  $Z_W$ , который, в свою очередь, контактирует с демпфером, представленным в виде полубезграничной среды с удельным импедансом  $z_w$ . Преобразователь работает в синфазном режиме.

Будем рассматривать излучение левым внешним торцом пластинчатого преобразователя. Тогда колебательную скорость этого торца можно записать в следующем виде:

$$\dot{\xi}_V(\psi) = K_V \cdot \dot{\xi}(0);$$

где  $K_V$  — коэффициенты передачи по колебательной скорости через структуру с входным импедансом  $Z_V$

Передние и тыльные накладки пластинчатых преобразователей могут быть промоделированы плоскопараллельными слоями. В связи с этим в вышеуказанных формулах  $K_V$ ,  $K_W$ ,  $Z_V$  и  $Z_W$  могут быть определены по следующим рекуррентным формулам:

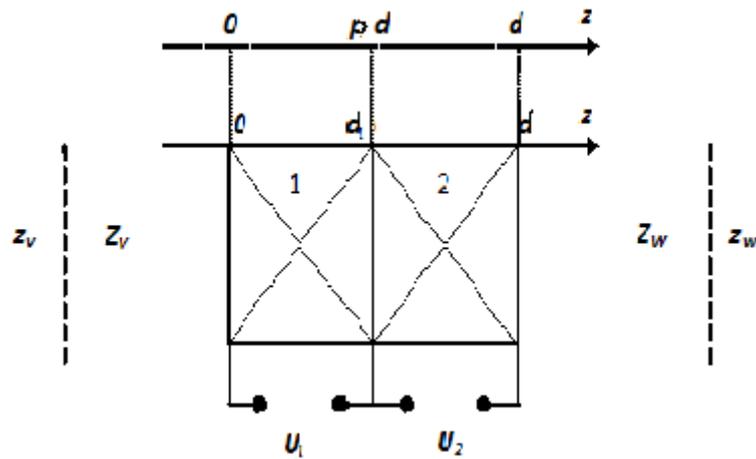


Рис. 1. Расчетная модель преобразователя

$$K_V = \prod_{q=1}^{n_V} K_{qV}; K_W = \prod_{q=1}^{n_W} K_{qW};$$

$$K_{qV,W} = \frac{1}{z_{qv,w} S_{V,W}^{(q)} \cos \psi_{qv,w} - j Z_{V,W}^{(q-1)} \sin \psi_{qv,w}};$$

$$Z_{V,W}^{(q)} = z_{qv,w} S_{V,W}^{(q)} \frac{Z_{V,W}^{(q-1)} \cos \psi_{qv,w} - j z_{qv,w} S_{V,W}^{(q)} \sin \psi_{qv,w}}{z_{qv,w} S_{V,W}^{(q)} \cos \psi_{qv,w} - j Z_{V,W}^{(q-1)} \sin \psi_{qv,w}},$$

где  $Z_{V,W}^{(q)}$  — входной импеданс слоя с номером  $q$ ;  $\psi_{qv,w}$ ,  $z_{qv,w}$  и  $S_{V,W}^{(q)}$  — соответственно волновая длина, удельный импеданс и площадь поперечного сечения  $q$ -го слоя при излучении во фронтальном (индекс  $V$ ) и в тыльном (индекс  $W$ ) направлениях;  $n_V$  и  $n_W$  — число слоев в соответствующих направлениях.

## 2. Выбор толщины согласующего слоя

Изменяя толщины пластин в преобразователе, можно получать различные конструкции преобразователей. В работе рассматривались 3 конструкции, когда  $p = 0,5$ , т. е. пьезопластины одинаковой толщины;  $p = 0,75$ , толщина одной пьезопластины в три раза больше другой;  $p = 0,25$  толщина одной пьезопластины в три раза меньше другой.

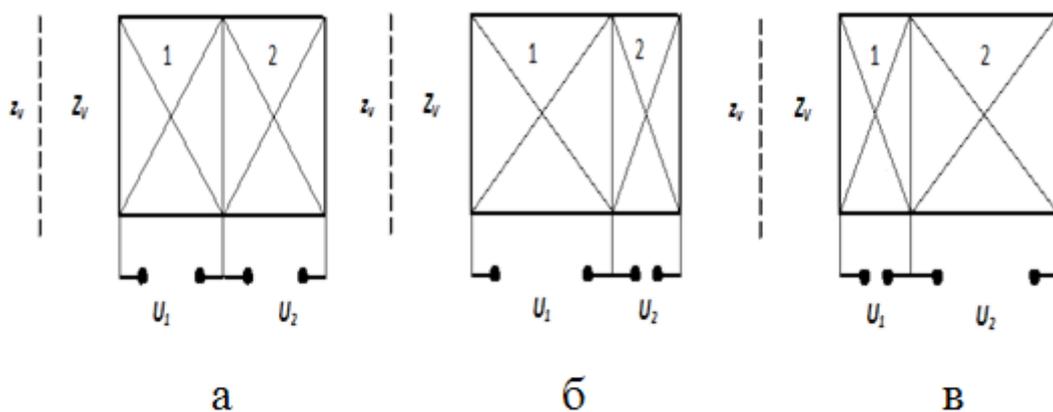


Рис. 2. Конструкции преобразователей: а — преобразователь первого типа ( $p = 0,5$ ), б — преобразователь второго типа ( $p = 0,75$ ), в — преобразователь третьего типа ( $p = 0,25$ )

Для начала необходимо выбрать оптимальную толщину согласующего слоя, при которой полоса пропускания преобразователя будет максимальной. Верхнее значение импеданса слоя определяется условием максимально реализуемой ширины полосы пропускания. Рассмотрим выбор толщины согласующего слоя на примере преобразователя первого типа. Выбор толщины согласующего слоя производился при удельном акустическом импедансе слоя  $Z_{сл} = 5,2 \cdot 10^6$  Па · с/м. На рисунке 3 видно, что амплитудно-частотная характеристика имеет два максимума. Толщина согласующего слоя подбиралась таким образом, чтобы максимумы были одинаковой амплитуды, чтобы преобразователь имел бы наибольшую полосу пропускания. Для рассматриваемого преобразователя получена волновая толщина согласующего слоя  $a_{сл} = 0,622$ . Ширину полосы пропускания можно определять по формулам либо в октавах, либо в процентах.

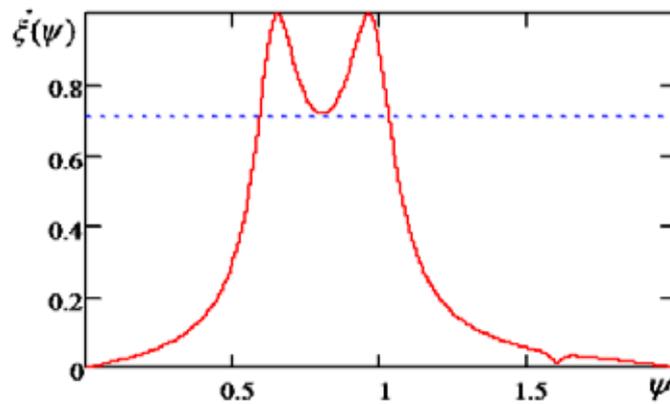


Рис. 3. Частотная характеристика преобразователя первого типа при  $Z_{сл} = 5.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}}$

### 3. Амплитуда колебательной скорости преобразователей с согласующим слоем или демпфером.

На рисунках 4, 5, 6 представлены амплитудно-частотная характеристика преобразователей с согласующим слоем или демпфером. Графики имеют схожий характер поведения кривых, поэтому для всех трех рисунков можно отметить общие закономерности: амплитуда колебательной скорости при использовании согласующего слоя больше амплитуды колебательной скорости при использовании демпфера при одинаковых значениях импедансов. Однако вариация импеданса при использовании согласующего слоя ограничена, т. к. при определенном значении наблюдается опускание амплитудно-частотной характеристики преобразователя ниже 3 дБ от максимума, что приводит к разбиению полосы пропускания на две полосы с меньшей шириной.

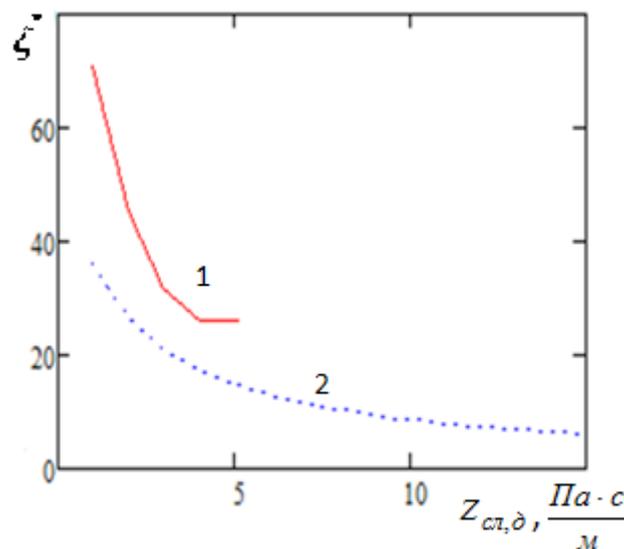


Рис. 4. Преобразователь первого типа, содержащий: 1 — согласующий слой, 2 — демпфер

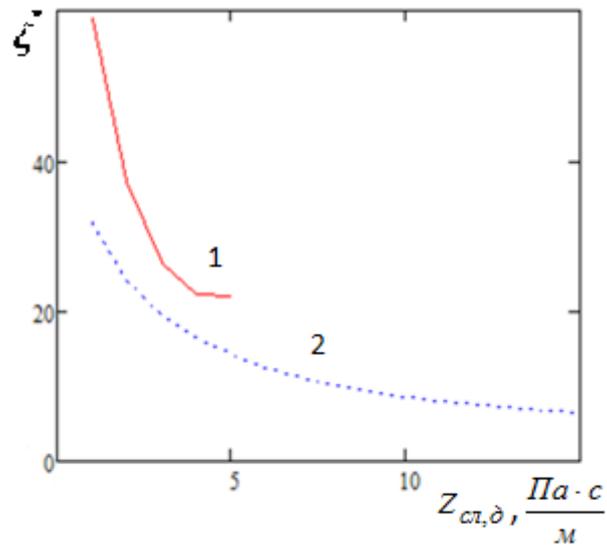


Рис. 5. Преобразователь второго типа, содержащий: 1 — согласующий слой, 2 — демпфер

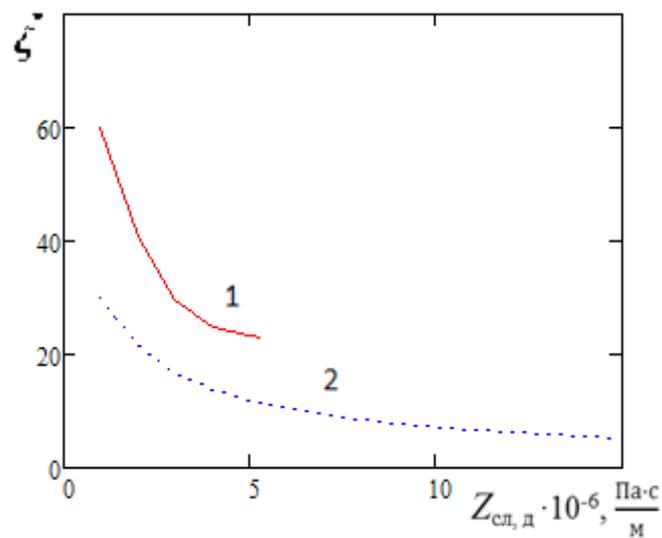


Рис. 6. Преобразователь третьего типа, содержащий: 1 — согласующий слой, 2 — демпфер

#### 4. Ширина полосы пропускания преобразователя с согласующим слоем или демпфером

На рисунках 7, 8, 9 представлены зависимости ширины полосы пропускания для разных преобразователей от импедансов согласующего слоя и демпфера. Графики имеют схожий характер поведения кривых, поэтому для всех трех рисунков можно отметить общие закономерности: ширина полосы пропускания при использовании согласующего слоя изменяется более резко, чем при использовании демпфера при одинаковых значениях импедансов. Однако следует отметить, что вариация импедансов при использовании согласующего слоя ограничена, а при использовании демпфера можно продолжать расширение полосы пропускания.

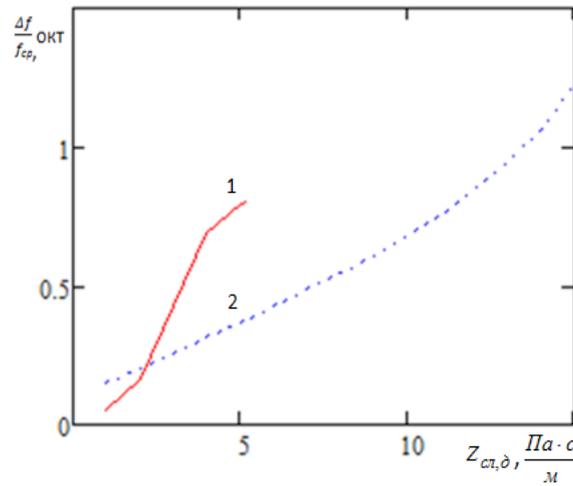


Рис. 7. Преобразователь первого типа, содержащий: 1 — согласующий слой, 2 — демпфер

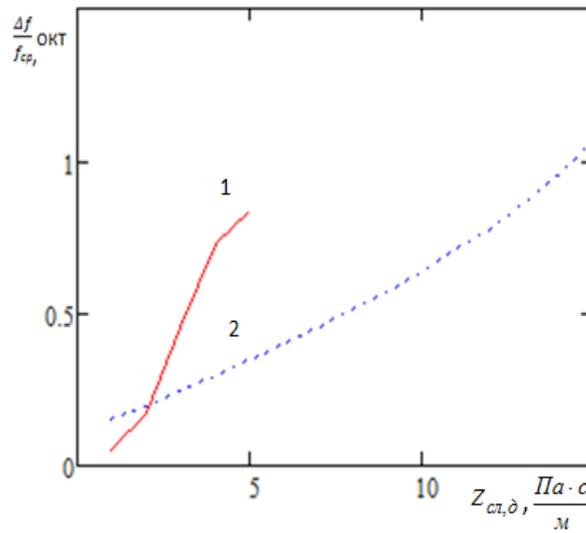


Рис. 8. Преобразователь второго типа, содержащий: 1 — согласующий слой, 2 — демпфер

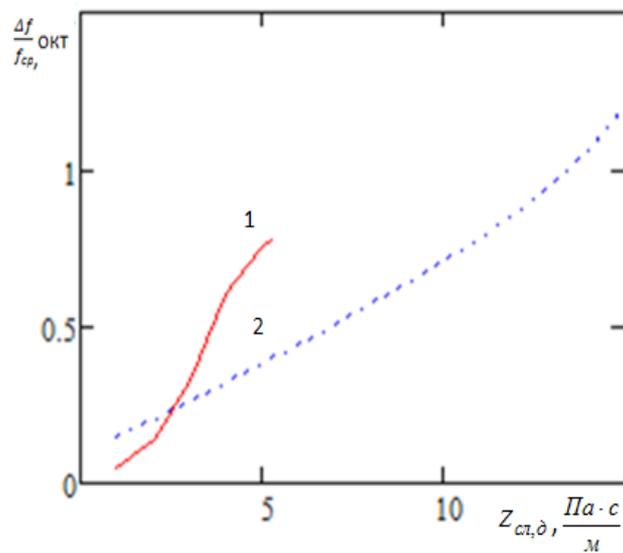


Рис. 9. Преобразователь третьего типа, содержащий: 1 — согласующий слой, 2 — демпфер

**5. Сравнительный анализ полученных зависимостей при использовании согласующего слоя**

Определенный интерес представляет сравнительный анализ полученных зависимостей при использовании согласующего слоя для преобразователей разных конструкций. Как видно из рисунка 10, наибольшая амплитуда колебательной скорости наблюдается у преобразователей первого типа ( $p = 0,5$ ), а наименьшая — у преобразователей второго типа ( $p = 0,75$ ). Однако наибольшая ширина полосы пропускания наблюдается у преобразователей второго типа ( $p = 0,75$ ), а наименьшая — у преобразователей третьего типа ( $p = 0,25$ ). Ход кривых для преобразователей первого ( $p = 0,5$ ) и второго ( $p = 0,75$ ) типа при увеличении импеданса согласующего слоя различаются мало. Следовательно, можно сделать вывод о том, что метод расширения полосы пропускания путем использования согласующего слоя оптимален для преобразователя первого типа ( $p = 0,5$ ).

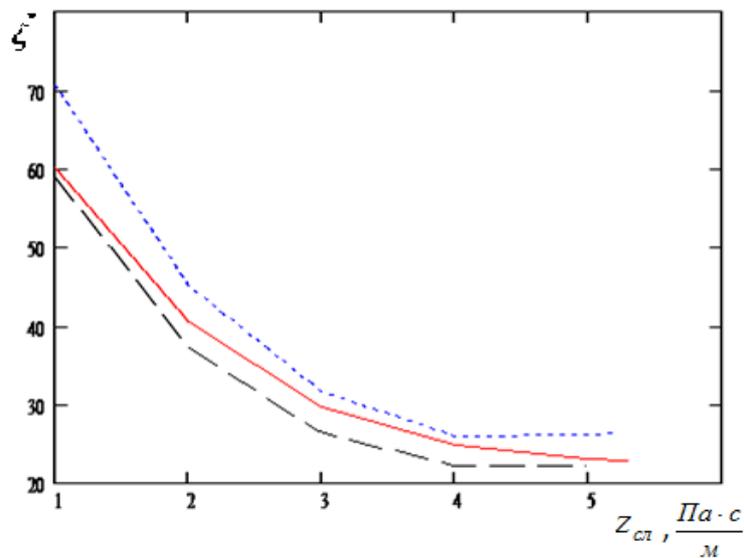


Рис. 10. Зависимость амплитуд колебательной скорости преобразователей первого (кривая ...), второго (кривая ---) и третьего (кривая —) типа, содержащих согласующий слой, от импеданса согласующего слоя

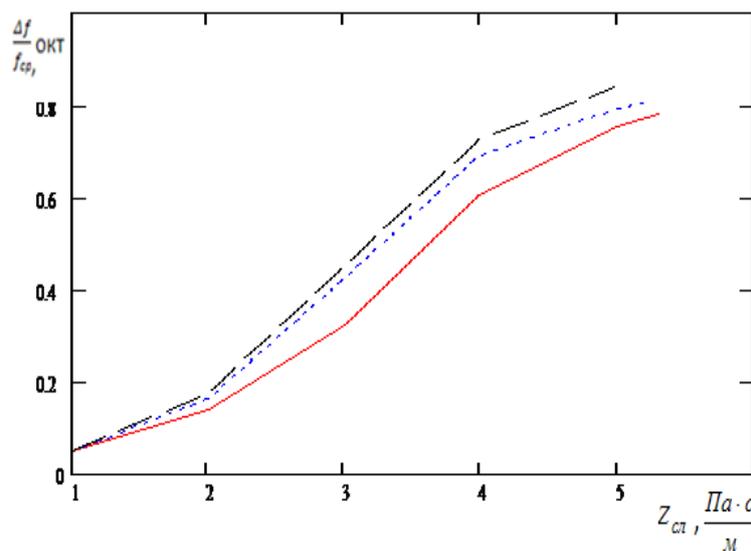


Рис. 11. Зависимость ширины полосы пропускания преобразователей первого (кривая...), второго (кривая ---) и третьего (кривая —) типа, содержащих согласующий слой, от импеданса согласующего слоя

### 6. Сравнительный анализ полученных зависимостей для расширения полосы пропускания с помощью демпфера

На следующем слайде представлен сравнительный анализ полученных зависимостей для расширения ПП с помощью демпфера. Можно отметить, что наибольшая амплитуда колебательной скорости также (как и в случае согласующего слоя) наблюдается у преобразователя первого типа ( $\rho = 0,5$ ), наименьшая — у преобразователя третьего типа ( $\rho = 0,25$ ). При этом наибольшая ширина полосы пропускания наблюдается у преобразователя третьего типа ( $\rho = 0,25$ ), а наименьшая — у преобразователя второго типа ( $\rho = 0,75$ ). Ход кривых для преобразователей третьего ( $\rho = 0,25$ ) и первого ( $\rho = 0,5$ ) типа при увеличении импеданса демпфера различаются незначительно. Следовательно, можно сделать вывод о том, что метод расширения полосы пропускания путем использования демпфера (как и в случае согласующего слоя) оптимален для преобразователя первого типа ( $\rho = 0,5$ ).

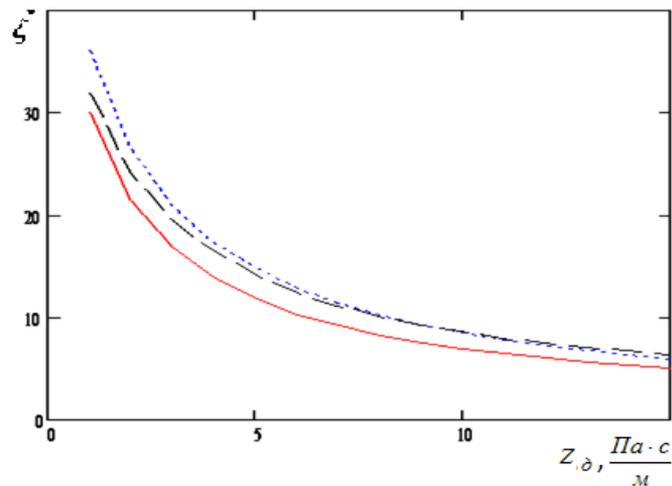


Рис. 12. Зависимость амплитуд колебательной скорости преобразователей первого (кривая ...), второго (кривая — —) и третьего (кривая —) типа, содержащих демпфера, от импеданса демпфера

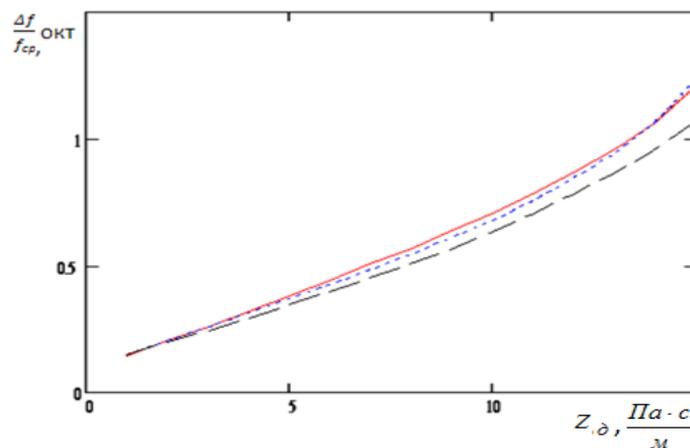


Рис. 13. Зависимость ширины полосы пропускания преобразователей первого (кривая...), второго (кривая — —) и третьего (кривая —) типа, содержащих демпфер, от импеданса демпфера

### Заключение

В результате проделанной работы по исследованию динамики изменения частотных характеристик и ширины ПП преобразователей разных конструкций от изменения удельного акустического импеданса согласующего слоя или демпфера были выявлены следующие закономерности:

— при одинаковом значении импедансов согласующего слоя и демпфера амплитуда колебательной скорости и ширина полосы пропускания у преобразователя с демпфером будут меньше, чем у преобразователя с согласующим слоем, поэтому целесообразно использовать метод расширения ПП с помощью согласующего слоя;

— метод расширения ПП с помощью согласующего слоя более эффективен для преобразователя первого типа ( $p = 0,5$ ) из представленных конструкций;

— Для представленных конструкций метод расширения полосы пропускания с помощью демпфера рекомендован также для преобразователя первого типа ( $p = 0,5$ ).

Анализируя все графики в целом, можно сделать вывод о том, что чем шире полоса пропускания, тем меньше амплитуда колебательной скорости. Поэтому при выборе способа расширения полосы пропускания необходимо определять для заданных целей оптимальное соотношение амплитуда колебательной скорости — ширина полосы пропускания.

Литература:

1. Дианов, Д. Б., Кузнецов В. М. Влияние переходных слоев на частотные характеристики стержневых преобразователей // Изд. ЛЭТИ, 1968, вып. 63, с. 60–76.
2. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля // Под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986, с. 42–45.
3. Ермолова, Н. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981, с. 240.

## Исследование широкополосной вибраторной антенны

Прасолов Андрей Сергеевич, студент;

Кашеев Артем Андреевич, студент;

Пасечник Даниил Олегович, студент;

Хайрутдинов Дмитрий Игоревич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе исследовалась широкополосность вибраторной антенны, при изменении расстояния между вибраторами, на широкополосную вибраторную антенну.*

Антенны вибраторного типа выполняются из металлических проводов, лент или труб и питаются как двухпроводными фидерами, так и коаксиальными кабелями. Существует большое разнообразие симметричных и несимметричных вибраторов и способов их питания.

К вибраторным антеннам предъявляются требования: возможная простота конструкции и эксплуатации; симметричная диаграмма направленности в плоскости Е, круговая диаграмма направленности в плоскости Н, низкий коэффициент стоячей волны в линии питания в относительно широкой полосе рабочих частот; наличие регулировочных элементов, заданный уровень излучаемой мощности; высокий коэффициент полезного действия, устойчивый режим работы при воздействии дождя и мокрого снега, малый уровень кроссполаризационного излучения; удобное крепление на опоре, обеспечение молниезащиты и защиты от статических зарядов.

### 1. Описание конструкции антенны

Антенна состоит из первого вибратора 1, второго вибратора 2, короткозамыкателей 3, симметрирующего устройства 4, фидера 5, соединителя радиочастотного 6. В антенне предусмотрены также конструктивные элементы, предназначенные для компенсации реактивной составляющей входного импеданса антенны.

Антенна возбуждается в зазоре между первым 7 и вторым 8 плечами первого вибратора 1, расположенном симметрично относительно оси симметрии антенны. Длина зазора не превышает одной пятидесятой длины волны. Поэтому неравномерностью в распределении тока на центральном проводнике кабеля в пределах зазора можно практически пренебречь. Следовательно, несимметричный коаксиальный кабель введен в область возбуждения антенны таким образом, что он не нарушает ни физической, ни электрической симметрии антенны.

### 2. Расчет геометрических размеров антенны

Разобъем проводники антенны на сегменты. Два соседних сегмента примем за пробный или за истинный диполь. Чем больше таких диполей, тем теоретически выше точность вычисления влияния электромагнитных полей проводников антенны друг на друга. Однако при неограниченном увеличении количества сегментов уменьшается величина численного

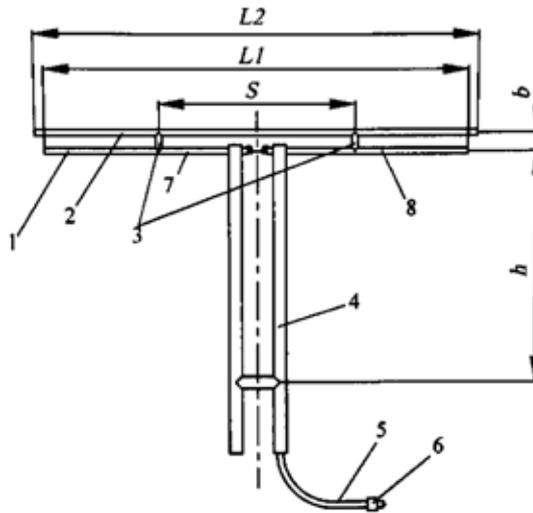


Рис. 1. Широкополосная симметричная вибраторная антенна

значения взаимной связи состоящих из них диполей, что приводит к увеличению ошибки вычислений и росту времени расчёта.

В качестве исходных размеров для численной модели антенны выберем следующие величины:

1. Длины первого и второго вибраторов  $L_1=L_2=1317$  мм;
2. Радиус проводников первого и второго вибраторов и короткозамыкателей  $r=10$  мм;
3. Расстояние между вибраторами  $b=56$  мм;
4. Расстояние между короткозамыкателями  $S=360$  мм;
5. Длина симметрирующего устройства  $h=725$  мм;
6. Расстояние между проводниками симметрирующего устройства  $D_{CV}=140$  мм;
7. Радиус проводников симметрирующего устройства  $r_{CV}=20$  мм;
8. Длина согласующего отрезка фидера  $L_k=125$  мм.

Согласующий отрезок фидера имеет волновое сопротивление, равное 75 Ом, и коэффициент укорочения, равный величине 1,5.

Этот вариант антенны будем называть исходным вариантом.

При изменении расстояния между вибраторами, возьмем значения, равные  $\pm 20\%$  и  $\pm 10\%$  от номинального.

### 3. Расчет параметров антенны с начальными условиями

Таблица 1. Координаты отрезков с начальными условиями

No	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)
1	-0.6585	0.0	0.781	-0.18	0.0	0.781	10.0
2	-0.18	0.0	0.781	0.18	0.0	0.781	10.0
3	0.18	0.0	0.781	0.6585	0.0	0.781	10.0
4	-0.6585	0.0	0.725	-0.18	0.0	0.725	10.0
5	-0.18	0.0	0.725	-0.07	0.0	0.725	10.0
6	-0.07	0.0	0.725	0.07	0.0	0.725	10.0
7	0.07	0.0	0.725	0.18	0.0	0.725	10.0
8	0.18	0.0	0.725	0.6585	0.0	0.725	10.0
9	0.18	0.0	0.725	0.18	0.0	0.781	10.0
10	-0.18	0.0	0.725	-0.18	0.0	0.781	10.0
11	-0.07	0.0	0.725	-0.07	0.0	0.0	20.0
12	0.07	0.0	0.725	0.07	0.0	0.0	20.0
13	-0.07	0.0	0.0	0.07	0.0	0.0	20.0
14	0.0	-0.7205	0.0	0.0	-0.7205	2.405	30.0
15	0.0	-0.7205	0.185	-2.0	-0.7205	0.185	10.0
16	0.0	-0.7205	0.185	2.0	-0.7205	0.185	10.0
17	0.0	-0.7205	0.37	-2.0	-0.7205	0.37	10.0
18	0.0	-0.7205	0.37	2.0	-0.7205	0.37	10.0

19	0.0	-0.7205	0.555	-2.0	-0.7205	0.555	10.0
20	0.0	-0.7205	0.555	2.0	-0.7205	0.555	10.0
21	0.0	-0.7205	0.74	-2.0	-0.7205	0.74	10.0
22	0.0	-0.7205	0.74	2.0	-0.7205	0.74	10.0
23	0.0	-0.7205	0.925	-2.0	-0.7205	0.925	10.0
24	0.0	-0.7205	0.925	2.0	-0.7205	0.925	10.0
25	0.0	-0.7205	1.11	-2.0	-0.7205	1.11	10.0
26	0.0	-0.7205	1.11	2.0	-0.7205	1.11	10.0
27	0.0	-0.7205	1.295	-2.0	-0.7205	1.295	10.0
28	0.0	-0.7205	1.295	2.0	-0.7205	1.295	10.0
29	0.0	-0.7205	1.48	-2.0	-0.7205	1.48	10.0
30	0.0	-0.7205	1.48	2.0	-0.7205	1.48	10.0
31	0.0	-0.7205	1.665	-2.0	-0.7205	1.665	10.0
32	0.0	-0.7205	1.665	2.0	-0.7205	1.665	10.0
33	0.0	-0.7205	1.85	-2.0	-0.7205	1.85	10.0
34	0.0	-0.7205	1.85	2.0	-0.7205	1.85	10.0
35	0.0	-0.7205	2.035	-2.0	-0.7205	2.035	10.0
36	0.0	-0.7205	2.035	2.0	-0.7205	2.035	10.0
37	0.0	-0.7205	2.22	-2.0	-0.7205	2.22	10.0
38	0.0	-0.7205	2.22	2.0	-0.7205	2.22	10.0
39	0.0	-0.7205	2.405	-2.0	-0.7205	2.405	10.0
40	0.0	-0.7205	2.405	2.0	-0.7205	2.405	10.0
41	0.0	-0.7205	0.0	-2.0	-0.7205	0.0	10.0
42	0.0	-0.7205	0.0	2.0	-0.7205	0.0	10.0
43	-2.0	-0.7205	0.0	-2.0	-0.7205	2.405	30.0
44	2.0	-0.7205	0.0	2.0	-0.7205	2.405	30.0

Рассчитаем параметры антенны на средней частоте 104 МГц и построим графики на частоте 92–116 МГц:

— Входное сопротивление (Ом):  $Z=72.54-j^2.69$

— коэффициент стоячей волны: 1.05.

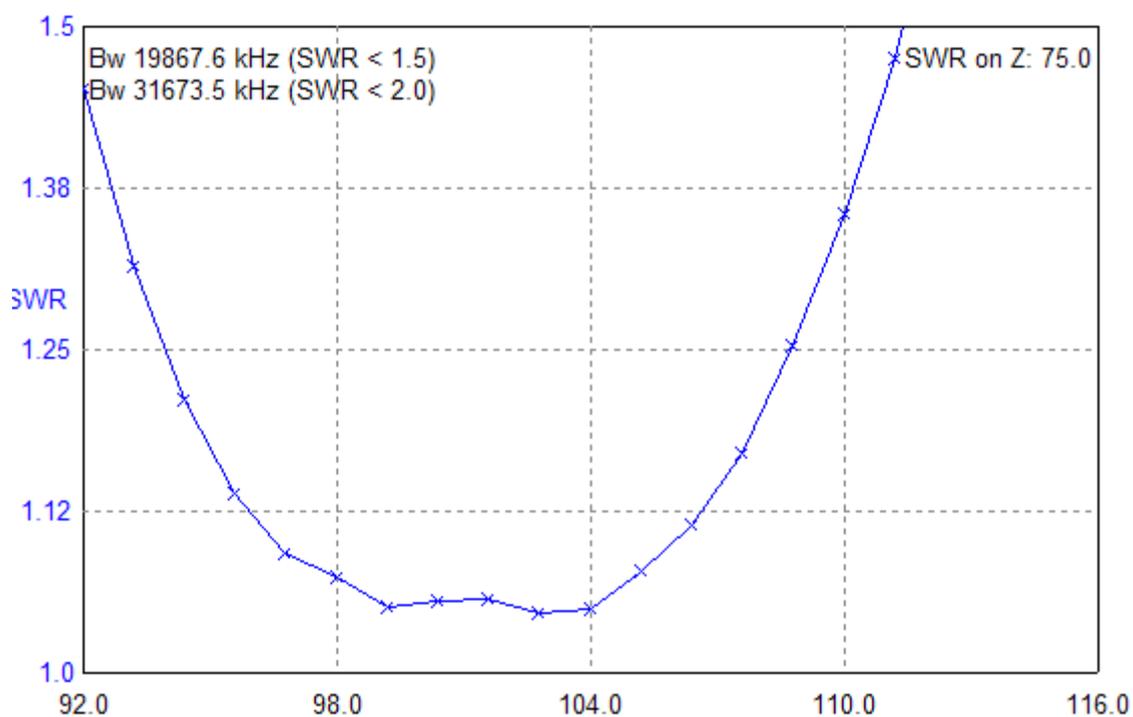


Рис. 2. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты

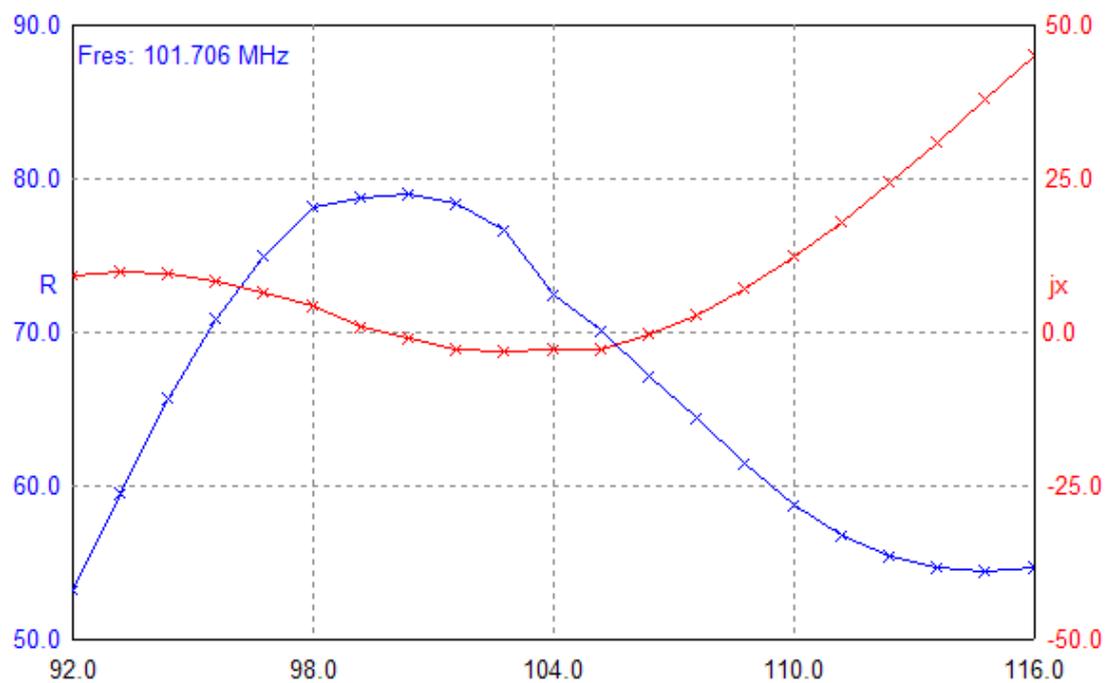


Рис. 3. Зависимость мнимого и реального сопротивления от частоты

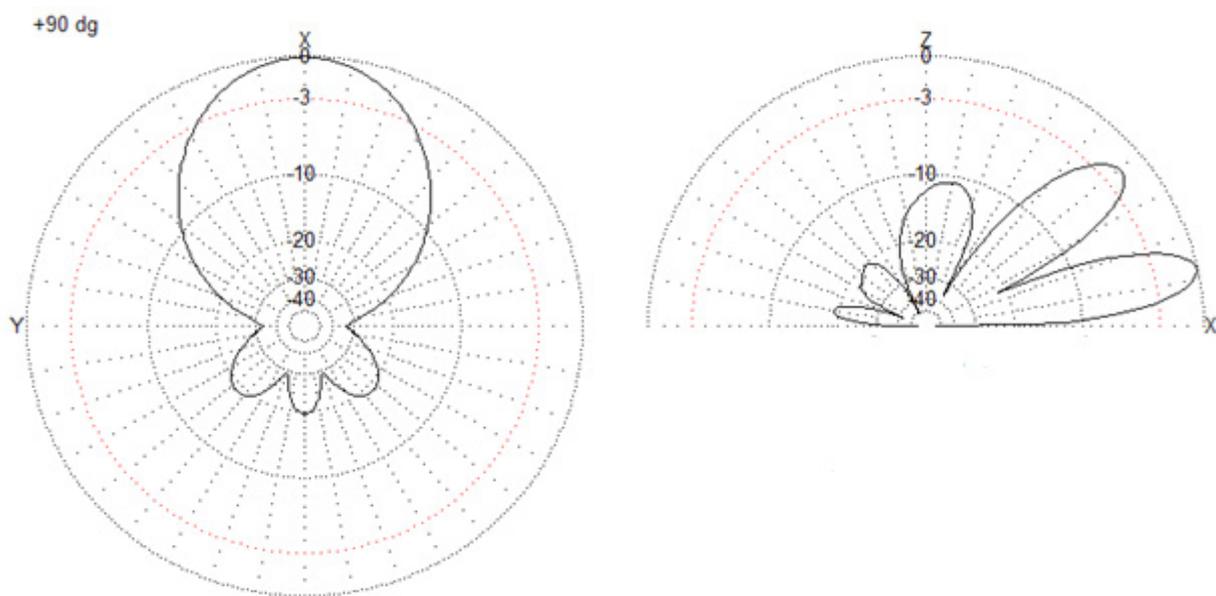


Рис. 4. Диаграмма направленности

4. Расчет параметров антенны при изменении расстояния между вибраторами.

Таблица 2. Координаты отрезков при изменении расстояния между вибраторами на 20% от номинального

No.	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)
1	-0.6585	0.0	0.781	-0.18	0.0	0.7866	10.0
2	-0.18	0.0	0.7866	0.18	0.0	0.7866	10.0
3	0.18	0.0	0.7866	0.6585	0.0	0.781	10.0
4	-0.6585	0.0	0.725	-0.18	0.0	0.7194	10.0
5	-0.18	0.0	0.7194	-0.07	0.0	0.725	10.0
6	-0.07	0.0	0.725	0.07	0.0	0.725	10.0
7	0.07	0.0	0.725	0.18	0.0	0.7194	10.0
8	0.18	0.0	0.7194	0.6585	0.0	0.725	10.0
9	0.18	0.0	0.7194	0.18	0.0	0.7866	10.0
10	-0.18	0.0	0.7194	-0.18	0.0	0.7866	10.0
11	-0.07	0.0	0.725	-0.07	0.0	0.0	20.0
12	0.07	0.0	0.725	0.07	0.0	0.0	20.0
13	-0.07	0.0	0.0	0.07	0.0	0.0	20.0
14	0.0	-0.7205	0.0	0.0	-0.7205	2.405	30.0
15	0.0	-0.7205	0.185	-2.0	-0.7205	0.185	10.0
16	0.0	-0.7205	0.185	2.0	-0.7205	0.185	10.0
17	0.0	-0.7205	0.37	-2.0	-0.7205	0.37	10.0
18	0.0	-0.7205	0.37	2.0	-0.7205	0.37	10.0
19	0.0	-0.7205	0.555	-2.0	-0.7205	0.555	10.0
20	0.0	-0.7205	0.555	2.0	-0.7205	0.555	10.0
21	0.0	-0.7205	0.74	-2.0	-0.7205	0.74	10.0
22	0.0	-0.7205	0.74	2.0	-0.7205	0.74	10.0
23	0.0	-0.7205	0.925	-2.0	-0.7205	0.925	10.0
24	0.0	-0.7205	0.925	2.0	-0.7205	0.925	10.0
25	0.0	-0.7205	1.11	-2.0	-0.7205	1.11	10.0
26	0.0	-0.7205	1.11	2.0	-0.7205	1.11	10.0
27	0.0	-0.7205	1.295	-2.0	-0.7205	1.295	10.0
28	0.0	-0.7205	1.295	2.0	-0.7205	1.295	10.0
29	0.0	-0.7205	1.48	-2.0	-0.7205	1.48	10.0
30	0.0	-0.7205	1.48	2.0	-0.7205	1.48	10.0
31	0.0	-0.7205	1.665	-2.0	-0.7205	1.665	10.0
32	0.0	-0.7205	1.665	2.0	-0.7205	1.665	10.0
33	0.0	-0.7205	1.85	-2.0	-0.7205	1.85	10.0
34	0.0	-0.7205	1.85	2.0	-0.7205	1.85	10.0
35	0.0	-0.7205	2.035	-2.0	-0.7205	2.035	10.0
36	0.0	-0.7205	2.035	2.0	-0.7205	2.035	10.0
37	0.0	-0.7205	2.22	-2.0	-0.7205	2.22	10.0
38	0.0	-0.7205	2.22	2.0	-0.7205	2.22	10.0
39	0.0	-0.7205	2.405	-2.0	-0.7205	2.405	10.0
40	0.0	-0.7205	2.405	2.0	-0.7205	2.405	10.0
41	0.0	-0.7205	0.0	-2.0	-0.7205	0.0	10.0
42	0.0	-0.7205	0.0	2.0	-0.7205	0.0	10.0
43	-2.0	-0.7205	0.0	-2.0	-0.7205	2.405	30.0
44	2.0	-0.7205	0.0	2.0	-0.7205	2.405	30.0

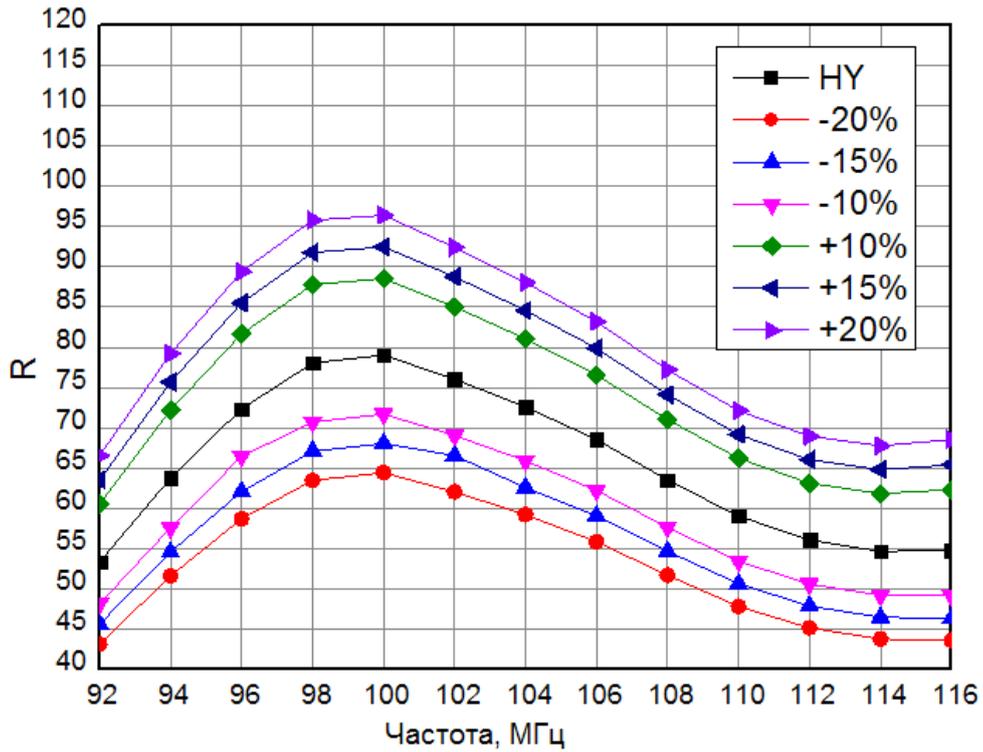


Рис. 5. Зависимость действительной части входного сопротивления от частоты при различных расстояниях между вибраторами

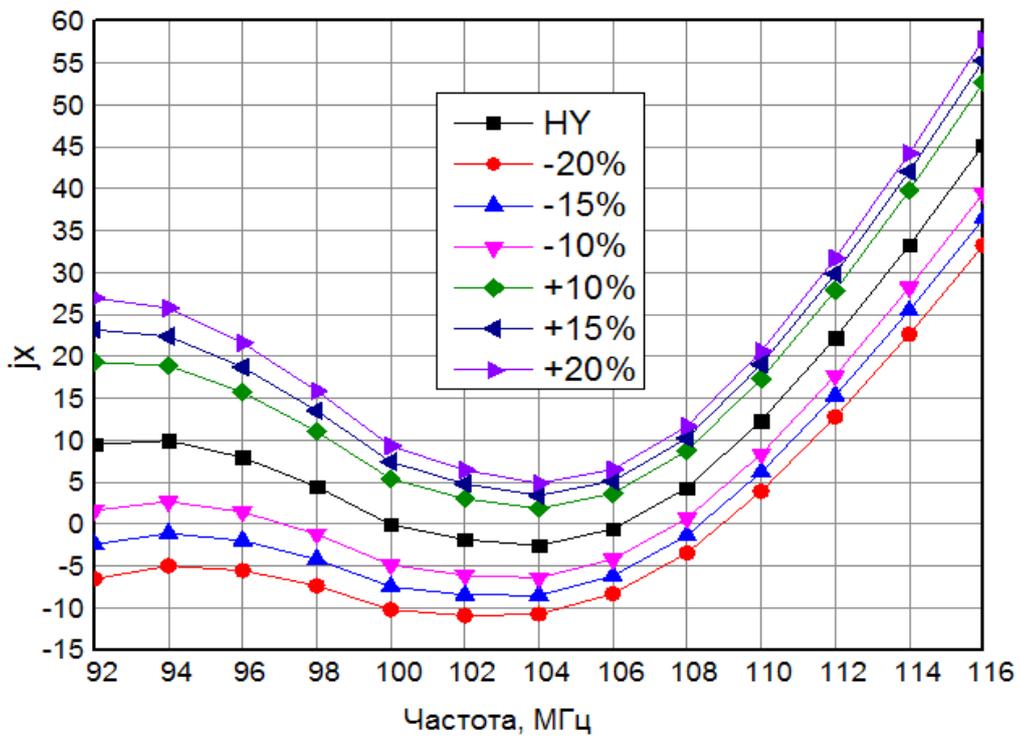


Рис. 6. Зависимость мнимой части входного сопротивления от частоты при различных расстояниях между вибраторами

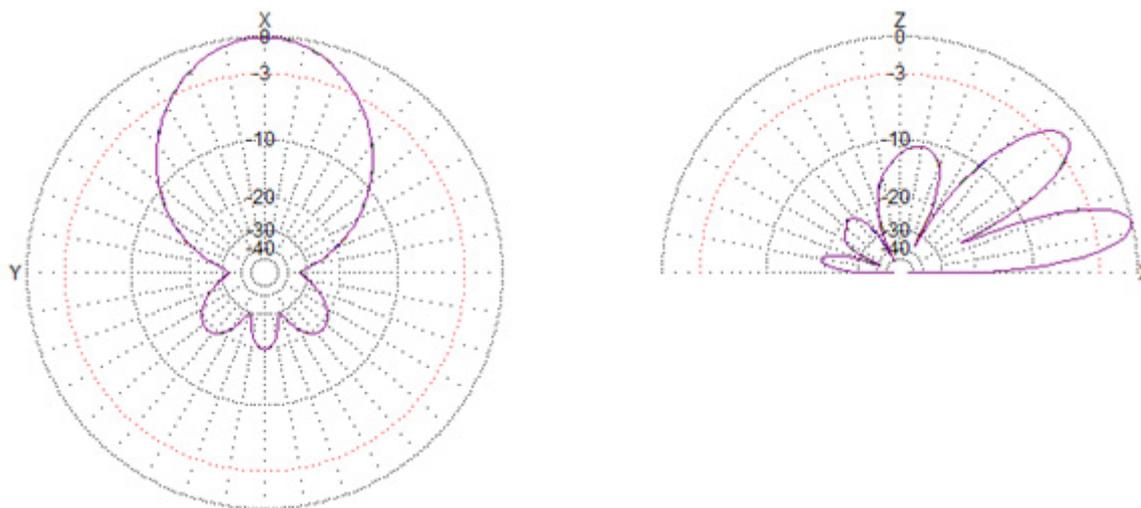


Рис. 7. Диаграмма направленности при различных расстояниях между вибраторами

Таблица 3. Зависимость коэффициента стоячей волны от уровня смещения в диапазоне частот 92–116МГц

Изменение расстояния	коэффициента стоячей волны												
	92 МГц	94 МГц	96 МГц	98 МГц	100 МГц	102 МГц	104 МГц	106 МГц	108 МГц	110 МГц	112 МГц	114 МГц	116 МГц
Номинальное	1,45	1,24	1,12	1,07	1,05	1,03	1,05	1,09	1,19	1,35	1,56	1,82	2,13
— 20%	1,76	1,47	1,3	1,22	1,24	1,28	1,33	1,38	1,46	1,58	1,74	1,94	2,18
— 15%	1,65	1,38	1,21	1,14	1,15	1,2	1,25	1,29	1,37	1,5	1,67	1,89	2,16
— 10%	1,56	1,31	1,15	1,06	1,08	1,13	1,17	1,22	1,3	1,44	1,63	1,86	2,14
+10%	1,43	1,3	1,24	1,23	1,2	1,14	1,08	1,05	1,14	1,32	1,55	1,83	2,17
+15%	1,45	1,34	1,31	1,3	1,26	1,2	1,14	1,1	1,15	1,32	1,55	1,84	2,18
+20%	1,49	1,4	1,37	1,36	1,31	1,25	1,19	1,14	1,17	1,33	1,56	1,86	2,2

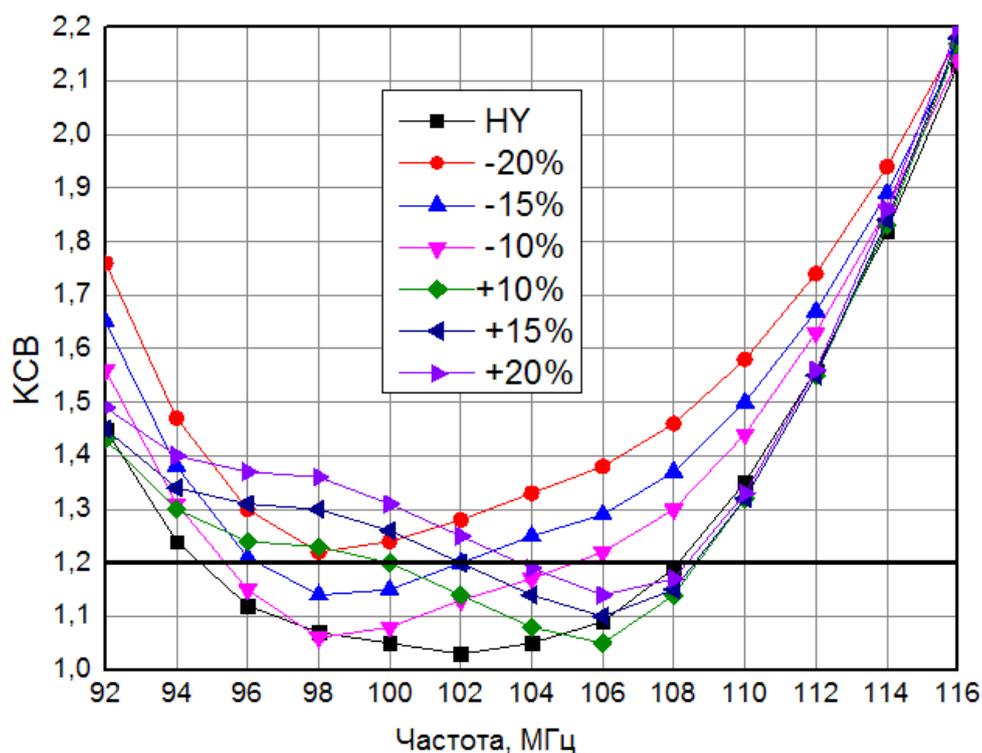


Рис. 8. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты при различных расстояниях между вибраторами

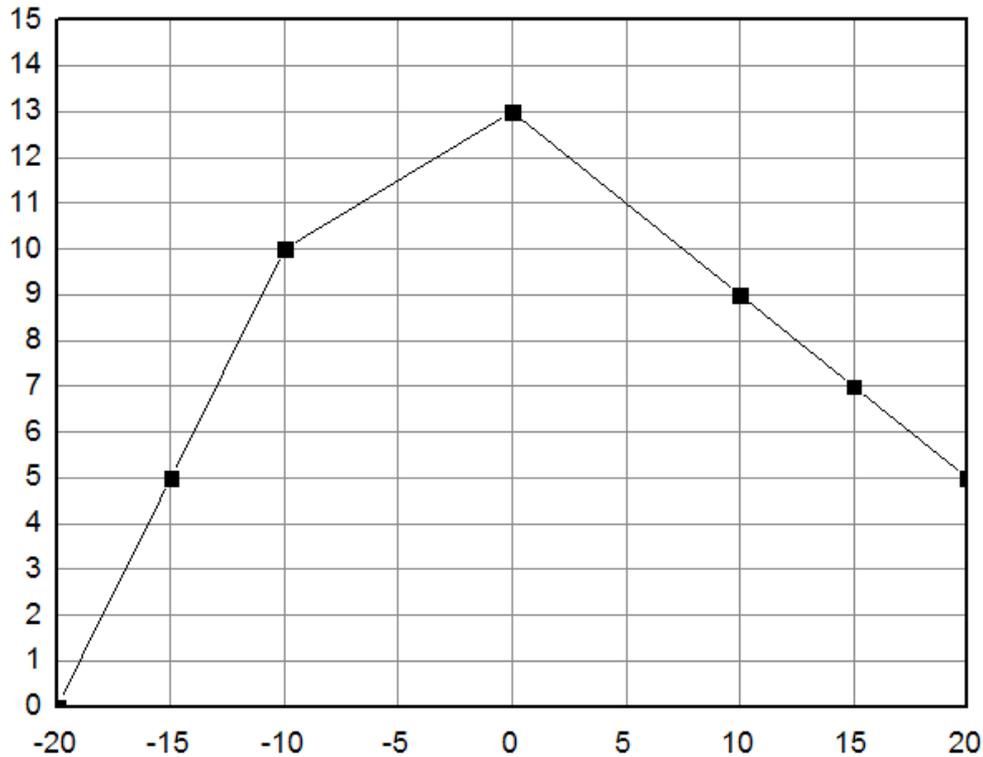


Рис. 9. График зависимости ширины реальной полосы рабочих частот антенны от изменения расстояния между вибраторами

### Заключение

В данной работе было рассмотрено влияние, изменения расстояния между вибраторами, на широкополосную вибраторную антенну. Выявлена и показана на графиках зависимость коэффициента стоячей волны устройства на заданном диапазоне частот при изменении расстояния на  $\pm 20\%$ ,  $\pm 15\%$  и  $\pm 10\%$  от номинального. В результате чего на интервале от 92–116 МГц изменение расстояния между вибраторами вызывает увеличение коэффициента стоячей волны в каждой соответствующей точке.

Можно сделать вывод, что при изменении расстояние между вибраторами: на  $+20\%$ , от номинального, условие:

коэффициент стоячей волны  $< 1.2$ , соблюдается на интервале 104–108 МГц. При изменении расстояния на  $+15\%$  интервал расширяется: 102–108 МГц. При уменьшении расстояния на  $15\%$ : 98–102 МГц. Если изменить расстояние между вибраторами на  $+10\%$ , от номинального, интервал, на котором соблюдается условие коэффициент стоячей волны: 100–108 МГц. А если уменьшить на  $10\%$  то, 96–104 МГц. Условие: коэффициент стоячей волны  $< 1.2$ , не выполняется на всем измеряемом диапазоне частот, если расстояние между вибраторами уменьшить на  $20\%$ . Допустимое отклонение расстояния между вибраторами, при сохранении заданной полосы рабочих частот, может составить  $+10\%$  от номинального.

### Литература:

1. Широкополосные вибраторные антенны: учебное пособие / Н. И. Войтович, А. В. Ершов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007.
2. И. Гончаренко. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA. М.: «Радиософт». — 2002.

## Моделирование алгоритма работы бесплатформенной инерциальной навигационной системы для контроля состояния рельсового пути

Прасолов Андрей Сергеевич, студент;

Кашеев Артем Андреевич, студент;

Пасечник Даниил Олегович, студент;

Хайрутдинов Дмитрий Игоревич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

В представленной работе проведено моделирование в среде MATLAB/Simulink, в результате которого получены параметры ориентации и навигации. Проведен сравнительный анализ с данными встроенного вычислителя БИНС.

Ключевой проблемой обеспечения безопасности на железных дорогах остается контроль состояния рельсового пути. В России, а особенно в азиатской ее части, существуют дефицит железнодорожных путей, которые вносят огромный вклад в экономическое, демографическое и культурное развитие региона. От состояния рельсового пути зависит безопасность и скорость при перевозке людей и доставке товаров. В настоящее время контроль рельсового пути проводится с помощью путеизмерительных вагонов и ручных путеизмерительных тележек. Для определения геометрических параметров рельсовых нитей таких, как уровень, продольный уклон, кривизна, отклонения от прямолинейного положения в плане прямых участков пути, горизонтальные и вертикальные ускорения кузова, в ПВ используется информация от БИНС.

### 1. Разработка модели в среде Matlab/Simulink

Моделирование служит для наблюдения, предсказания поведения объекта и выбора свойств объекта (критерия эффективности работы), оптимизации работы при

задании тех или иных входных условий, воздействий. Применительно к БИНС можно выделить такие задачи моделирования как исследование математической модели БИНС в реальном времени и определение точности выработки параметров с учетом погрешностей ЧЭ, входящих в БИНС, и внешних возмущений. Следовательно, составление достоверной модели является ключевым моментом.

Для моделирования алгоритма БИНС была выбрана среда Matlab/Simulink. Эта программа позволяет применять различные подходы к моделированию, имеет расширенный набор функций, блоков и пакетов для аппроксимации, статистической обработки данных, решения дифференциальных уравнений, позволяет проводить дифференциальные и интегральные исчисления. Пакет Simulink расширяет возможности для моделирования, имитации поведения сложных систем и разработки новых систем и подсистем.

В соответствии со структурной схемой БИНС построим модель в среде Matlab/Simulink. При моделировании не рассматривался вертикальный канал, поэтому исключается блок выработки вертикальной скорости, и проекций высоты.

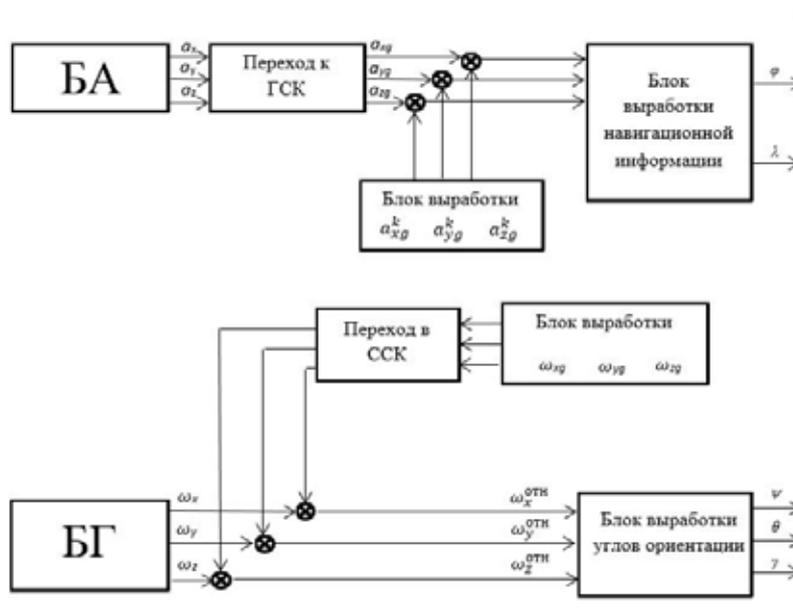


Рис. 1. Блок-схема работы алгоритма БИНС

Блок акселерометров (БА) вырабатывает проекции вектора кажущегося ускорения  $n_x, n_y, n_z$  на оси ССК. Далее с помощью матрицы  $C$  производится пересчет  $n_x, n_y, n_z$  из ССК в ГСК (блок «Переход к ГСК»). Матрица  $C$  формируется по данным от ДУС согласно выражению. В результате образуются проекции кажущегося ускорения  $a_{xg}, a_{yg}$  и  $a_{zg}$ .

В «Блоке выработки  $a_{xg}^k, a_{yg}^k$  и  $a_{zg}^k$ » формируются компенсирующие ускорения, которые вычитаются из  $a_{xg}, a_{yg}$  и  $a_{zg}$ . В результате будут получены проекции ускорения относительного движения объекта  $\dot{V}_{xg}, \dot{V}_{yg}$  и  $\dot{V}_{zg}$ .

Для определения координат местоположения объекта (широты и долготы) ускорения относительного движения поступают в «Блок выработки навигационной информации», где производится двукратное интегрирование  $\dot{V}_{xg}$  и  $\dot{V}_{zg}$  при начальных условиях.

В «Блоке выработки  $\omega_{xg}, \omega_{yg}, \omega_{zg}$ » формируются проекции вектора абсолютной угловой скорости географического трехгранника  $\omega_{xg}, \omega_{yg}, \omega_{zg}$ . Затем полученные проекции с помощью матрицы  $A$  перепроектируются из ГСК в ССК, то есть формируются компоненты переносной угловой скорости  $\omega_x^{пер}, \omega_y^{пер}, \omega_z^{пер}$  (блок «Переход в ССК»). Затем эти составляющие поступают в часть схемы, отвечающей за алгоритм ориентации.

Из показаний датчиков угловой скорости (БГ — блок гироскопов) исключаются компоненты  $\omega_x^{пер}, \omega_y^{пер}, \omega_z^{пер}$ . Таким образом, будут получены относительные угловые скорости  $\omega_x^{отн}, \omega_y^{отн}, \omega_z^{отн}$ , из которых образуются  $\psi', \theta'$  и  $\gamma'$ . Далее производится их интегрирование и на выход «Блока углов выработки ориентации» поступают данные о углах рыскания  $\psi$ , тангажа  $\theta$  и крена  $\gamma$ .

Основные соотношения:

Проекция относительной угловой скорости

$$\left. \begin{aligned} \omega_x^{отн} &= \dot{\gamma} + \dot{\psi} \sin \theta; \\ \omega_y^{отн} &= \dot{\theta} \sin \gamma + \dot{\psi} \cos \gamma \cos \theta; \\ \omega_z^{отн} &= -\dot{\psi} \sin \gamma \cos \theta + \dot{\theta} \cos \gamma. \end{aligned} \right\}$$

Кинематические уравнения в углах Эйлера-Крылова

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi} &= \frac{1}{\cos \theta} [\omega_y^{отн} \cos \gamma - \omega_z^{отн} \sin \gamma]; \\ \dot{\theta} &= \omega_y^{отн} \sin \gamma + \omega_z^{отн} \cos \gamma; \\ \dot{\gamma} &= \omega_x^{отн} - \operatorname{tg} \theta [\omega_y^{отн} \cos \gamma - \omega_z^{отн} \sin \gamma]. \end{aligned} \right\}$$

Углы поворотов Эйлера-Крылова

$$A_\psi = \begin{vmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{vmatrix},$$

$$A_\theta = \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, A_\gamma = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{vmatrix}$$

$$A_\theta = \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, A_\gamma = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{vmatrix}$$

## 2. Результаты моделирования

Рассмотренные данные были взяты с участка ж. д. «Вырица-Коммунар».

В результате моделирования БИНС с учетом начальных значений мы получили следующие результаты и сравнили их с вычислителем БИНС, на рисунках показаны результаты вычислителя и модели. Рассчитаем абсолютную погрешность для каждого графика.

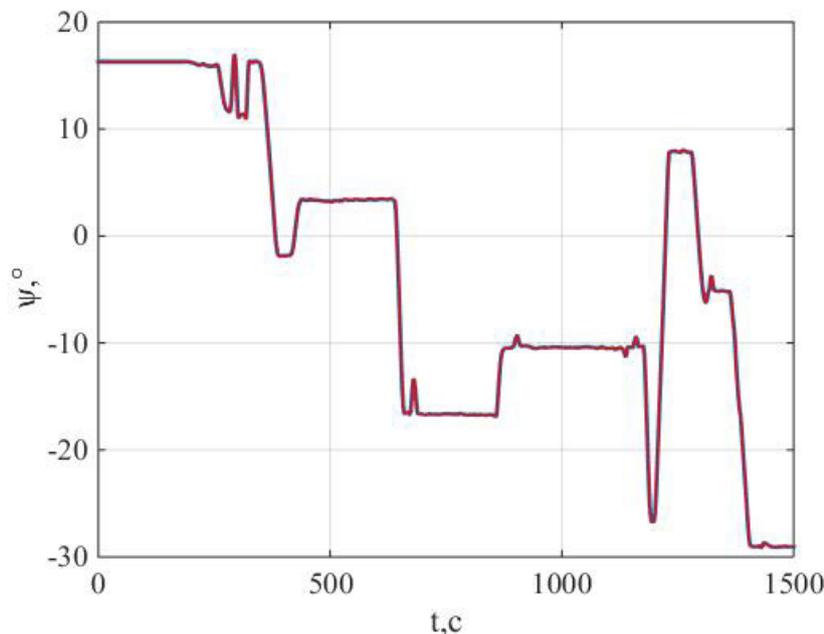


Рис. 2. Угол рыскания

Погрешность моделирования составила 0,36'. Описать ставлено максимальное отклонение показаний модели от увел рисунок. На увеличенном фрагменте графика пред- вычислителя.

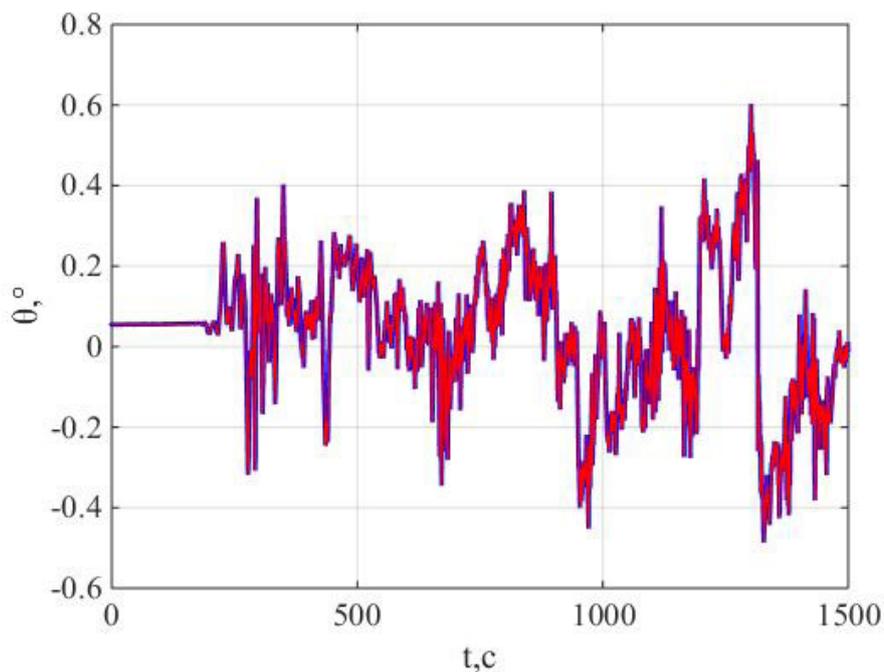


Рис. 3. Угол тангажа

Погрешность моделирования составила 0,72'

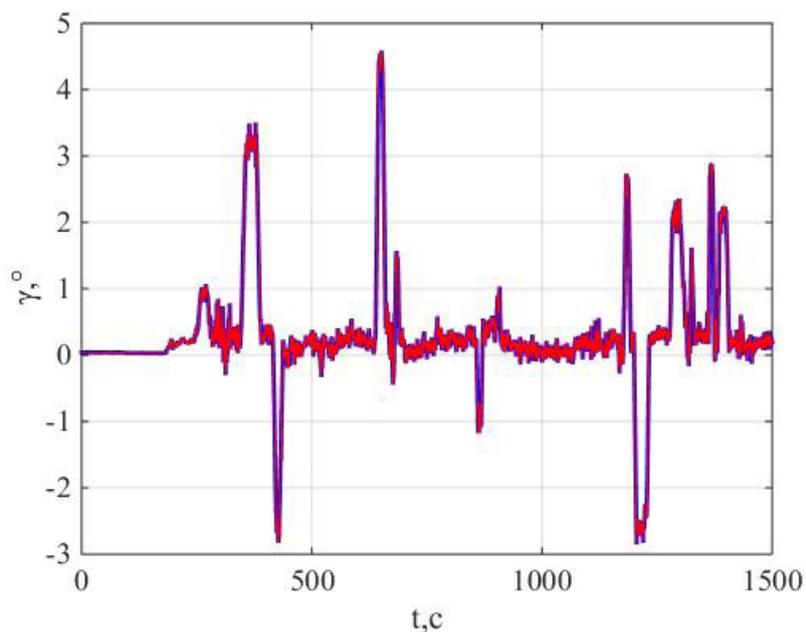


Рис. 4. Угол крена

Погрешность моделирования составила 4,32'

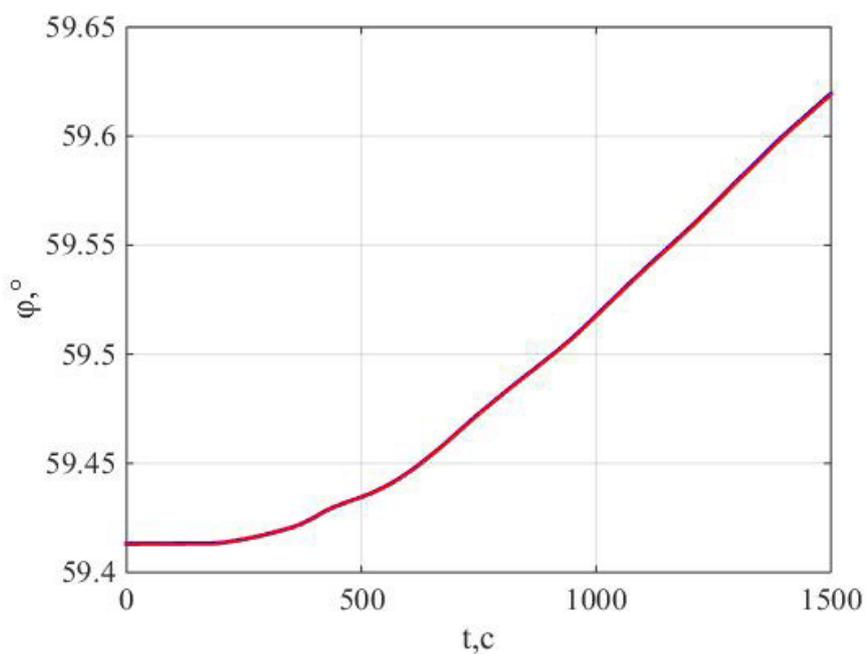


Рис. 5. Широта

Погрешность моделирования составила 2,16»

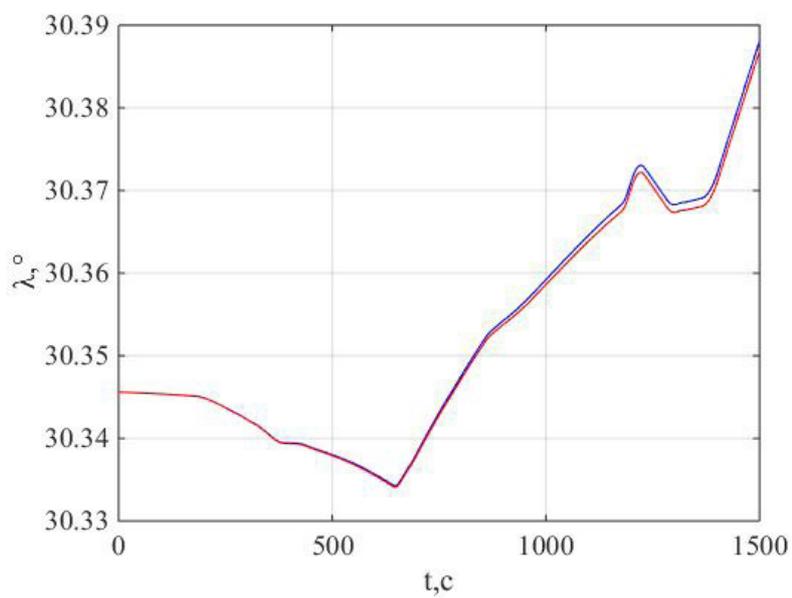


Рис. 6. Долгота

Погрешность моделирования составила 3,24»

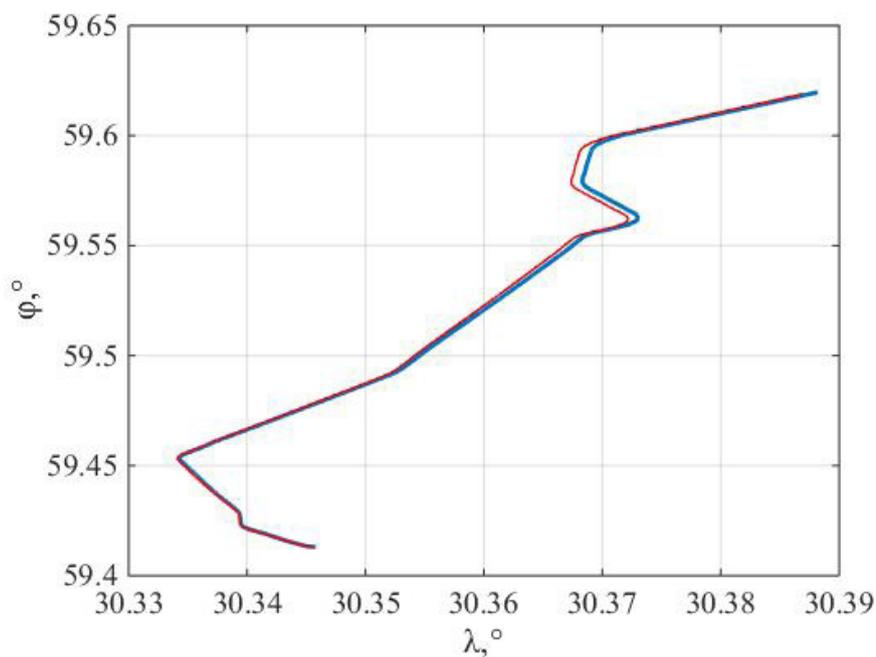


Рис. 7. Траектория движения объекта

### Заключение

В данной работе была разработана модель алгоритма БИНС в среде MATLAB/Simulink. Получены параметры ориентации (углы курса, тангажа и крена), навигации

(долгота и широта), также представлена траектория движения объекта. Получены погрешности между нашей моделью и вычислителем, максимальная погрешность моделирования составила 4.32» по параметрам ориентации и 3,24» по параметрам навигации.

### Литература:

1. Боронахин, А. М., Иванов П. А., Подгорная Л. Н., Ткаченко А. Н. Интегрированные инерциальные технологии динамического мониторинга рельсового пути. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 170 с.
2. Филипеня, Н. С. Разработка инерциальных методов и средств измерения параметров рельсового пути /диссертация на соискание уч. ст. к. т. н. / СПб, 2007.

## Разработка блока управления для стиральной машины

Прасолов Андрей Сергеевич, студент;

Кашеев Артем Андреевич, студент;

Пасечник Даниил Олегович, студент;

Хайрутдинов Дмитрий Игоревич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В данной работе разрабатывается один из вариантов блока управления стиральной машиной. Основой для этого блока послужит микроконтроллер 8051 фирмы Intel.*

**Ключевые слова:** блок управления, контроллер, блок схема

### 1. Разработка блока управления

Параметры блока управления определяются исходя из технического задания:

1. Установка программы стирки с помощью клавиатуры;
2. Жидкокристаллический индикатор;
3. Контроль закрытия двери, температуры воды в баке и протечки.

Для выполнения первого пункта необходимо включить в состав устройства клавиатуру. Для выполнения условий достаточно клавиатуры из пяти кнопок для выбора программы стирки и отдельно расположенной кнопки включения устройства. В разрабатываемом устройстве используются кнопки без фиксации РВ-22Е88, т. к. они обладают подходящими габаритами, невысокой стоимостью и предназначены для монтажа на плату. Для включения/выключения устройства используется переключатель ASW-09–12.

Для индикации будет использоваться жидкокристаллический индикатор ITM-1601 рассчитанный на 16 знаков. Причинами, по которым был выбран именно этот индикатор, являются:

— контроллер индикатора — HD44780. Контроллер HD44780 фирмы Hitachi фактически является промышленным стандартом и широко применяется при производстве алфавитно-цифровых ЖКИ-модулей. Аналоги этого контроллера или совместимые с ним по интерфейсу и командному языку микросхемы, выпускают множество фирм, среди которых: Epson, Toshiba, Sanyo, Samsung, Philips. Еще большее число фирм производят ЖКИ-модули на базе данных контроллеров. Таким образом, устройства на базе этого контроллера обладают не сложным и легко настраиваемым интерфейсом, легки в управлении, надежны в работе, а также легко совместимы с другими устройствами;

- индикатор обладает встроенным знакогенератором;
- небольшие масса и габариты;
- невысокая стоимость и широкое распространение, что обеспечивает легкодоступность.

Для контроля закрытия двери используется геркон REEDSW-2.

В качестве температурного датчика используется термодатчик, закрепленную на стенке бака. Основные преи-

мущества термодатчика относительно других вариантов температурных датчиков: термодатчики являются небольшими, точными и относительно недорогими устройствами, обладающими высокой линейностью функции передачи. К минусам можно отнести невысокий уровень выходного сигнала, требующий усиления и компенсацию температуры холодного спая. Для выбора типа термодатчика нужно оценить поведение коэффициента Зеебека термодатчика в диапазоне температур предполагаемых измерений, и выбрать тип термодатчика с наибольшей линейностью. На рисунке 1 приведены зависимости коэффициента Зеебека термодатчика от температуры для основных типов термодатчиков.

Как видно, наиболее подходящим является тип S.

В качестве датчика протечки используется геркон, встроенный в поплавок, находящийся в нижней части машины. Если вода превышает допустимый уровень, поплавок всплывает и замыкает контакты датчика.

#### 1.1 Структурная схема прибора.

Структурная схема устройства представлена на рисунке 2.

Сигналы с датчиков поступают на микроконтроллер. Клавиатура используется для управления устройством. Индикатор выводит информацию о процессах, происходящих в устройстве. Блок питания обеспечивает все составные части устройства питанием с необходимыми параметрами.

#### 1.2 Принципиальная электрическая схема.

По функциональной схеме, описанной в предыдущем пункте, построена схема электрическая принципиальная, представленная на рисунке 3.

Разъем X1 — штепсельная вилка, через которую на устройство поступает питание из бытовой электросети с параметрами 220 В 50 Гц. Напряжение с такими параметрами используется в данном устройстве для питания нагревателя и электродвигателя. Для питания цифровой части устройства напряжение сначала преобразуется на трансформаторе Тг1, со вторичной обмотки которого снимается напряжение 9В. Далее в цепи расположен диодный мост VD1, выпрямляющий данное напряжение. Микросхема DA2 — стабилизатор напряжения 7805 — снижает значения напряжения до 5В, необходимых для питания микроконтроллера и индикатора. Кнопка S1 это выключатель устройства. HG1 — жидкокристаллический индикатор, выводящий информацию о текущем режиме

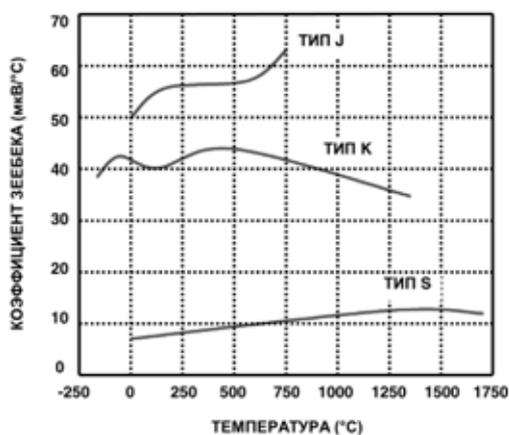


Рис. 1. Зависимости коэффициента Зеебека от температуры

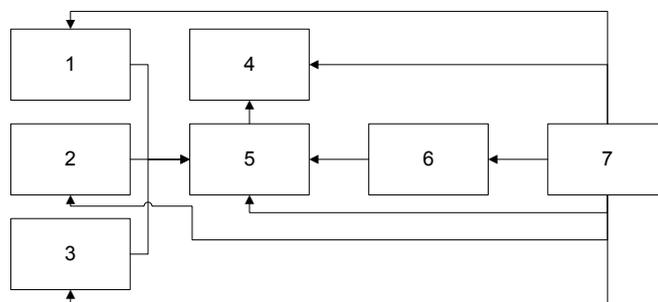


Рис. 2. Схема структурная, где: 1 — датчик температуры; 2 — датчик протечки; 3 — датчик закрытия двери; 4 — жидкокристаллический индикатор; 5 — микроконтроллер; 6 — клавиатура; 7 — блок питания

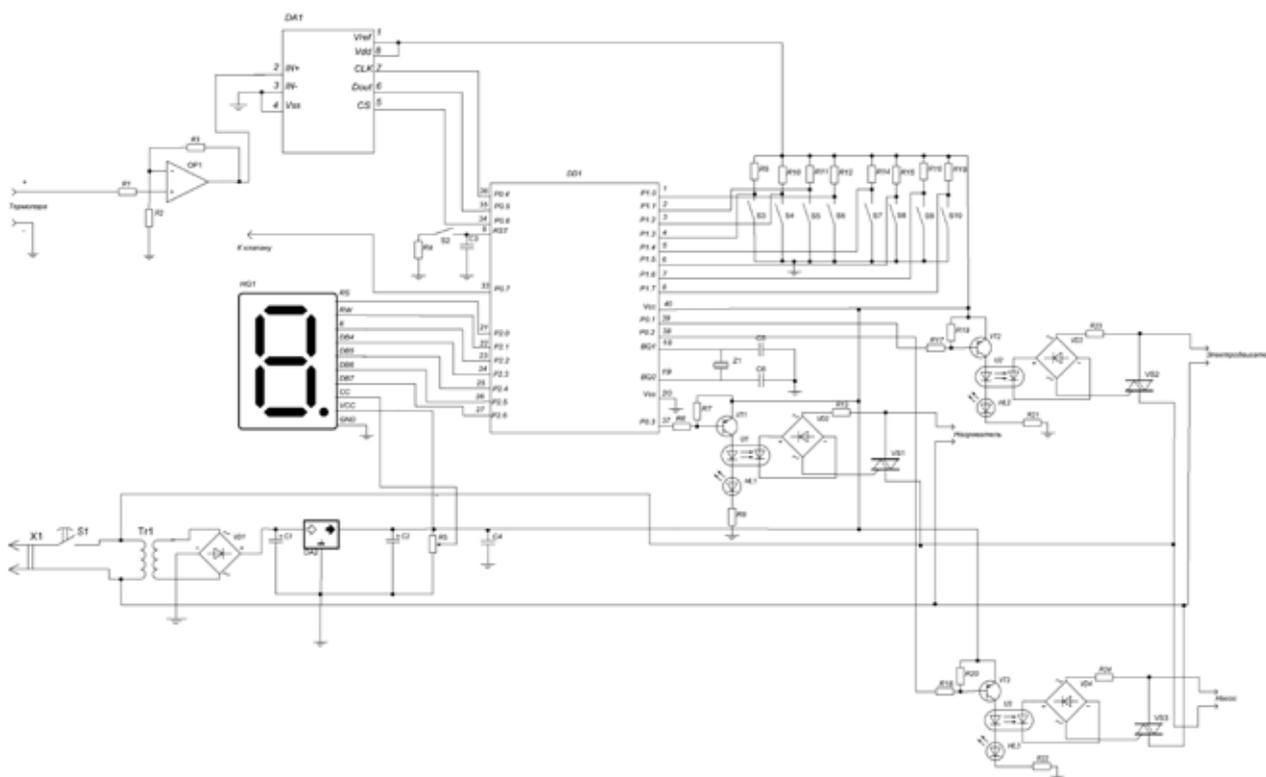


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная

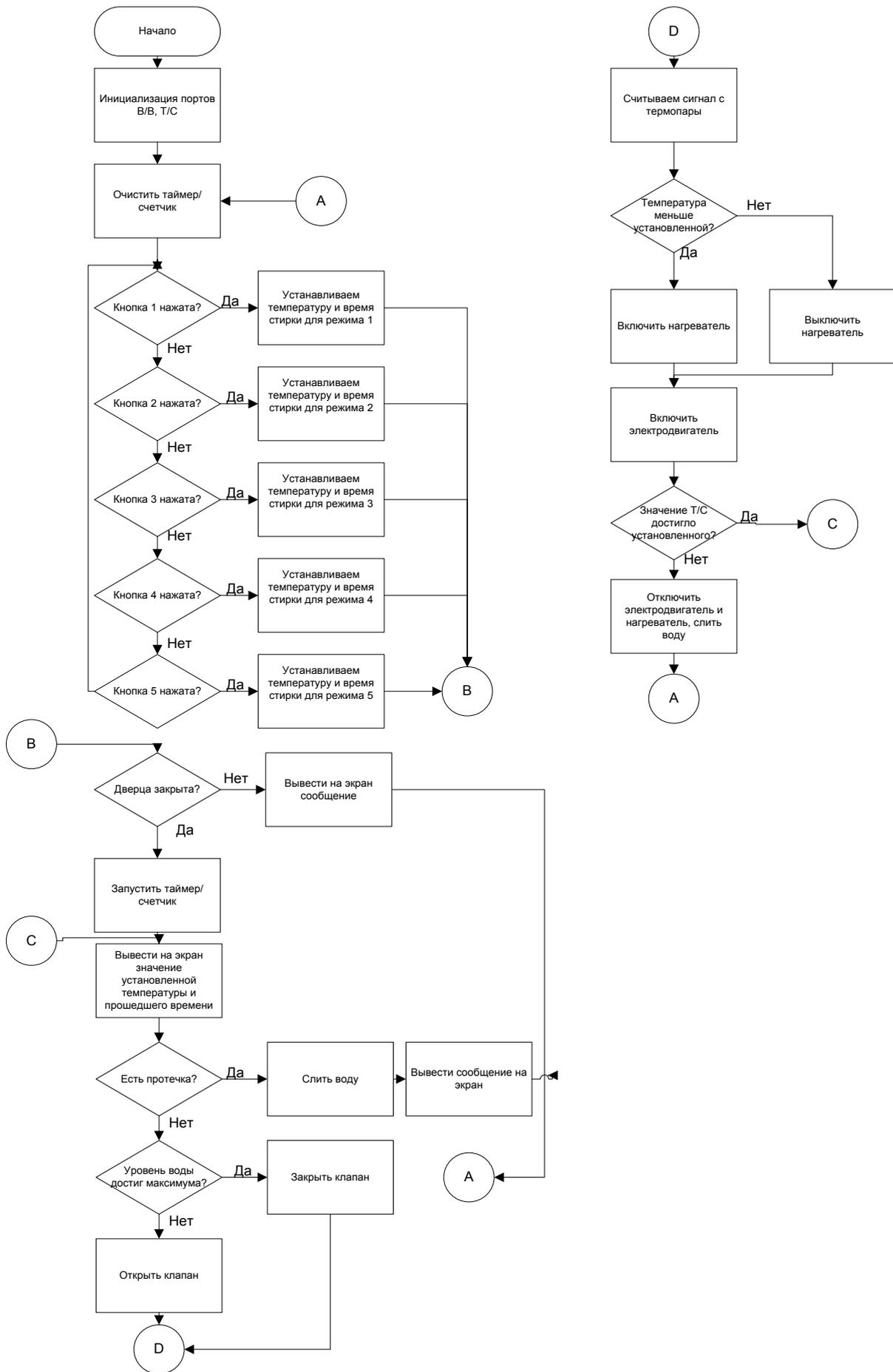


Рис. 4. Блок-схема

работы стиральной машины. Потенциометр R5 позволяет управлять контрастностью индикатора.

Конденсаторы C1, C2 и C4 предназначены для устранения помех в цепи питания. Резистор R4 с конденсатором C3 образуют цепь начального сброса микроконтроллера. Кнопка S2 предназначена для принудительного сброса. Кварцевый резонатор Z1 с конденсаторами C5 и C6 используются для синхронизации микроконтроллера. Кнопки S3-S7 это клавиатура для выбора режима работы устройства. S9 и S10 — герконы, выполняющие роль датчиков закрытия двери и протечки соответственно. S7 — геркон, используемый в качестве датчика уровня воды. Операционный усилитель OP1 усиливает сигнал с термопары, чтобы он мог быть считан АЦП DA1, который переводит сигнал в цифровую форму и передает его на вход микроконтроллера. Резисторы R2 и R3 образуют цепь обратной связи, задающей коэффициент усиления операционного усилителя. На ножку  $V_{ref}$  АЦП приходит опорное напряжение, равное напряжению питания. На вывод CLK приходят синхроимпульсы. Ножка CS — выбор чипа, активный уровень — логический 0.

Для управления нагрузкой (нагревателем, электродвигателем и насосом) используется схема управления с использованием симистора. Достоинствами данной схемы управления являются высокая надежность, отсутствие акустического шума, отсутствие износа элементов, обеспечение гальванической развязки.

Для расчета номинала резисторов R8 и R20 воспользуемся формулой:

$$R = (V_{cc} - U_{кз} - U_{и} - U_{НЛ1}) / I_{и1},$$

где:  $V_{cc}$  — напряжение питания;  $U_{кз}$  — падение напряжения на транзисторе;  $U_{и}$  — падение напряжения на оптроне;  $U_{НЛ1}$  — падение напряжения на диносторе;  $I_{и1}$  — ток через оптрон.

Подставив численные значения получим значение номинала резисторов около 2кОм.

Для расчета номинала резисторов R6 и R17 воспользуемся формулой

$$R \leq (U_0 - U_{бэ}) / I_0,$$

где:  $U_0$  — напряжение логического нуля;  $U_{бэ}$  — падение напряжения на переходе база-эмиттер;  $I_0$  — ток базы.

Подставив численные значения было получено значение номинала резисторов не более 10 Ом.

Номинал резисторов R9... R12, R14... R16, R19 рассчитывается по формуле:

$$R \leq (V_{cc} - U_{min}) / I_{вх},$$

где:  $V_{cc}$  — напряжение питания,  $U_{min}$  — минимальное напряжение логической единицы микроконтроллера,  $I_{вх}$  — величина входного тока микроконтроллера.

Литература:

1. Угрюмов, Е. П. Цифровая схемотехника / Е. П. Угрюмов. — СПб: БХВ-Петербург, 2010 г. — 798 с.
2. Белов, А. В. Конструирование устройств на микроконтроллерах. / А. В. Белов — СПб: Наука и Техника, 2005 г. — 256 с.

Для микроконтроллера 8051 вышеперечисленные величины равны 5В, 2,4В и 0,1 мА соответственно. Следовательно, номинал резисторов не более 26кОм.

## 2. Блок-схема алгоритма программы.

Блок-схема изображена на рисунке 4.

Программа начинается с инициализации портов ввода/вывода и таймера/счетчика микроконтроллера. Затем таймер/счетчик обнуляется и программа переходит к опросу клавиатуры. Если нажата одна из пяти кнопок, то установленная температура и время стирки устанавливаются равными значениям для соответствующего режима стирки. Программа циклически опрашивает кнопки до тех пор, пока одна из них не будет нажата.

Если режим стирки задан, программа переходит к проверке закрытия дверцы. Если дверца открыта, то на индикатор выводится сообщение с предупреждением и программа переходит к началу алгоритма. Если дверца закрыта, то запускается таймер/счетчик, на экран выводится информация о параметрах режима стирки: температура и время, прошедшее после запуска стирки. После этого программа проверяет наличие протечки. Если есть сигнал от датчика протечки, включается сливной насос, машина сливает воду и выводит на экран сообщение с предупреждением, после чего переходит к началу алгоритма. Если протечки нет, то программа переходит к проверки уровня. Если максимальный уровень не достигнут — открывается клапан. После этого считывается сигнал с термопары, преобразуется и сравнивается с установленным значением. Если температура меньше установленного значения, то подается питание на нагреватель. После этого включается электродвигатель. Затем проверяется значение таймера/счетчика. Если время, предусмотренное выбранным режимом стирки, прошло, выключается нагреватель, электродвигатель и сливается вода и программа переходит к началу алгоритма. Если же время не вышло, программа переходит к пункту алгоритма с выводом данных о режиме стирке.

## Заключение

Таким образом был разработан блок управления стиральной машиной с пятью режимами стирки, защитой от протечек, контролем закрытия дверцы, оснащенный жидкокристаллическим индикатором, термодатчиком, датчиком уровня воды и датчиком протечки. Представлены функциональная и электрическая принципиальная схемы устройства, алгоритм программы микроконтроллера.

3. Кестер, У. Методы практического конструирования при нормировании сигнала/ Уолт Кестер; пер. с англ. Горшков Б.Л. — СПб: Автэкс, 2008 г. — 311 с.

## Физические основы работы и характеристики бесконтактных электромагнитно-акустических преобразователей

Прасолов Андрей Сергеевич, студент;  
 Кашеев Артем Андреевич, студент;  
 Пасечник Даниил Олегович, студент;  
 Хайрутдинов Дмитрий Игоревич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

В работе исследуются физические свойства работы ЭМА-преобразователей. На основе общего решения задачи излучения для различных типов волн, излучаемых ЭМА-преобразователем, проводится анализ направленных свойств преобразователя в зависимости от различных параметров преобразователя.

**Ключевые слова:** электромагнитно-акустический преобразователь, диаграмма направленности

ЭМА — электромагнитно-акустический.

Обеспечение безопасности промышленных объектов неразрывно связано с технической диагностикой и неразрушающим контролем. Эта задача решается на многих технических объектах при помощи ультразвуковых приборов как при технологическом, так и при эксплуатационном контроле.

Возбуждение ультразвуковых колебаний в металле при помощи электромагнитно-акустических преобразователей является распространенным методом возбуждения колебаний на производстве. Его главными преимуществами перед конкурентами является способность возбуждения колебаний в объекте контроля при отсутствии контакта между преобразователем и объектом контроля. Также ЭМА-преобразователи способны эффективно возбуждать волны Рэлея и Лэмба. При использовании таких преобразователей возможен контроль объектов, которые имеют высокую температуру. На ряду с перечисленными достоинствами у ЭМА-преобразователей есть ряд недостатков, главным из которых является относительно малое значение коэффициентов преобразования электромагнитных колебаний в энергию акустических волн. Для их устранения необходимо совершенствование конструкций, а также изучение направленных свойств преобразователя.

### 1. Общее решение задачи излучения для нормальной и тангенциальной ориентации магнитной индукции поверхности металла

#### 1.1 Вектор поляризующего поля направлен параллельно к поверхности

Рассмотрим смещения в волнах для случая, когда вектор поляризующего поля направлен параллельно к поверхности металла. Тогда излучение волн будет происходить под действием вертикальной сосредоточенной силы.

Смещения в продольных волнах будут определяться выражением

$$U_l = \frac{jB_0 S \gamma^2}{4\pi\mu r} j_{ll}(\theta) e^{-i(\omega t - k_l r)} e^{-k_l h \sin \theta} \frac{\sin(k_l l \sin \theta)}{k_l l \sin \theta} \quad (1)$$

где:  $j_l(\theta)$  — функция направленности продольной волны, излучаемой вертикальной сосредоточенной силой при  $h = 0$ .  
 Формула для смещений в поперечной  $t_V$ -волне:

$$U_{tV} = \frac{jB_0 S}{2\pi\mu r} j_{tVl}(\theta) e^{-i(\omega t - k_t r)} e^{-k_t h \sin \theta} \frac{\sin(k_t l \sin \theta)}{k_t l \sin \theta} \quad (2)$$

где:  $j_{tVl}$  — функция направленности поперечной волны, излучаемой вертикальной сосредоточенной силой.

Для волн Рэлея смещения происходят на поверхности контролируемого изделия при максимуме излучения волны ( $\alpha = 0$ ).

Формула для смещений в волнах Рэлея будет иметь вид:

$$U_{zR} = \frac{jB_0 S}{4\mu} \sqrt{\frac{2k_0}{\pi\rho}} \frac{(1 - \gamma^2 \eta_0^2) \sqrt{1 - \eta_0^2}}{c_0} \frac{\eta_0^2}{(2 - \eta_0^2)^2} e^{-i(\omega t - k_0 r - 3\pi/4)} e^{-k_0 h} \frac{\sin k_0 l}{k_0 l} \quad (3)$$

1.2 Вектор поляризующего поля направлен по нормали к поверхности

Рассмотрим смещения в волнах для случая, когда вектор поляризующего поля направлен по нормали к поверхности металла.

в продольной волне:

$$U_l = \frac{jB_0 S \gamma^3 \cos \alpha}{2\pi \mu r} j_{l \rightarrow}(\theta) e^{-i(\omega t - k_l r)} e^{-k_l h \sin \theta} \frac{\sin(k_l l \sin \theta)}{k_l l \sin \theta} \tag{4}$$

где  $j_{l \rightarrow}(\theta)$  — функция направленности продольной волны, излучаемой сосредоточенной силой, параллельной поверхности.

— в поперечной волне:

$$U_{TV} = \frac{jB_0 S \cos \alpha}{4\pi \mu r} j_{TV \rightarrow}(\theta) e^{-i(\omega t - k_t r)} e^{-k_t h \sin \theta} \frac{\sin(k_l l \sin \theta)}{k_l l \sin \theta} \tag{5}$$

где:  $j_{TV \rightarrow}(\theta)$  — функция направленности поперечной волны, излучаемой сосредоточенной силой, параллельной поверхности.

— в рэлеевской волне:

$$U_{zR} = \frac{jB_0 S \cos \alpha}{2\mu} \sqrt{\frac{2k_0}{\pi \rho}} \frac{(1 - \gamma^2 \eta_0^2) \sqrt{1 - \eta_0^2}}{c_0} \frac{\eta_0^2}{(2 - \eta_0^2)^2} e^{-i(\omega t - k_0 \rho - 3\pi/4)} e^{-k_0 h} \frac{\sin k_0 l}{k_0 l} \tag{6}$$

2. Анализ направленных свойств ЭМА-преобразователя при параллельно направленном векторе поляризующего поля к поверхности.

Рассмотрим изменение характеристики направленности для продольной волны.

Как видно из рисунков 1, 2, главный максимум наблюдается при угле  $\theta = 0$ . При малых размерах  $kl$  характеристика направленности имеет вид, практически совпадающий с входящей в формулу (1) функцией направленности продольной волны, излучаемой вертикально сосредоточенной силой при  $h = 0$ . С увеличением ширины проводника главный максимум постепенно сужается и начинают формироваться побочные максимумы. Нули характеристики направленности

будут определяться множителем вида  $\frac{\sin X}{X}$ .

Из рисунка 3 и формулы (1) наблюдается линейная зависимость амплитуды главного максимума от волновых размеров проводника.

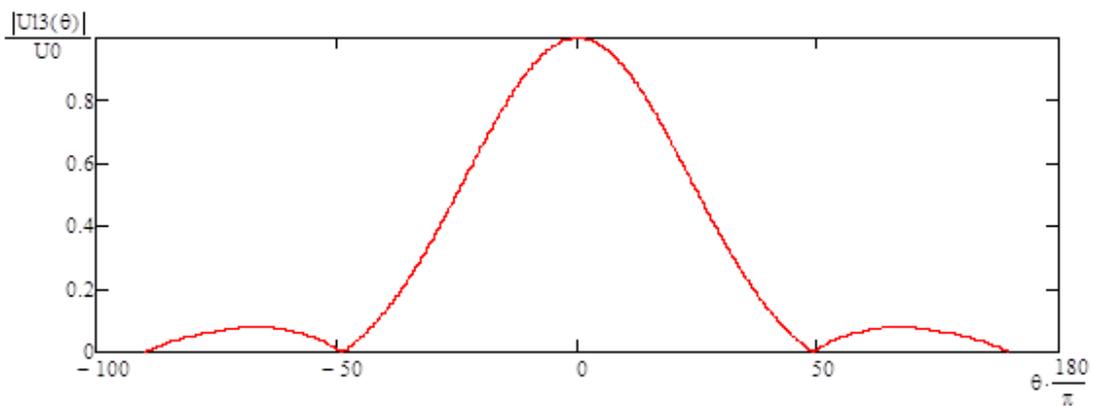


Рис. 1. Характеристика направленности продольной волны при  $kl = 4.2$

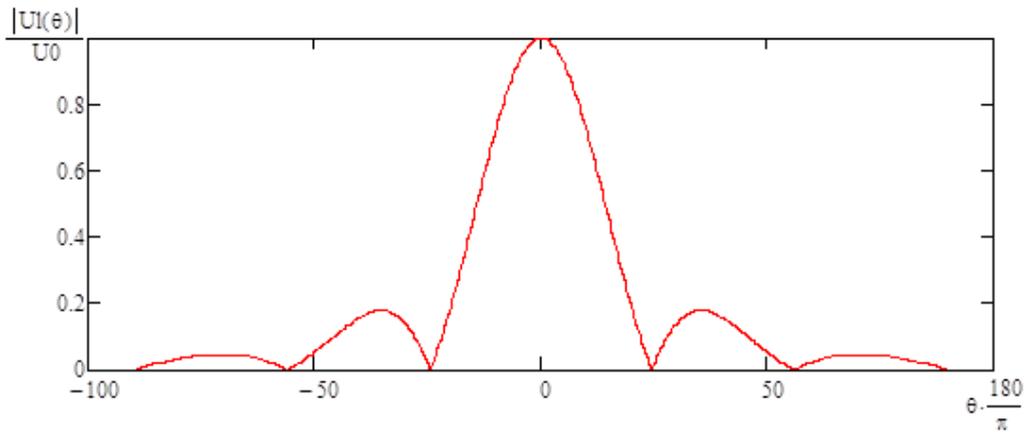


Рис. 2. Характеристика направленности продольной волны при  $kl = 7.5$

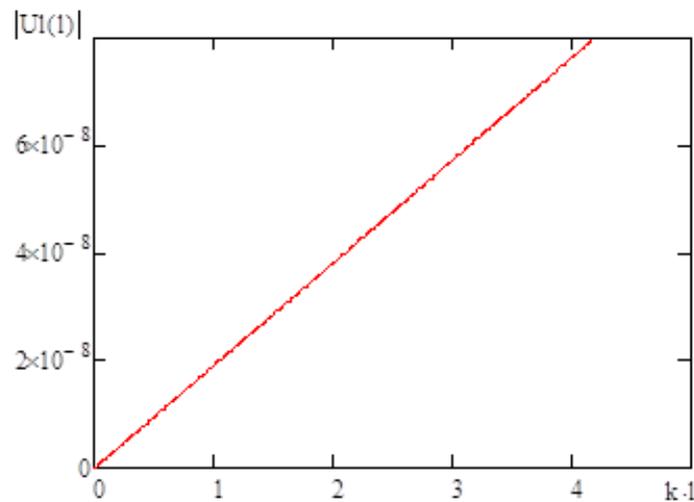


Рис. 3. Зависимость амплитуды главного максимума характеристики направленности от  $kl$

Рассмотрим изменение характеристики направленности для поперечной волны.

При малых волновых размерах характеристика направленности поперечной волны (рис. 4) имеет вид, близкий к виду функции направленности поперечной волны.

С увеличением волновых размеров, появляются дополнительные максимумы (рис. 5), амплитуда которых практически совпадает с амплитудой главных максимумов. При этом амплитуда главных максимумов уменьшается, а амплитуда боковых лепестков увеличивается. Таким образом число дополнительных максимумов увеличивается как «снаружи», так и «внутри» характеристики направленности.

Также с увеличением волновых размеров преобразователя происходит уменьшение ширины главных максимумов.

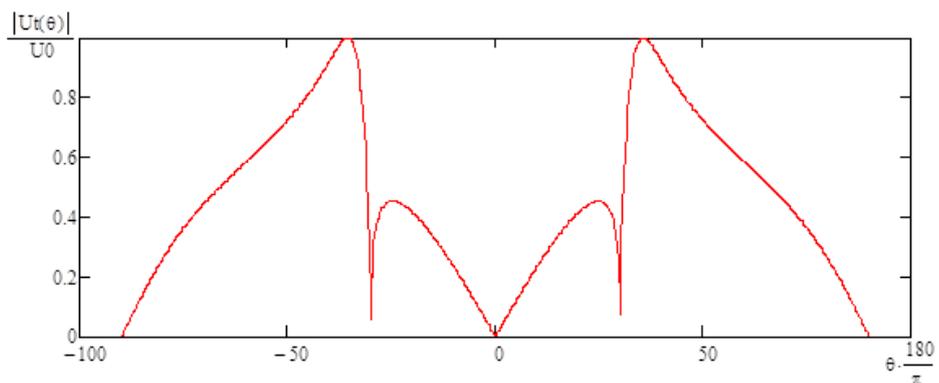


Рис. 4. Характеристика направленности поперечной волны при  $kl = 1.5$

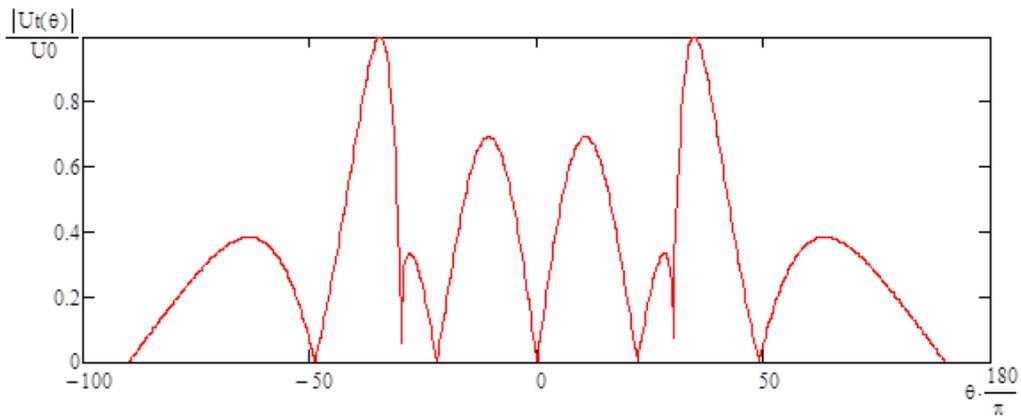


Рис. 5. Характеристика направленности поперечной волны при  $kl = 8.3$

**3. Анализ направленных свойств ЭМА-преобразователей при горизонтальной ориентации вектора поляризующего поля к поверхности.**

При малых значениях  $kl$  (рис. 6) характеристика направленности смещений в продольной волне имеет всего два лепестка. С увеличением значения  $kl$  ширина лепестков уменьшается, а амплитуда смещений увеличивается. При достижении определенного значения волнового размера начинают появляться боковые лепестки (рис. 7).

Также стоит отметить, что максимальная амплитуда смещений в продольной волне не превышает определенного значения, которое определяется плотностью тока  $j$ , индукцией поляризующего поля  $B_0$  и площадью проводника.

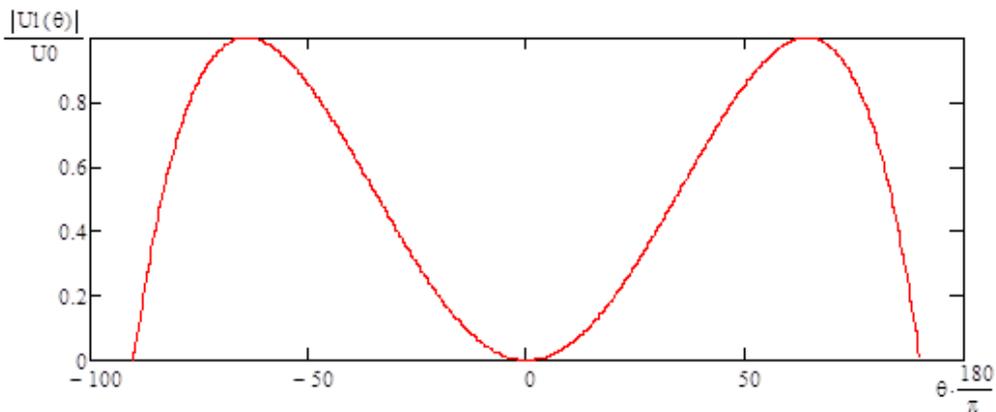


Рис. 6. Характеристика направленности продольной волны при  $kl = 0.7$

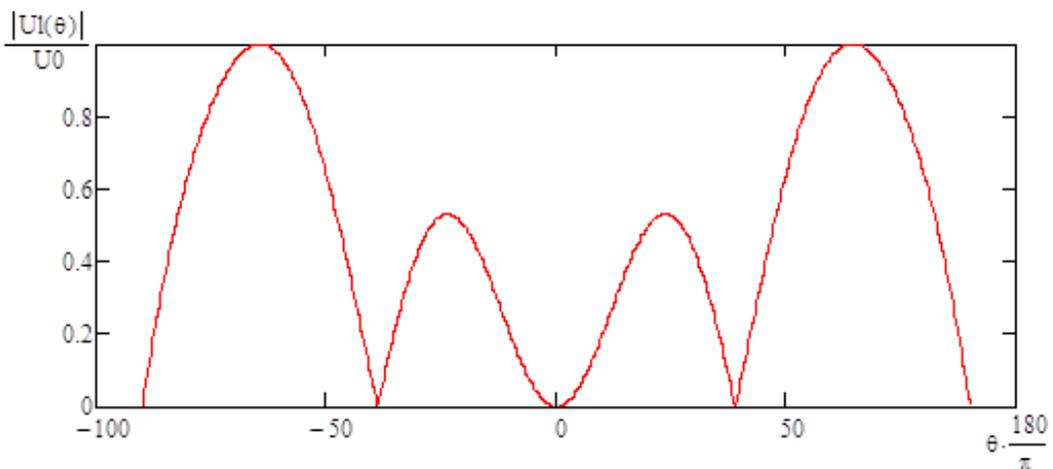


Рис. 7. Характеристика направленности продольной волны при  $kl = 5$

Характеристика направленности смещений в поперечной волне при малых значениях  $kl$  имеет два боковых лепестка, уровень которых во много меньше максимума. Главный максимум имеет падение амплитуды по центру и два участка с большей амплитудой по бокам. При увеличении  $kl$  амплитуда на участке  $\theta = 0$  начинает линейно увеличиваться (рис. 8), и постепенно формируется центральный максимум с более низкими по амплитуде боковыми лепестками. Так как в формуле (5) имеется множитель вида  $\frac{\sin X}{X}$ , то нули характеристики направленности будут наблюдаться при  $X = m\pi$ , где  $m = \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$

Также с увеличением  $kl$  происходит сужение главного максимума, и появляются новые боковые лепестки. При этом амплитуда боковых лепестков изменяется так, что с увеличением волнового размера появляются лепестки, имеющие равную амплитуду (рис. 9).

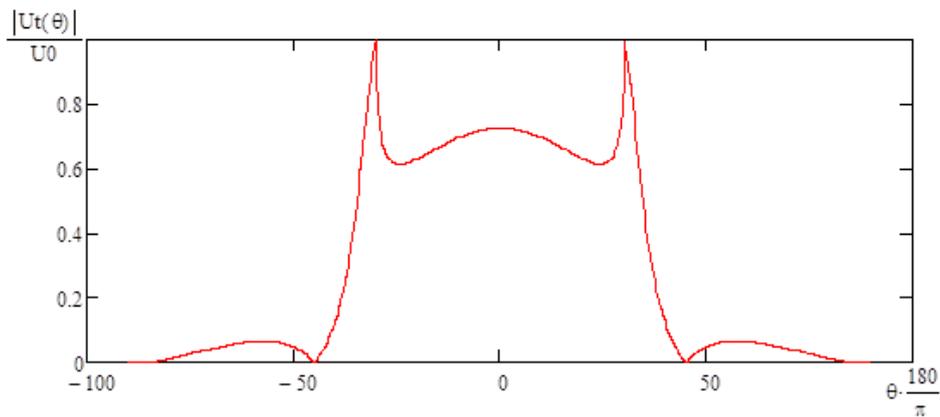


Рис. 8. Характеристика направленности поперечной волны при  $kl = 1.5$

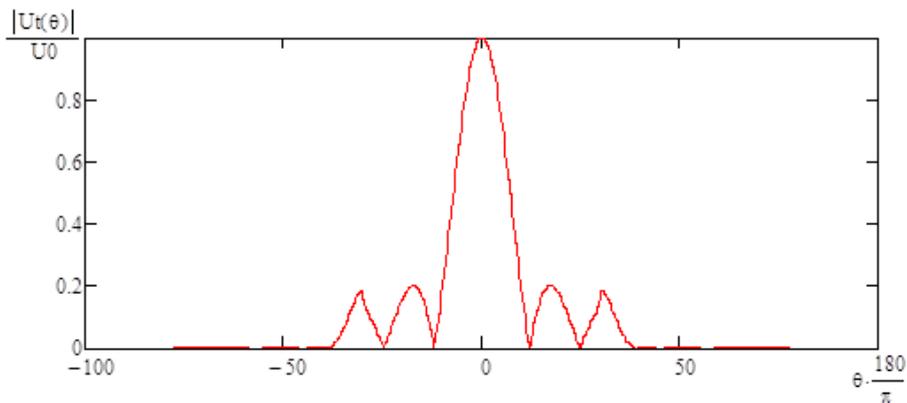


Рис. 9. Характеристика направленности поперечной волны при  $kl = 15$

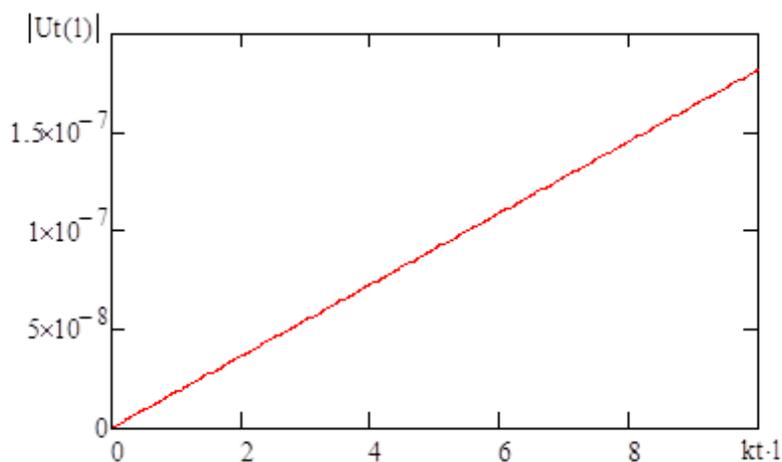


Рис. 10. Зависимость амплитуды главного максимума характеристики направленности от  $kl$

Характеристика направленности смещений волн Рэлея будет такой же, как и при параллельно направленном векторе поляризующего поля. Она не будет зависеть от углов, а ее амплитуда будет изменяться в зависимости от площади ленты ЭМА-преобразователя и значения множителя  $\frac{\sin k_0 l}{k_0 l}$  (рис 11).

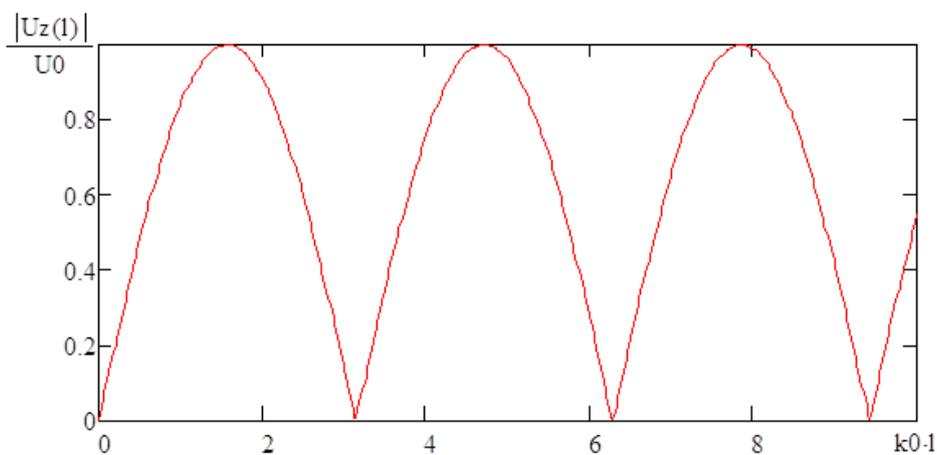


Рис. 11. Зависимость амплитуды волны Рэлея от  $kl$

Единственное отличие будет в амплитуде смещений. У волны, возбуждаемой при вертикальной ориентации вектора поляризующего поля максимум амплитуды будет в два раза больше, чем у волны, возбуждаемой при параллельной ориентации вектора  $V_0$  к поверхности металла (рис. 12).

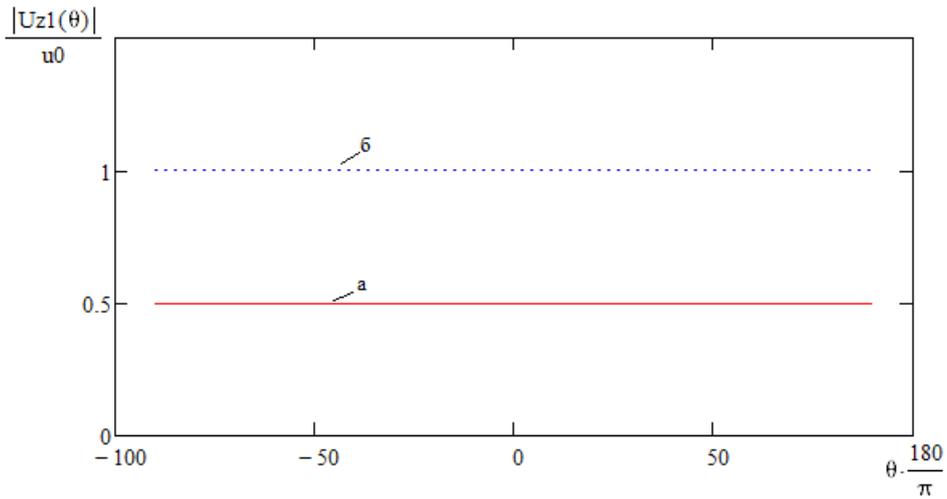


Рис. 13. Смещения в волнах Рэля при равных волновых размерах ЭМА-преобразователя при а) тангенциальной ориентации вектора  $\mathbf{B0}$ ; б) нормальной ориентации вектора  $\mathbf{B0}$

Из рисунка 14 видно, что продольная волна, излучаемая вертикально сосредоточенной силой, имеет большую направленность и амплитуду смещений. Характеристика направленности продольной волны, излучаемой сосредоточенной силой, параллельной к поверхности, имеет меньшую амплитуду.

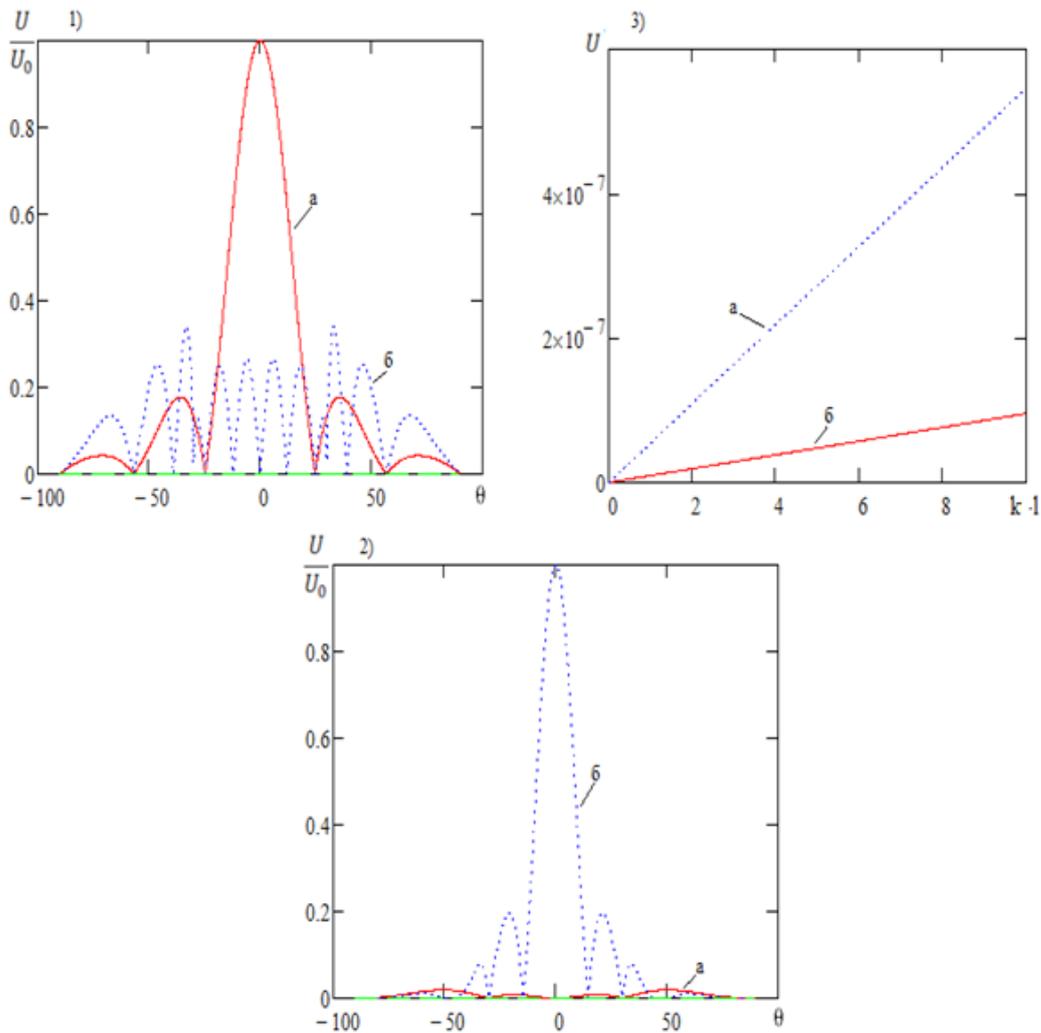


Рис. 14. ДН смещений при: 1) тангенциальной ориентации вектора  $\mathbf{B0}$ ; 2) нормальной ориентации вектора  $\mathbf{B0}$ ; 3) сравнение амплитуд. а) продольная волна; б) поперечная волна

Таким образом при равных параметрах преобразователя продольная волна обладает большей направленностью, что способствует уменьшению помех. В связи с этим при выборе преобразователя для проведения контроля следует отдать большее предпочтение ЭМА-преобразователю, возбуждающему продольные волны.

### Заключение

В работе было приведено общее решение задачи излучения упругих волн электродинамическим методом и проведен анализ диаграмм направленности, по результатам которых можно утверждать, что при различной ориентации вектора поляризуемого поля эффективно возбуждаются либо продольная, либо поперечная волны.

Установлены зависимости направленных свойств преобразователя от волновых размеров преобразователя. Показано, что увеличение волновых размеров преобразователя приводит к увеличению амплитуды главного максимума продольной и поперечной волны, а также к появлению дополнительных лепестков в диаграммах направленности возбуждаемых волн.

### Литература:

1. Буденков, Г. А., Недзведская О. В. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. — М.: Издательство физико-математической литературы, 2004. — 136 с.
2. Сучков, Г. М. Повышение чувствительности ЭМА приборов / Г. М. Сучков, А. В. Донченко, А. В. Десятниченко и др. // Дефектоскопия. 2008. № 2. с. 15–22.
3. Алешин, Н. П., Лупачев В. Г. Ультразвуковая дефектоскопия Справ. пособие. // Мн.: Высш. шк., 1987. — 271 с.

## Повышение контраста малоконтрастных изображений объектов, находящихся в воздушной среде

Румянцев Роман Сергеевич, студент;

Коноплев Юрий Вячеславович, студент;

Чиркунова Анастасия Анатольевна, аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В данной работе разработан метод повышения дальности наблюдения малоконтрастных объектов в условиях пониженной видимости, вызванными сложными метеоусловиями.*

**Ключевые слова:** *рассеяние света, поглощение света, экстинкция света, оптический диапазон, пороговый контраст, дальность обнаружения тв система, фотоприемник, светофильтр, сигнал-шум*

Разработка методов увеличения дальности наблюдения объектов в затрудненных условиях в воздушной среде относится к классу задач обнаружения объектов по спектральным признакам в мутных средах. В данной работе разработан метод повышения контрастности и даны рекомендации по проектированию ТВ систем.

Основные этапы разработки метода:

- Понятие малоконтрастного изображения;
- Спектральный метод повышения контраста объектов;
- Анализ влияния параметров ТВ камеры на дальность обнаружения;
- Спектральный способ повышения дальности обнаружения.

### 1. Разработка метода повышения контраста изображений малоконтрастных объектов, находящихся в воздушной среде

#### 1.1 Понятие малоконтрастного изображения.

Минимальная величина  $k$ , при которой глаз воспринимает соседние детали, называется порогом контрастной чувствительности глаза и составляет 3%. Она зависит от яркости объекта и фона, угловых размеров объекта наблюдения и чёткости контура объекта на фоне. Изображения, обладающие величиной контраста в оптическом диапазоне меньше 3% являются малоконтрастными. В таком случае, отличие объекта от фона не сможет быть зарегистрировано человеческим глазом.

**1.2 Спектральный метод повышения контраста объектов.**

Суть метода заключается в выделении той части спектра, которая будет нести наиболее качественную и полную информацию об объекте наблюдения в условиях неблагоприятной метеобстановки. Получение изображения объекта заключается в регистрации яркости объекта в разных спектральных зонах. Ее амплитуда варьируется на разных длинах волн и зависит от оптических характеристик объекта наблюдения. Ввиду молекулярного состава атмосферы, частицы, входящие в состав среды распространения волн оптического диапазона, в наибольшей мере оказывают влияние на коротковолновое излучение. Меньше всего рассеянию подвергаются более длинные волны, а именно, относящиеся к ближнему инфракрасному диапазону.

Взвеси, находящиеся в среде распространения, несут в себе сигнал (интенсивностью  $I_c$ ), складывающийся с по-

лезным сигналом (объекта и фона, с интенсивностью  $I_o$  и  $I_\phi$  соответственно) и вызывающий затруднения при наблюдении. Стоит отметить, что состав среды неравномерен, и характер рассеяния создает неравномерный по полю зрения фон. Ввиду неравномерности среды, появятся флуктуации и восприятие картины несколько изменится (рисунок 1).

Предложенный метод заключается в следующем. На первой итерации определяются центральные длины волн  $\lambda_i$  и ширина  $\Delta\lambda_i$  спектральных диапазонов (1) и (2) как показано на рисунке 2. Выбор осуществляется на основе спектрального анализа изображения в  $k$  спектральных каналах по пространственным частотам.

Для определения спектрального канала, содержащего информацию об искажающей среде, с помощью ФНЧ на изображении выделяется НЧ составляющая сигнала в каждом из спектральных каналов. Тот спектральный канал,

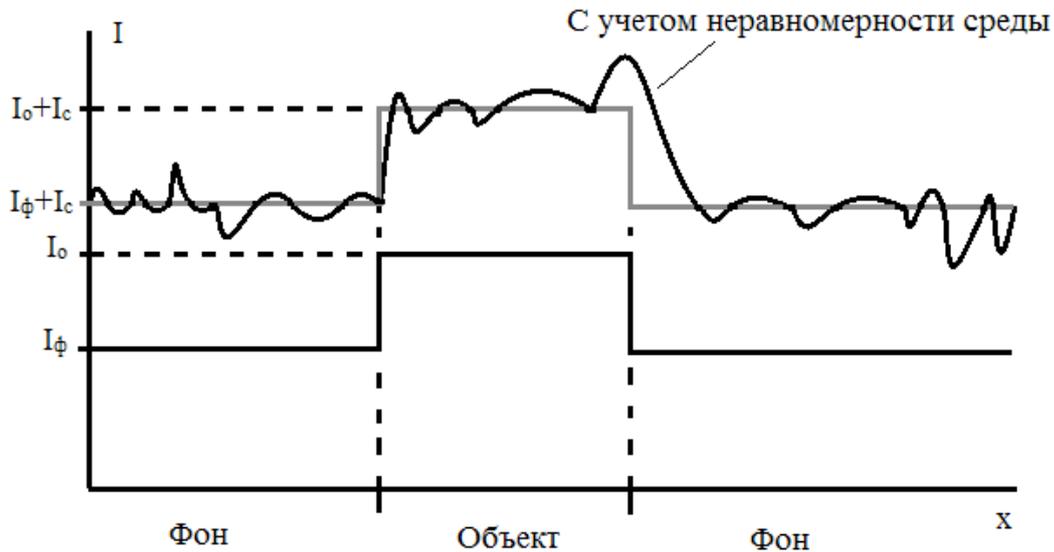


Рис. 1. Восприятие интенсивности объекта и фона с учетом неравномерности среды

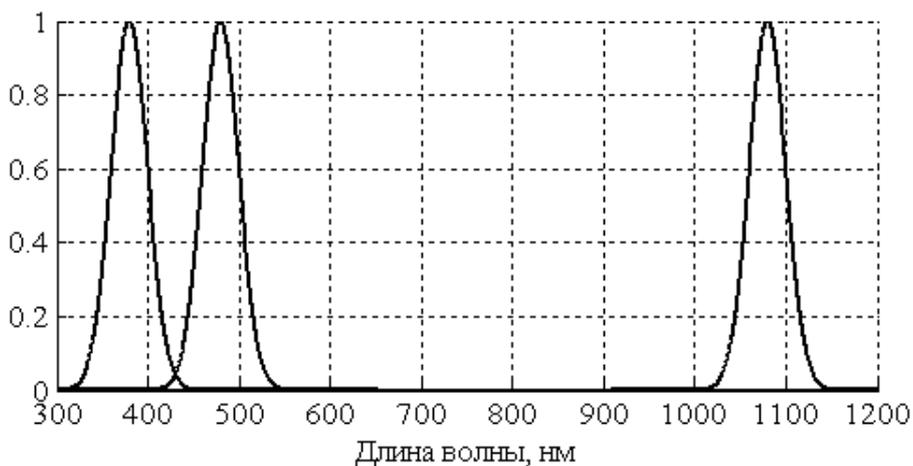


Рис. 2. Спектральные диапазоны работы ТВ системы

в котором наблюдается минимум СКО, принимается за фоновый  $X_{\phi}$ .

Для определения спектральных каналов, содержащих информацию об объекте сигналы изображений каждого из спектральных каналов, подвергаются ВЧ фильтрации. Распределение СКО по длинам волн  $\lambda_i$ , показывает изменение количества информации об объекте в зависимости от  $\lambda_i$ . Максимум СКО соответствует максимальной детализации объекта на изображении.

Для получения изображения с повышенным контрастом необходимо из видеосигналов оставшихся каналов, не подвергавшихся низкочастотной фильтрации, вычесть сигнал фона  $X_{\phi}$ , взятый с коэффициентом про-

порциональности  $b_i$ . Значения коэффициента  $b_i$  рассчитываются исходя из распределения амплитуд ВЧ составляющих в спектральных каналах.

### 1.3 Анализ влияния параметров ТВ камеры на дальность обнаружения.

На дальность обнаружения объекта, помимо метеосостояния, также влияет размер объекта. На больших расстояниях, когда проекция объекта на матрицу ТВ камеры составляет единицы пикселей, объект считается точечной целью. Чем больше угол зрения камеры, тем более затруднительно обнаружение объектов на больших расстояниях. На рисунке 3 изображен график для угла зрения камеры  $10^\circ$ .

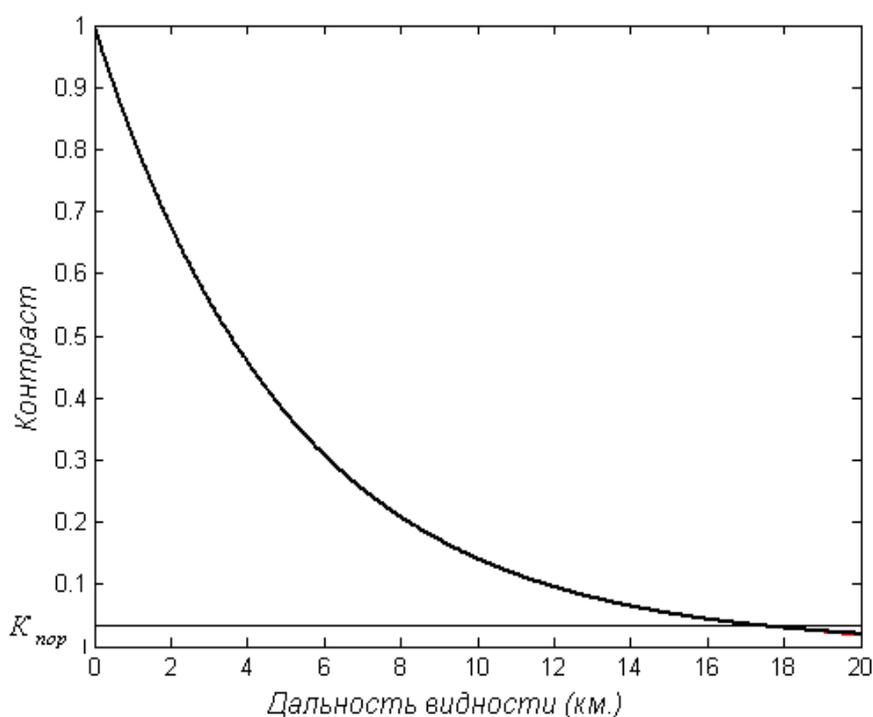


Рис. 3. Угол зрения камеры  $10^\circ$

Как видно объекты не превратились в точечную цель даже пройдя пороговый уровень контраста. Это показывает, что для данного угла зрения дальность обнаружения объектов является максимальной.

Также на дальность обнаружения влияет способность камеры накапливать фотоэлектроны. Зависимость порогового контраста от числа накопленных фотоэлектронов показана на рисунке 4.

Данная зависимость означает, что чем больше емкость потенциальной ямы, тем большая контрастная чувствительность ТВ системы может обеспечиваться.

Спектральный способ повышения дальности обнаружения объектов.

Спектральный способ повышения дальности основывается на выборе спектрального канала, обеспечиваю-

щего максимум контраста изображения и отношения сигнал-шум.

Анализ сигналов спектральных каналов ведется после применения метода повышения контраста. По сигналам изображений, очищенных от сигнала среды рассчитывается контраст и отношение сигнал-шум.

Блок-схема алгоритма выбора спектрального диапазона представлена на рисунке 5.

### Заключение

В заключении можно сделать следующие выводы:

— для повышения дальности обнаружения объектов необходимо использование ТВ камер с малыми углами поля зрения и большой емкостью пиксела;

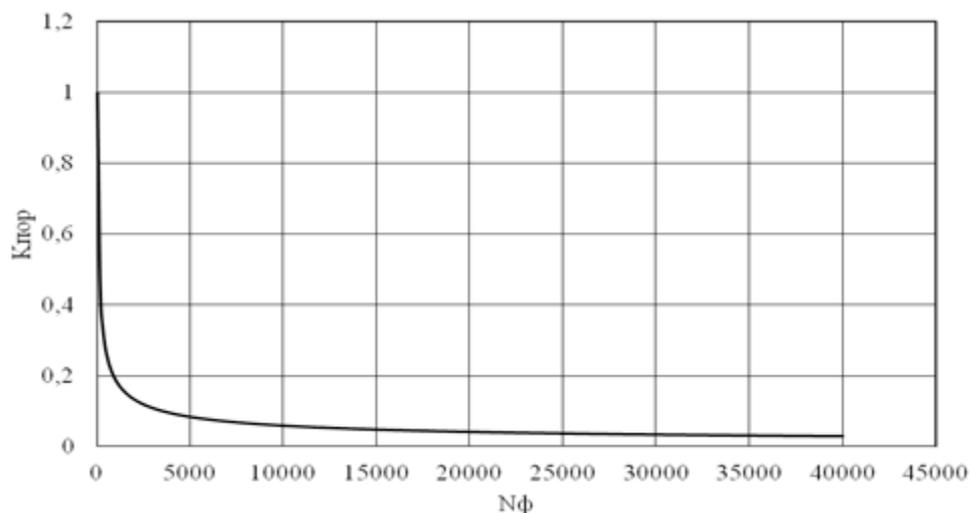
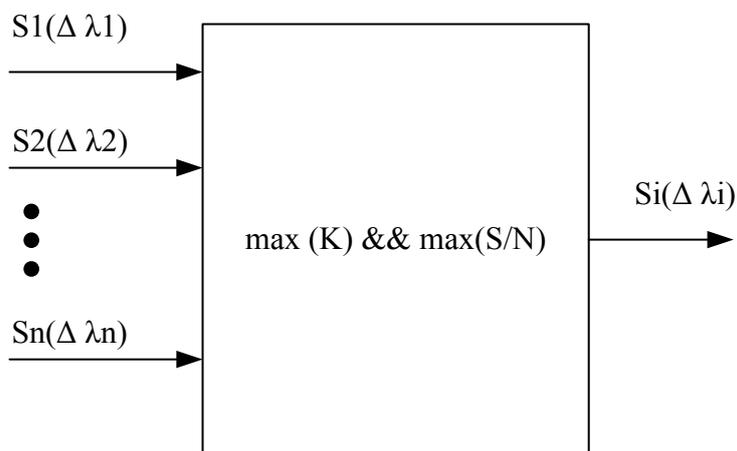
Рис. 4. Зависимость  $K_{пор}$  от  $N_{\phi}$ 

Рис. 5. Блок-схема алгоритма выбора спектрального диапазона

— применение способа повышения дальности обнаружения адаптивной ТВ системы в который заложен критерий максимума контраста и отношения сигнал/шум по-

зволяет выбрать оптимальный светофильтр для данных метеоусловий.

#### Литература:

1. Восприятие цвета [Электронный ресурс]. URL: <http://colory.ru/vospriyatie/> (Дата обращения: 29.04.2016).
2. Рассеяние света [Электронный ресурс]. URL: <http://www.webpoliteh.ru/subj/fizika/543-5-7-rasseyanie-sveta.html> (Дата обращения: 29.04.2016).
3. Егошина, И. Л., Белобородов Д. В. Метод и алгоритм автоматической обработки малоcontrastных медицинских изображений // Инновационная наука. — 2015. — № 10-1. с. 2-4.
4. Горбачёв, А. А., Коротаев В. В., Ярышев С. Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. — СПб.: НИУ ИТМО, 2013. — 98 с. с. 20-51.

## Излучение атома и плазмы

Рыков Евгений Анатольевич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В статье рассматривается излучение атома и на его основе рассматривается излучение плазмы газового разряда. Применение излучения атомов и молекул в области построения спектров излучения и анализ с его помощью.*

**Ключевые слова:** *излучение атома, механизмы плазменного излучения, методы спектрального анализа, спектры излучения, формула Ридберга*

Сегодня, в любой области науки и производства используется спектральный анализ, основанный с помощью излучения атома вещества. Спектральный анализ позволяет существенно повысить точность определения состава вещества без внесения каких-либо вспомогательных тел.

### 1. Излучение атома и плазмы

Возникновение атомного спектра характеризуется поглощением излучения или его испусканием, состоящий в совокупности из единичных спектральных линий свободных атомов газа [2]. Такой спектр характеризуется отдельным параметром — частотой излучения, которая в свою очередь равняется энергии межуровневым переходом атома:

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

Фактически все спектры излучения атома располагаются в видимых и ультрафиолетовых областях, длина волны которых достигает от 200 до 1190 нм.

Возбудить атом для получения излучения можно разными способами, в основном это сообщение энергии через тепловое столкновение или электронным ударом. За время нахождения в возбужденном состоянии атом теряет большую долю своей энергии на испускание кванта электромагнитного излучения.

Также как и в излучении в атоме, в плазме излучение характеризуется интенсивностью процессов испускания или поглощения электромагнитной энергии [1]. Спектральная излучательная способность представляет собой распределение фотонов по длине волны, создаваемых в единице объема плазмы.

Одним из главных видов потерь плазмы как раз и является ее излучение. Данный вид получения энергии довольно широко используют в данное время в промышленности.

Способы (механизмы) плазменного излучения можно разделить на следующие, которые описываются либо собственными свойствами отдельных заряженных частиц, в иных случаях нейтральных, которые образуют плазму, либо свойствами коллективного взаимодействия — колебательно-волновыми [1]. Существует несколько основных видов индивидуального излучения отдельных частиц, такие как:

— излучение линейчатого характера, получаемое при переходе электрона с одного энергетического уровня на

другой, один из самых используемых излучений плазмы для исследования;

— излучение фоторекомбинационного характера возникает, если электрон с определенной энергией может поглотиться на одном из энергетических уровней, происходит некий захват частиц, или рекомбинация;

— тормозное излучение свободного электрона в поле иона;

— циклотронное излучение электрона при его вращении в магнитном поле.

Эти виды плазменного излучения основываются на ускорении частиц во внешних электрических или магнитных полях. Так как все заряженные частицы в плазме движутся по нелинейным траекториям, они характеризуются некой угловой скоростью поворота, что позволяет в свою очередь иметь представление о характерной частоте плазменного излучения. Зная все эти величины можно определить интенсивность по следующей формуле:

$$I = (2/3) e^2 \omega^2 / c^3,$$

где  $\omega$  — угловая скорость.

Большой вклад в резкое отличие интенсивности общей картины от интенсивности отдельных характерных частот вносит род поля, которое в свою очередь вызывает ускорение заряженных частиц. Спектр можно назвать дискретным, если электрон находится в состоянии периодического вращения, если нет, то спектр будет непрерывным. В случае фоторекомбинационного излучения в непрерывном спектре присутствуют резкие скачки на определенных длинах волн, которые зависят от состава излучаемого вещества. В этих скачках происходит рекомбинация электрона на один из энергетических уровней иона. В случае излучения линейчатого характера из-за низкой скорости передвижения атомов и ионов дискретность спектра не нарушается. Так как в данном излучении низкие скорости, то доплеровские сдвиги относительно малы, в ином случае, если скорость передвижения гораздо больше, например, в циклотронном излучении, то и сдвиги будут увеличиваться. Такие сдвиги в свою очередь сводят высокие гармоники в один непрерывный спектр.

Как говорилось раньше, линии интенсивности зависят от рода вещества, его атома, который определяется зарядом ядра и количеством окружающих его электронов. Спектры элементов, имеющих равное количество валентных электронов, близки по значениям друг с другом.

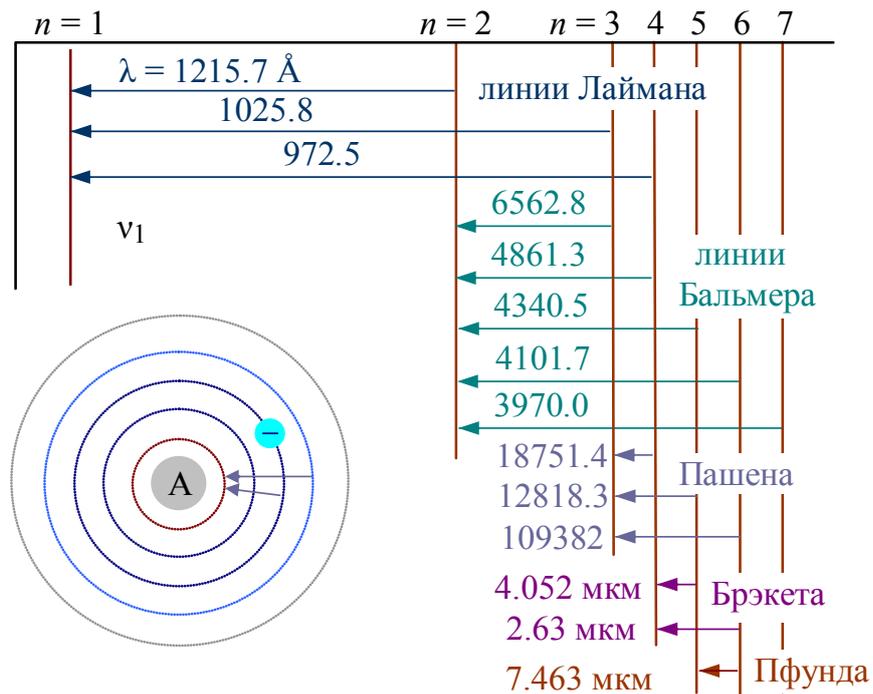


Рис. 1. Спектральные линии атома водорода



Рис. 2. Классификация методов спектрального анализа

Определить длину световой волны можно при помощи следующей формулы, или называемой формулой Ридберга:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \left( \frac{e^4 m_e}{8 \epsilon_0^2 h^3 c} \right) \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $e^4 m_e (8 \epsilon_0^2 h^3 c) = R' = 1,097 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$  — постоянная Ридберга,  $e^4 m_e (8 \epsilon_0^2 h^3 c) = 3.291 \times 10^{15}$ .

Численные значения  $m = 1, 2, 3, \dots$  — определяют серию, а  $n$  — целочисленное значение, начинающееся с  $(m + 1)$ , оно определяет отдельные линии этой серии. Эти серии распределяются на несколько видов, в зависимости от численного значения: серия Лаймана ( $m = 1; n = 2, 3, 4, \dots$ ), они расположены в ультрафиолетовой области спектра; серия Бальмера ( $m = 2; n = 3, 4, 5, \dots$ ), диапазон видимой области. Переходы, которые происходят на высших уровнях, называют серии Пашена и Брэккета ( $m = 3$  и  $m = 4$  соответственно), они расположены в области инфракрасного излучения. В целом можно получить

Литература:

1. Александров, А. Ф., Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы, М.: Высшая школа, 1988.
2. Гарифзянов, А. Р. Атомно-абсорбционная спектроскопия. К.: Казанский федеральный университет, 2009.

## Определение параметров плазмы по сравнительному анализу реальных и промоделированных спектров излучения

Рыков Евгений Анатольевич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В статье рассматривается моделирование спектров излучения плазмы газового разряда и разработка нового метода диагностики для определения параметров плазмы на основе разработанного программного кода. Применение с целью упрощения анализа состава вещества.*

**Ключевые слова:** спектр излучения, диагностика плазмы, моделирование спектров излучения, сравнительный анализ, интенсивность линий

На сегодняшний день диагностика плазмы сталкивается с большими принципиальными техническими трудностями: возникают проблемы со снятием и изучением таких характеристик, как: большие температуры, огромные плотности и скорости протекания процессов в плазме, мощное внешнее воздействие. Поэтому, актуально ввести новый метод определения параметров плазмы с помощью промоделированных спектров излучения.

### 1. Моделирование спектров

В одной из прошлых статей, которую можно найти в предыдущем выпуске журнала «Молодой учёный», рас-

сследующую картину возможного излучения, в частности для атома водорода, представлена на рис. 1.

Теория Бора полностью описывает возникающий спектр атома водорода, каждая линия которого относится к излучению возникающего вследствие перехода атома из возбужденного в состояние, расположенное ниже данного [2].

Все состояния могут быть представлены одной формулой, именуемой формулой Бальмера:

$$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

В связи с излучением атомов в науке был введен новый спектр и анализ на его основе.

Полная картина разделения методов спектрального анализа представлена на рис. 2.

Контур спектра представляется в виде суммарного распределения интенсивностей, в зависимости от длины волны. Характеризуется шириной спектральной линии и ее сдвигом. Любые возбужденные атомы не имеют точного значения, они размыты. Определяется приращением длин волн (или частот) в середине максимального значения интенсивности.

считывалось моделирование спектров излучения газового разряда. В этот раз, будут рассматриваться способы применения данного моделирования, также его «плюсы» и «минусы».

Построение по промоделированным спектрам дало следующий результат: по полученным спектрам можно сделать следующий вывод, интенсивность линий излучения значительно увеличивается с ростом концентрации компонентов плазмы, так как увеличивается количество актов ионизации и рекомбинации в процессе протекания разряда в плазме. Количество ионов, способных излучать, тоже увеличивается. Поэтому, эффективнее проводить анализ при больших концентрациях, что позволит

увеличить точность в определении химического состава плазмы.

Суть упрощения анализа спектра после моделирование заключается в том, что имея полный спектр излучения его можно разложить на отдельные спектры, то есть определить вероятность излучения и интенсивность линий для каждой его составляющей, каждого энергетического уровня. Возможность определения энергии и вероятности перехода с одного уровня на другой. Увеличивается точность качественного анализа. Единственный минус на данный момент — это маленькие диапазоны рассмотрения длин волн. Количество реальных интенсивных линий в десятки раз превышает количество промоделированных линий, поэтому для введения большого количества переменных необходимо много времени, которые также замедляют процесс вычисления программы. Процесс необходимо довести до автоматизма.

**2. Определение параметров плазмы по промоделированным спектрам излучения**

Как говорилось ранее, качественный спектральный анализ позволяет определить химический состав плазмы газового разряда. Для определения параметров плазмы газового разряда данный метод не подходит. Но, при помощи промоделированных спектров можно иметь представления о состоянии плазмы, в частности температура и концентрация частиц.

Актуальность решения этой проблемы заключается в том, что для анализа не приходится вводить вспомогательный электрод в плазму, который вносит свои изме-

нения, с последующими погрешностями. И достаточно часто просто нет возможности ввести в плазму зонд.

Для решения этой проблемы необходимо провести сравнительный анализ экспериментальных и промоделированных спектральных характеристик.

Для исследования берутся полученный спектр титана и его промоделированная версия. Суть заключается в следующем, максимально точно подобрать значения интенсивностей линий и длин волн промоделированного спектра, чтобы он был приблизительно одинаков со спектром экспериментальным. При этом варьируются именно параметры плазмы, а не величины, характерные для вещества, такие как: длина волны, вероятность перехода и энергия межуровневого перехода.

На данном этапе разработки результат оставляет желать лучшего. Погрешность определения составляет порядка 10–15%.

Данный процесс занимает достаточно долгое время, в перспективе имеет место возможность разработки и написания сложного программного кода для максимально точного сопоставления спектров. Также, этот код позволит уменьшить погрешность определения параметров плазмы до минимума.

**3. Применение моделирования**

Для получения экспериментальных характеристик использовалась вакуумно-дуговая установка коаксиальной конструкции, представленная на рис. 1. Она состоит из цилиндрического анода 1, торцевой катод 2, который предназначен для образования металлической составля-

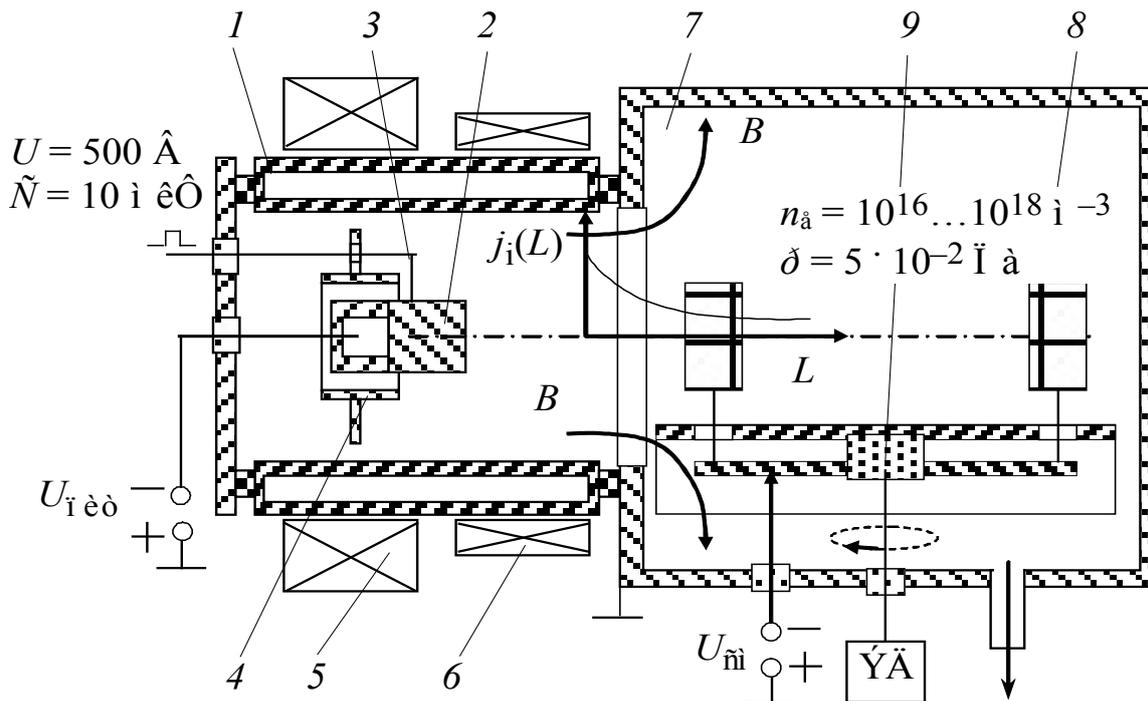


Рис. 1. Вакуумно-дуговой источник плазмы

ющей плазмы. Вспомогательный электрод 3 выполняет функцию зажигания разряда. Экран 4 фокусирует область распространения катодных пятен, чтобы они попадали только на рабочую поверхность катода. Магнитная система состоит из стабилизирующего 5 и фокусирующего 6 соленоидов. Между анодом и рабочим объемом должно выполняться условие полного соприкосновения 7, в котором на оси системы располагаются обрабатываемые изделия 8. Планетарный механизм 9 позволяет обеспечивать передвижение отдельных деталей в потоке плазмы [1].

Для определения интенсивности линий и длины волны, снимались спектральные характеристики дугового разряда в диапазоне от 350 до 950 нм. В результате были получены спектры излучения чистого титана (материал катода титан, давление в вакуумной камере  $7.8 \cdot 10^{-3}$  Па) и смеси титана с углеродом, представленные на рис. 2 и 3.

На спектре присутствует большое количество интенсивных линий, нас в данном случае интересуют наиболее интенсивные линии. Возбужденные линии нейтральных атомов наблюдаются в 368.9 и 416.93 нм, а для одноза-

рядных ионов титана, длины волн соответствуют 375.93 и 390.47 нм.

Наблюдается существенное отличие от первоначального спектра чистого титана, это вызвано влиянием углерода на состав металлической плазмы, образованной титаном. Наиболее интенсивные линии как для атомного, так и для однозарядного иона проявляются в диапазоне от 429.97 до 518.96 нм, а именно, в для нейтральных атомов — 453.47 нм и однозарядных ионов — 453.39 нм. Также на спектре проявляется интенсивная линия, соответствующая однозарядному иону углерода — 657.63 нм.

Определение соответствия спектральных линий элементам было осуществлено с помощью промоделированных спектров. Характеристические спектральные линии, полученные с помощью установки, соответствуют теоретическим, а в дальнейшем и промоделированным спектрам излучения. Работоспособность и качество данного метода моделирования, позволяющее судить о химическом составе плазмы каждой ее составляющих, заметно упрощает анализ спектров излучения газоразрядной плазмы.

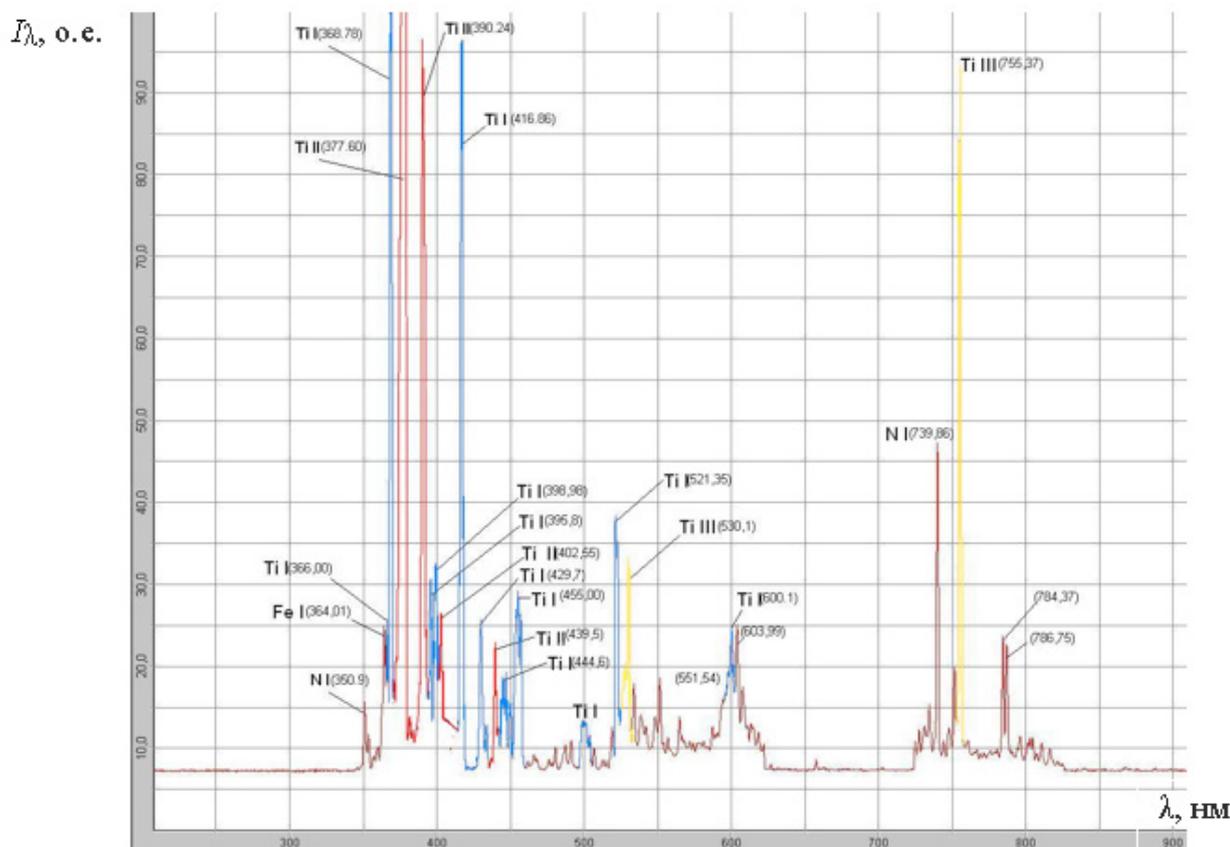


Рис. 2. Спектр излучения чистого титана от 300 до 900 нм

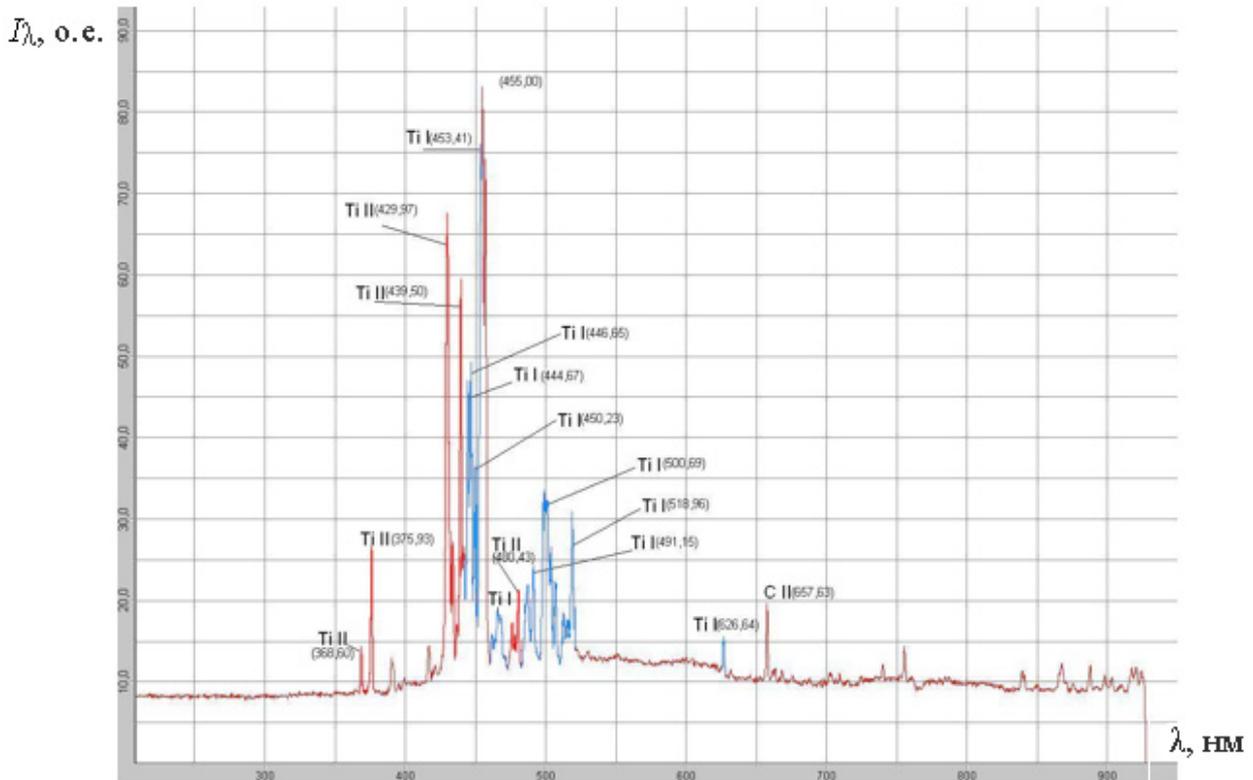


Рис. 3. Спектр излучения титана с углеродом от 300 до 900 нм

Литература:

1. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда. — 2-е изд. — М.: Наука, 1992.
2. Рыков, Е.А., Цветков Р.Ю. Исследование и моделирование спектров излучения газового разряда // Молодой ученый. — 2016. — № 14. — с. 37–41.

## Влияние длительности возбуждающего сигнала на форму акустического импульса на выходе пьезоизлучателя

Селюк Никита Николаевич, студент;  
Кокнаев Александр Сергеевич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе рассматривается исследование изменения формы и длительности излучаемого акустического сигнала от длительности возбуждающего электронного импульса. В качестве пьезопреобразователя рассматривается пьезопластина (ЦТСНВ-1), нагруженная на водную среду, тыльная сторона пластины имеет демпфер. Исследование проведено для различных степеней демпфирования пьезопреобразователя. В качестве инструмента исследования выбран аппарат схем-аналогов преобразователей и спектральный метод Фурье.*

**Ключевые слова:** пьезопреобразователь, демпфер, возбуждающий сигнал, непрерывный режим, MathCAD, импульсный режим

В современном приборостроении широкое распространение получили ультразвуковые приборы на основе пьезоэлектрических преобразователей. Объемы выпуска

таких приборов стабильно возрастают. Улучшаются эксплуатационные характеристики приборов на основе пьезоэлектрических преобразователей: снижается мертвая

зона, уменьшаются шумы, возрастает разрешающая способность, увеличивается мощность излучения.

### 1. Вывод основных аналитических выражений

В процессе выполнения работы проводится исследование импульсного режима пьезоэлектрического преобразователя пластинчатого типа. Для возбуждения активного элемента преобразователя на собственной частоте пластины применяется импульс электрического напряжения, длительность которого изменяется в диапазоне от одного до двенадцати полупериодов. Для исследования возможности снижения длительности акустических импульсов, излучаемых пластиной при различных степенях её демпфирования, в работе использован подход, основанный на применении аппарата эквивалентных схем пьезоэлектрических преобразователей в сочетании со спектральным методом на основе преобразований Фурье.

В ходе выполнения работы, предполагалось, что активным материалом является пьезопластина выполненная из пьезокерамики ЦТСНВ-1. В качестве акустической нагрузки выбрана водная среда. Тыльная сторона пластины контактирует с демпфером. Возбуждение активного элемента осуществляется импульсом электрического напряжения  $U(t)$ . Требуется определить вид импульса колебательной скорости на выходе описанного преобразователя.

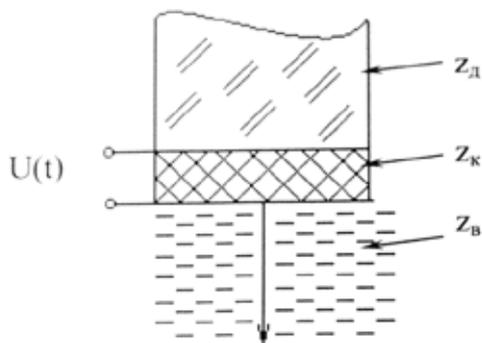


Рис. 1. Постановка задачи

$Z_d = (\rho \cdot c)_d$  — удельное акустическое сопротивление демпфера;

$Z_k = (\rho \cdot c)_k$  — удельное акустическое сопротивление керамики;

$Z_b = (\rho \cdot c)_b$  — удельное акустическое сопротивление воды.

Выполняя обратное преобразование Фурье в новых безразмерных переменных, с точностью до постоянного множителя получим выражение для колебательной скорости:

$$v(T) = Re \int_0^{\infty} F(\gamma n) U(\gamma) e^{j\gamma \pi t} d\gamma.$$

### 2. Результаты расчетов

На основе предложенного ранее математического аппарата в компьютерной программе MathCAD были проведены расчеты формы импульса колебательной скорости на излучателе из пьезокерамики. В ходе исследования был рассмотрен импульсный режим работы нагруженной на жидкость пластины, с демпфером и без него. Были представлены случаи, когда на пластину оказывается воздействие электрическим сигналом, содержащим различное число полупериодов колебаний на собственной частоте пластины. На рисунках 2–4 представлены расчетные результаты, показывающие как изменяется форма импульса колебательной скорости в режиме излучения в зависимости от длительности электрического возбуждающего импульса и удельного акустического сопротивления используемого демпфера.

На всех рисунках приняты следующие обозначения:

1.  $T$  — безразмерное время.
2. Значение амплитуды импульсов нормировано к единице.
3. Величина максимума излучаемого сигнала  $v_{max}$  представлена в условных единицах и указана для каждого графика.
4. Время  $T$ , при котором длительность импульса определяется по уровню — 20 дБ.

На рисунках 2–4 рассмотрен случай, когда демпфер отсутствует, то есть значение его удельного акустического сопротивления  $Z_d$  принимается равным 0. Изменяется только лишь длительность электрического возбуждающего импульса от 1 до 12 полупериодов.

Рисунок 2 соответствует случаю, когда  $n=1$  (число полупериодов, содержащихся в электрическом возбуждающем импульсе). На рисунке отчетливо видно, что уже на втором полупериоде амплитуда излучаемого импульса достигает своего максимума  $v_{max} = 3.5$ . Затем она плавно снижается на протяжении всех остальных полупериодов. Промежуток длительности, на которой мы рассматриваем сигнал оканчивается значением равным 20 полупериодам.

Но даже за это время амплитуда сигнала не успевает уменьшиться по отношению к максимуму до уровня в 20 дБ. По сравнению с рисунком 2, на рисунке 3 расположение максимума сместилось. В этом случае амплитуда колебательной скорости достигает своего максимума на шестом полупериоде и принимает значение  $v_{max} = 13.5$ , что в четыре раза превышает прежнее значение максимума. Этот случай соответствует длительность воздействующего импульса  $n=5$ . Длительность же излучаемого сигнала много больше 20 полупериодов. Легко видеть, что с ростом параметра  $n$  наблюдается значительное изменение формы импульса — с начала амплитуда сигнала постепенно возрастает, а затем, достигнув максимума, плавно спадает. Это хорошо видно на рисунке 4 ( $n=12$ ). Здесь сигнал имеет симметричную форму. Амплитуда принимает максимальные значения  $v_{max} = 17.1$  при  $n=2$  и при  $n=3$ . Это подтверждает то, что достигнуты условия, при которых преобразователь начинает работать в стационарном режиме.

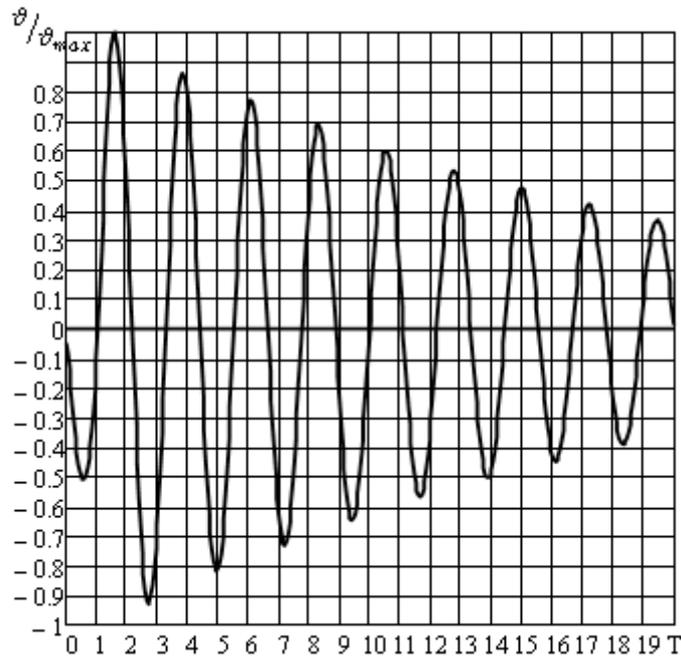


Рис. 2. Форма акустического импульса при  $z_d = 0, n=1, \tau_{и} > 20$

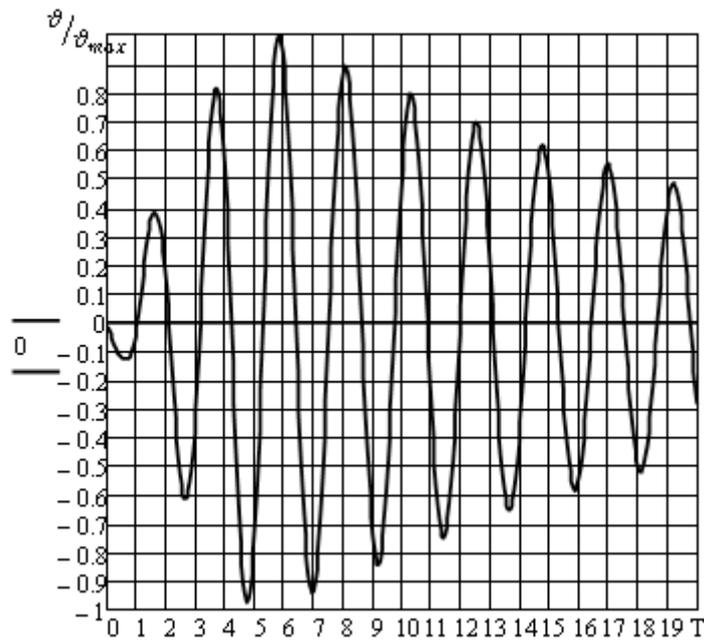


Рис. 3. Форма акустического импульса при  $z_d = 0, n=5, \tau_{и} > 20$ .

**Заключение**

В работе рассмотрена демпфированная пьезопластина, нагруженная на водную среду. Тыльная сторона пластины имеет демпфер. Возбуждение излучателя осуществляется импульсом электрического напряжения в виде одного, двух, трех и более полупериодов на частоте антирезонанса пластины.

На основе расчетно-теоретических исследований, базирующихся на использовании аппарата эквивалентных схем пьезопреобразователей и спектрального метода Фурье, определены формы акустических сигналов излучаемых пьезопреобразователем в жидкость.

Исследована динамика изменения формы импульса и его максимальная амплитуда в зависимости от числа полупериодов электрического сигнала, содержащихся в электрическом импульсе.

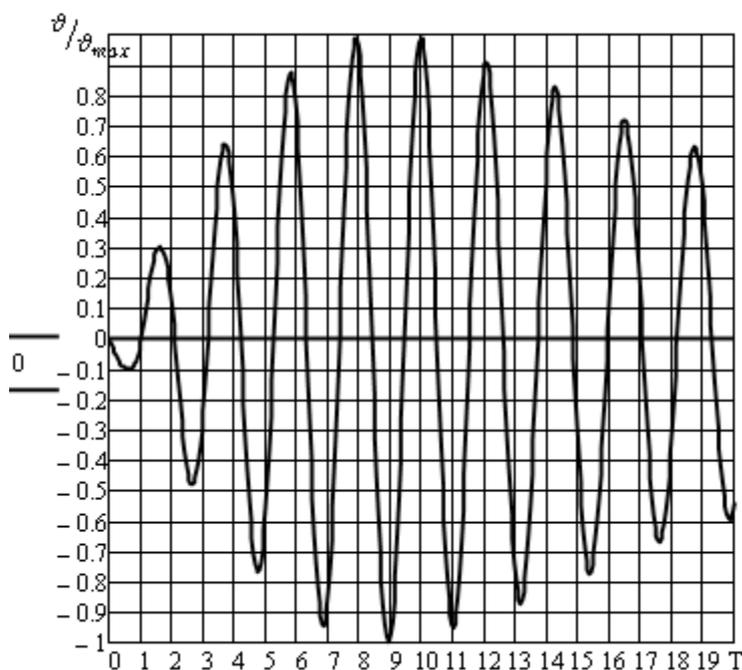


Рис. 4. Форма акустического импульса при  $z_d = 0$ ,  $n=12$ ,  $\tau_{н} > T$

Литература:

1. Ермолов, И.Н., Гитис М.Б., Королев М.В. и др. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля. — М.: Машиностроение, 1986.
2. Голубев, А.С. Преобразователи ультразвуковых дефектоскопов, учебное пособие / Л.: ЛЭТИ, 1986.
3. Lutsch, A. Solid mixtures with specified impedances and high attenuation for ultrasonic waves. — JASA, 1962, 34, p. 131–132.
4. Лепендин, Л.Ф. Акустика. — М.: Высшая школа, 1978.
5. Бабкин, Н.В. Демпфер к пьезоэлементу искательной головки ультразвукового дефектоскопа. Авт. свид. № 172543. — Бюлл. изобр., 1965, № 13, с. 85.
6. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. Ч. 1. М.: Машиностроение, 1976.
7. Гитис, М.Б. Преобразователи для импульсной ультразвуковой дефектоскопии. Основные теоретические положения. — Дефектоскопия, 1981, № 2, с. 65–84.
8. Бордюгов, Г.Т., Буденко Б.А., Гитис М.Б. и др. Искательная головка к ультразвуковому дефектоскопу, Авт. свид. № 266328. — Бюлл. изобр., 1970, № 11, с. 131.
9. Дмитриев, Т.В., Сажин В.В. Комплект искателей «Снежинка». — Дефектоскопия, 1972, № 4, с. 136–140.
10. Кирияков, В.Ф. О применении пьезопреобразователей с наклонным дном иммерсионной ванны. — Дефектоскопия, 1976, № 4, с. 96–104.
11. Ермолов, И.Н., Рыжов-Никонов В.И. Теория работы пьезоэлектрических искателей ультразвуковых дефектоскопов. 1. Основные уравнения электроакустического тракта ультразвукового дефектоскопа. — Дефектоскопия, 1976, № 5, с. 7–18.
12. Меркулов, Л.Г., Яблоник Л.М. Работа демпфированного пьезопреобразователя при наличии нескольких промежуточных слоев. — Акуст. журнал, 1963, 9, с. 449–459.
13. Яблоник, Л.М. К вопросу о влиянии электрической нагрузки на работу многослойного преобразователя. — Акуст. журнал. 1964, 10, с. 234–238.
14. Меркулова, В.М. Широкополосный иммерсионный пьезопреобразователь с согласующим протектором. — Дефектоскопия, 1972, № 6, с. 57–62.
15. Касаткин, Б.А. Лебедев В.Г. Спектр собственных частот контактного пьезопреобразователя. Дефектоскопия, 1979, № 6, с. 40–44.

## Исследование генерации второй гармоники твердотельного лазера с полупроводниковой накачкой

Смола Максим Юрьевич, студент;  
Соколов Александр Олегович, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

В представленной работе исследуется генерация второй гармоники твердотельного лазера с полупроводниковой накачкой.

**Ключевые слова:** твердотельный лазер, вторая гармоника, полупроводниковая накачка

Эффект генерации второй гармоники используется для расширения возможного длин волн лазерного излучения. Реализуется в основном в твердотельных лазерах. Также применяется для получения зондирующего излучения.

### 1. Нелинейная оптика

Нелинейная оптика — это раздел физики, в котором изучаются процессы взаимодействия вещества со светом, результат которых зависит от интенсивности света. Одним из таких результатов является генерация гармоники лазерного излучения.

Это происходит из-за эффекта переизлучения. Когда на вещество попадает внешнее излучение в области взаимодействия будет происходить поляризация среды. Электрический дипольный момент, или степень поляризации, будет определяться значением напряженности электрического поля, а также диэлектрической восприимчивостью среды (1)

$$P = \alpha E \quad (1)$$

где  $E$  — напряженность;  $\alpha$  — диэлектрическая восприимчивость среды. Для низких уровней напряженности (линейная оптика)  $\alpha \neq f(E)$ , но при увеличении интенсивности пучка напряженность будет возрастать до уровня, сравнимой с уровнем напряженности электрического поля атома, вследствие чего появляется зависимость свойств среды от  $E$ . Диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$  определяется вектором поляризации  $P$  и связана с относительной диэлектрической восприимчивостью соотношениями (2) и (3)

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2)$$

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (3)$$

В общем случае диэлектрическая восприимчивость является функцией от напряженности. Тогда можно получить соотношение (4).

$$P = \epsilon_0 (\chi_1 E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots) \quad (4)$$

Первое слагаемое определяет линейную поляризацию, а все остальные — нелинейную. Все коэффициенты  $\chi$  не зависят от  $E$  и характеризуют свойства вещества. В зависимости от их значений среды разделяют на квадратичные, кубические и т. д. При распространении в квадратичной среде вдоль оси  $z$  излучения основной гармоники с круговой частотой  $\omega_1 = 2\pi\nu_1$  и скоростью  $v_1$  степень поляризации определится как

$$P(t) = \alpha_1 E_0 \cos(\omega_1 t - z/v_1) + \alpha_{11} E_0^2 \cos^2(\omega_1 t - z/v_1) = \alpha_1 E_0 \cos(\omega_1 t - z/v_1) + 0,5 \alpha_{11} E_0^2 [1 + \cos(2\omega_1 t - 2z/v_1)].$$

Получается, что если воздействовать на квадратичную среду интенсивным, монохроматическим, обычным лазерным излучением, обладающим исходной частотой  $\nu_1$ , в ней может дополнительно появиться вторая гармоника излучения с частотой  $\nu_{11}$ , равной удвоенной  $\nu_1$ . Для осуществления подобного преобразования частоты необходимо, чтобы выполнялось условие волнового синхронизма:  $\nu_1 = \nu_{11}$  или  $c/n_1 = c/n_{11}$ , и, следовательно,  $n_1 = n_{11}$ , где  $c$  — скорость света в вакууме;  $n_1, n_{11}$  — показатели преломления среды для первой и второй гармоник излучения. С квантовой точки зрения оно представляет собой закон сохранения импульса для фотонов, которые участвуют в этом процессе (6)

$$\hbar k(2\omega) = \hbar k(\omega) + \hbar k(\omega) = 2 \hbar k(\omega) \quad (6)$$

Условие волнового синхронизма осуществимо в одноосных двулучепреломляющих кристаллах, в которых могут существовать «необыкновенный» и «обыкновенный» лучи. В таких кристаллах для необыкновенной волны показатель преломления зависит от направления распространения. Показатель преломления для такой волны имеет вид эллипсоида. Для обыкновенной волны показатель преломления не зависит от направления распространения. Угол между оп-

тической осью нелинейного кристалла и волновыми векторами взаимодействующих волн называют углом волнового синхронизма.

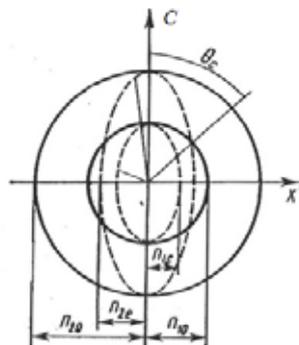


Рис. 1.  $C$  — оптическая ось. Сплошные кольца — сечения поверхностей показателей преломления обыкновенной волны;  $n_{10}$  — его значения для основной частоты,  $n_{20}$  — для второй гармоники. Пунктирные эллипсы — сечения поверхностей показателей преломления необыкновенной волны;  $n_{1e}$  — его минимальное значения для основной частоты,  $n_{2e}$  — для второй гармоники;  $\theta_c$  — угол синхронизма

Важным является то, что сечение поверхности показателя преломления для необыкновенной волны на частоте 2 пересекает сечение поверхности показатель преломления для обыкновенной волны на частоте .

### 2. Генерация второй гармоники лазерного излучения

Впервые генерация второй гармоники была продемонстрирована в 1961 г. группой американских ученых во главе с Франкеном. Его схема получения второй оптической гармоники является основной.

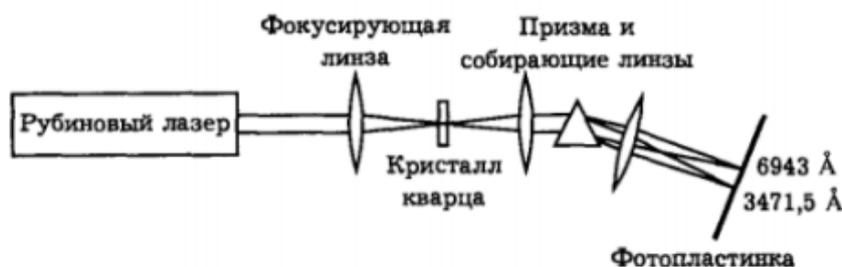


Рис. 2.

В этом опыте излучение, генерируемое рубиновым лазером, фокусировалось в кристалл кварца. Выходное излучение разворачивали в спектр при помощи дисперсионной призмы и фокусировали на фотопластинку. В результате можно было наблюдать, что помимо света на частоте лазера из кристалла выходил свет на удвоенной частоте. Это и была вторая гармоника. В опыте Франкена, излучение было очень слабым, но этот опыт дал значительный вклад в развитие нелинейной оптики. В дальнейшем было показано, что если использовать другие кристаллы, то можно добиться огромного увеличения эффективности генерации второй гармоники.

В нынешнее время существуют методы, с помощью которых можно преобразовать во вторую гармонику большую часть лазерного излучения. Генерация второй гармоники наблюдается в КТР (кристалл титанил фосфата калия), а также дигидрофосфате калия  $KH_2PO_4$ , и ниобате лития  $LiNbO_3$ . В настоящее время в импульсных твердотельных лазерах за счет высокой плотности мощности достигнута генерация третьей и четвертой гармоник лазерного излучения.

### 3. Результаты исследования

В ходе исследования была получена временная характеристика, где  $I_2$  — интенсивность второй гармоники, а  $I_3$  — интенсивность накачки.

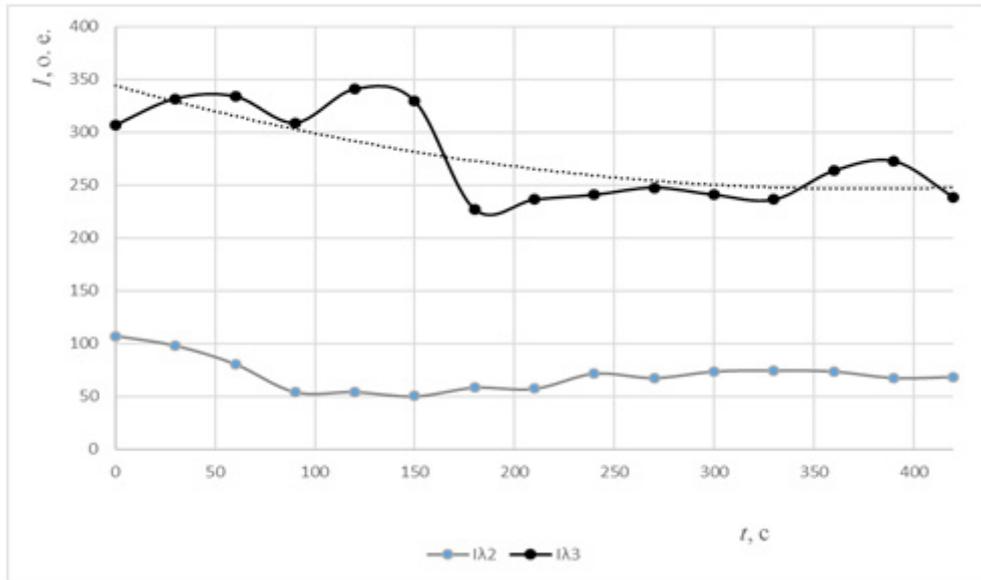


Рис. 3.

Из нее видно, что с течением времени интенсивность накачки уменьшается. Связано это, прежде всего, с нагревом лазера в процессе работы.

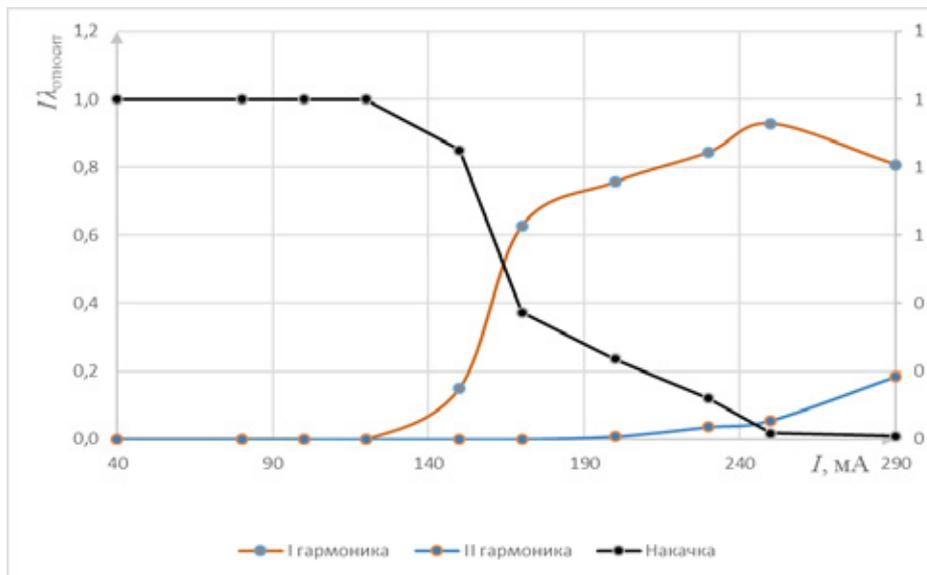


Рис. 4.

Также была получена характеристика относительных интенсивностей каждой составляющей излучения. Относительная интенсивность накачки уменьшается с появлением излучения лазера, а относительная интенсивность первой гармоники уменьшается, когда появляется вторая гармоника.

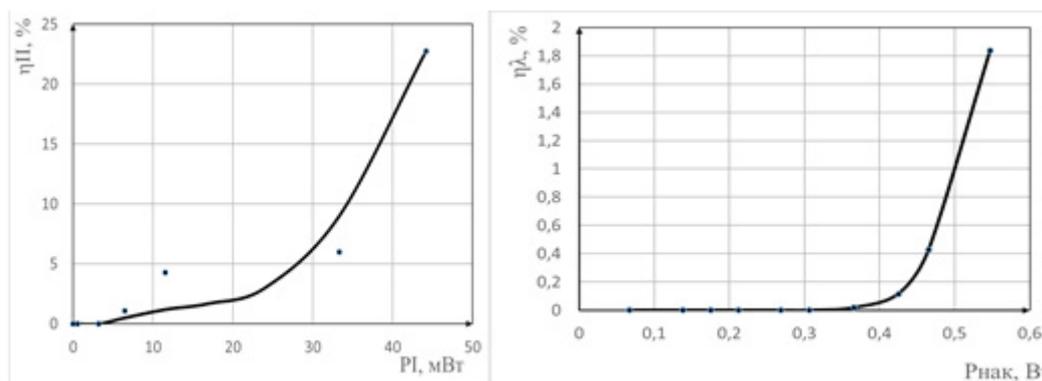


Рис. 5.

В результате были рассчитаны КПД преобразования первой гармоники во вторую и КПД генерации второй гармоники, которые составили 22,5 % и 1,9 % соответственно.

### Заключение

Данное исследование является актуальным на сегодняшний день, т. к. с помощью этого эффекта можно получать излучения с необходимыми длинами волн, для применения в различных отраслях.

### Литература:

1. Вуппер, В. Справочник по лазерной технике. М.: Энергоатомиздат, 1991. 544 с.
2. Ландсберг, Г. С. Оптика Учеб. пособие для вузов. М.: Физматлит, 2003. 848 с.
3. Пихтин, А. Н. Квантовая и оптическая электроника. Учебник. М.: Абрис, 2012. 573 с.
4. Смирнов, Е. А., Киселев А. С. Основы лазерной техники. Методическое пособие. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 48 с.
5. Научно-образовательный проект «Лазерный портал» [Электронный ресурс] — URL: <http://www.laserportal.ru/> (дата обращения: 25. 05.2016).

## Коммутатор кода для стенда автоматизированной настройки дискриминатора атомного на рубидиевой газовой ячейке

Соколов Александр Олегович, студент;

Журба Антон Владимирович, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе рассматривается разработанный коммутатор кода, имеющий возможность подключения к персональному компьютеру.*

**Ключевые слова:** стандарт частоты, рубидиевая газовая ячейка, дискриминатор атомный

Определение частоты стало наиболее точным измерительным процессом. Поэтому все шире проявляется тенденция сведения измерений самых разнообразных физических величин к измерению частоты. Это в свою очередь предъявляет все более жесткие требования к точности, надежности и удобству измерения частоты и превращает этот процесс в одну из наиболее актуальных физических и техни-

ческих задач. С этой проблемой тесно связаны точные измерения промежутков времени и разности фаз периодических процессов, необходимые для многих областей науки и техники. Области применения точного измерения частоты: служба времени, навигация, исследование космоса, многие другие области науки. Одним из основных элементов систем измерения частоты является опорный стандарт частоты.

### 1. Квантовые стандарты частоты

КСЧ представляют собой источники сигналов с эталонными частотами. В этих приборах используются физические принципы, при которых значение и неизменность во времени частоты выходных сигналов определяются стабильностью частот соответствующих энергетическим переходам атомов и молекул различных веществ и их изотопов, таких как  $H_2$ , Cs, Rb [1].

По принципам построения квантовые стандарты частоты подразделяются на приборы активного и пассивного типа. Наиболее точными КСЧ активного типа являются водородные генераторы. Примером подобного использования является эталонный стандарт частоты, находящийся в Москве.

### 2. Дискриминатор атомный

Атомный дискриминатор представляет из себя одну из главных частей квантового стандарта частоты на рубидиево-газовой ячейке (КСЧ-РГЯ). Работа высокостабильного квантового стандарта частоты основана на принципе

подстройки менее стабильной частоты кварцевого генератора по высокостабильной частоте энергетического перехода между двумя состояниями (называемыми сверхтонкими подуровнями атомов рубидия Rb 87) [2].

Остановимся поподробнее на механизме обеспечения и регистрации переходов в атомном дискриминаторе. Схема атомного дискриминатора представлена на рисунке 1.

Основная задача атомного дискриминатора — обеспечение высокостабильной частоты квантовых переходов, эта частота равна 6834687000 Гц (в литературе 6834.7 МГц). Для выделения этой частоты используется метод оптической накачки [3].

### 3. Коммутатор кода

Как было описано выше, частота СВЧ-поля, которой облучается газовая ячейка, равна 6834 МГц. Частота 6834 МГц формируется путем умножения выходной частоты кварцевого генератора 20 МГц на 3 и на коэффициент 114. Из полученного значения вычитается промодулированный сигнал в 5.314 МГц путем прямого подмешивания. Коммутатор кода управляет выходной частотой синтеза-

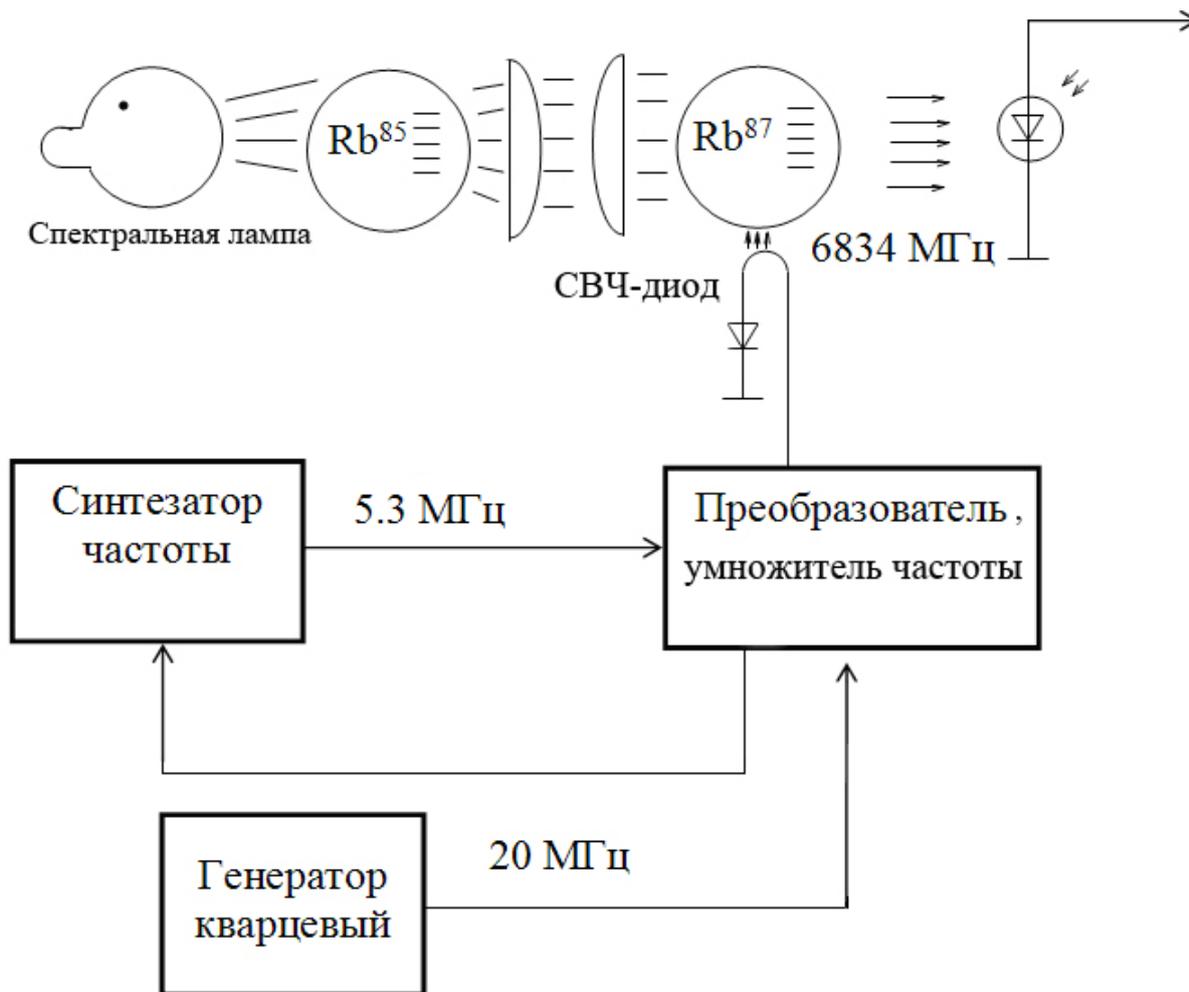


Рис. 1. Схема накачки и регистрации переходов

тора частоты, подавая двоичный код на многоразрядный сумматор.

Частота, сформированная на выходе синтезатора, зависит от кода, по формуле:

$$f_{\text{ВЫХ}} = \frac{f_0}{\left(N_1 + \frac{q}{2^m}\right) \times N_2} \quad (1)$$

где  $f_0$  — входная частота, равная 10 МГц;  $q$  — код, число, которое записывается в сумматор;  $2^m$  — емкость сумматора;  $m$  — количество разрядов сумматора;  $N_1$  и  $N_2$  — числовые коэффициенты.

В рассматриваемом стандарте  $N_1 = 15$  и  $N_2 = 2$ . Значение  $q$  будет от  $2^0$  до  $2^{23}$ , в зависимости от разряда.

Меняя частоту СВЧ-поля с помощью кода частоты и коммутатора кода, мы проходим весь диапазон спектральной линии (рисунок 2). Так как наша цель — получить явный сигнал ошибки (СО), необходимо найти точку в спектре, где СО будет максимальным.

Для этого надо подать центральную частоту так, чтобы максимум величины девиации низкочастотной манипуляции приходился на участок спектральной линии, обладающий максимальной крутизной (точки  $A$  и  $B$ ). Выполнив эти условия, мы получим максимумы сигнала ошибки в точках  $C$  и  $D$ . Данная кривая является первой гармоникой сигнала ошибки, несущая в себе информацию о величине отклонения частоты и знаке этого отклонения.

Для того чтобы войти в частотный диапазон, в котором наблюдается спектральная линия, мы должны выставить начальный код частоты на коммутаторе кода. С помощью переключателей старших разрядов подстроить выходную частоту синтезатора частоты в рабочий диапазон, в котором наблюдается спектральная линия.

Точная подстройка производится с помощью персонального компьютера, который управляет младшими разрядами. Проводя точную настройку, мы исследуем всю спектральную линию, отмечая значения центральной частоты, при которых наблюдаются максимумы сигнала ошибки.

Общее количество разрядов равно 24.

Первые три разряда имеют слишком малое значение, поэтому они не используются. Исходя из аналогичных соображений, мы не используем старшие разряды. Разряды с четвертого до тринадцатого находятся в стандарте частоты и подстраиваются автоматически.

### Заключение

Представленный в работе коммутатор кода даст возможность автоматизировать процесс настройки дискриминатора атомного, что позволит уменьшить влияние человеческого фактора.

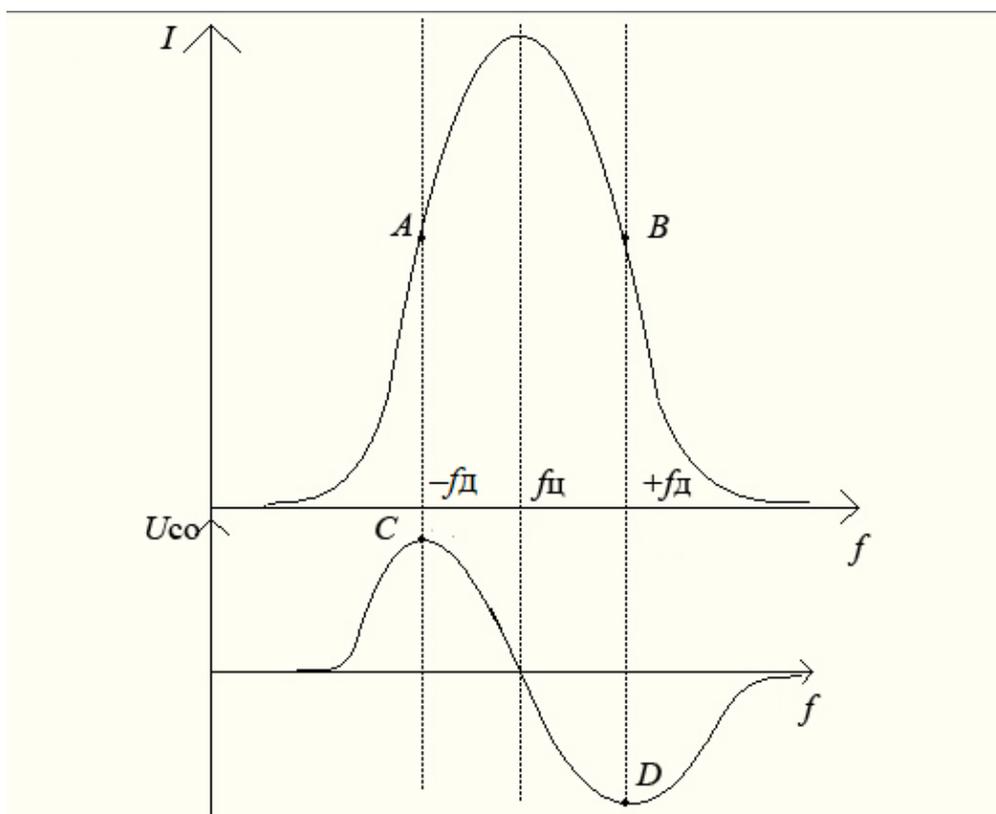


Рис. 2. Спектральная линия и сигнал ошибки:  $f_{\text{ц}}$  — центральная частота (основная частота),  $f_{\text{д}}$  и  $+f_{\text{д}}$  величина девиации частоты относительно  $f_{\text{ц}}$

Литература:

1. Басевич, А. Б. Применение в аппаратуре систем единого времени квантовых стандартов частоты. СПб: ОАО «РИРВ», 2014. 70 с.
2. Басевич, А. Б. Стандарт частоты: Руководство по эксплуатации. СПб: ОАО «РИРВ», 2005. 61 с.
3. Геворкян, А. Г. Квантовый стандарт частоты: Эскизный проект. СПб: ОАО «РИРВ», 1990. 47 с.

## Преимущества рубидиевых стандартов частоты

Соколов Александр Олегович, студент;

Смола Максим Юрьевич, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе описываются основные достоинства рубидиевых стандартов частоты.*

**Ключевые слова:** стандарт частоты, рубидиевая газовая ячейка, дискриминатор атомный

Определение частоты стало наиболее точным измерительным процессом. Поэтому все шире проявляется тенденция сведения измерений самых разнообразных физических величин к измерению частоты. Это в свою очередь предъявляет все более жесткие требования к точности, надежности и удобству измерения частоты и превращает этот процесс в одну из наиболее актуальных физических и технических задач. С этой проблемой тесно связаны точные измерения промежутков времени и разности фаз периодических процессов, необходимые для многих областей науки и техники. Области применения точного измерения частоты: служба времени, навигация, исследование космоса, многие другие области науки. Одним из основных элементов систем измерения частоты является опорный стандарт частоты.

### 1. Квантовые стандарты частоты

КСЧ представляют собой источники сигналов с эталонными частотами. В этих приборах используются физические принципы, при которых значение и неизменность во времени частоты выходных сигналов определяются стабильностью частот соответствующих энергетическим переходам атомов и молекул различных веществ и их изотопов, таких как  $H_2$ , Cs, Rb [1].

По принципам построения квантовые стандарты частоты подразделяются на приборы активного и пассивного типа. Наиболее точными КСЧ активного типа являются водородные генераторы. Примером подобного использования является эталонный стандарт частоты, находящийся в Москве.

Широкое распространение получили стандарты пассивного типа, в которых преобразованная частота кварцевого генератора сравнивается с частотой атомного перехода рабочего вещества в физическом блоке — атомном дискриминаторе (ДА). Среди ДА в настоящее время чаще

всего используются цезиевые атомно-лучевые трубки (АЛТ) и дискриминаторы на рубидиевой газовой ячейке. В соответствии с этим общепринято использовать названия атомно-лучевые стандарты (цезиевые или рубидиевые) и квантовые стандарты частоты на рубидиевой газовой ячейке (КСЧ-РГЯ) с оптической накачкой или просто рубидиевые стандарты частоты.

### 2. Дискриминатор атомный

Атомный дискриминатор представляет из себя одну из главных частей квантового стандарта частоты на рубидиево-газовой ячейке (КСЧ-РГЯ). Работа высокостабильного квантового стандарта частоты основана на принципе подстройки менее стабильной частоты кварцевого генератора по высокостабильной частоте энергетического перехода между двумя состояниями (называемыми сверхтонкими подуровнями атомов рубидия Rb 87) [2].

Остановимся поподробнее на механизме обеспечения и регистрации переходов в атомном дискриминаторе. Схема атомного дискриминатора представлена на рисунке 1.

Основная задача атомного дискриминатора — обеспечение высокостабильной частоты квантовых переходов, эта частота равна 6834687000 Гц (в литературе 6834.7 МГц). Для выделения этой частоты используется метод оптической накачки [3].

### 3. Основные параметры

#### 3.1 Характеристики нестабильности.

Нестабильность частоты стандартов характеризует ее случайные флуктуации во времени, обусловленные различными источниками шума, которые носят случайный характер.

Принято различать кратковременную и долговременную нестабильность частоты.

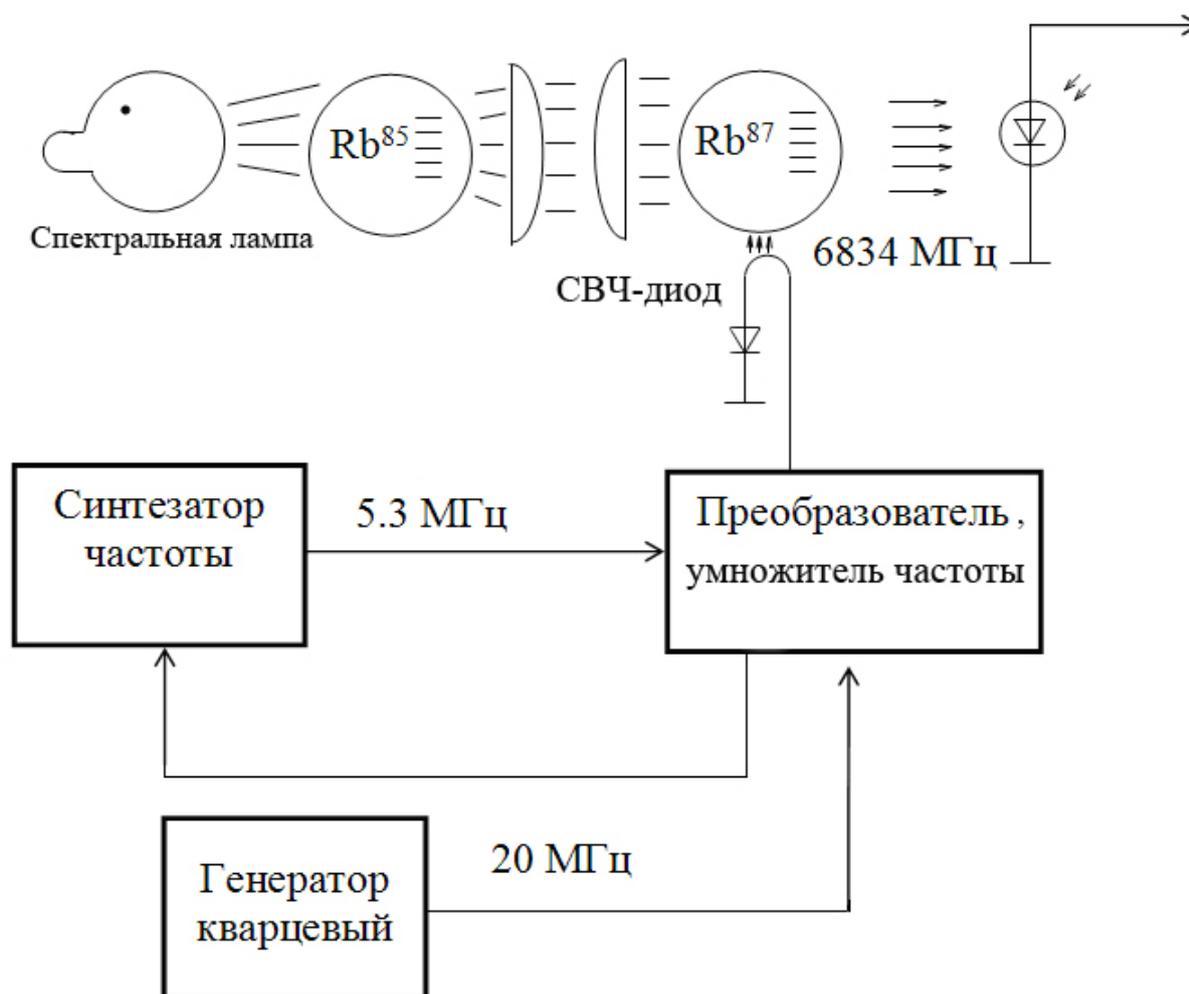


Рис. 1. Схема накачки и регистрации переходов

К кратковременной нестабильности, обусловленной флуктуациями с характером дробового шума (белого шума), относятся измерения до 103–104 сек.

Флуктуации, имеющие характер фликер-шума, определяют долговременные характеристики частоты. К ним относят характеристики с временем измерения 104 и более сек.

К характеристикам нестабильности относятся:

- относительное отклонение по частоте;
- случайные флуктуации;
- дрейф частоты.

*Относительное отклонение по частоте.*

Заявленная частота называется номинальной и обозначается  $f_{ном}$ .

Однако в реальных условиях мы получаем частоту с некоторой погрешностью. Отклонение от номинальной частоты называется относительным отклонением по частоте.

*Случайные флуктуации.*

Случайные флуктуации обусловлены источниками шума (тепловые, дробовые), которые часто называют «кратковременной нестабильностью»; эти флуктуации становятся тем более существенными, чем короче интервалы времени, и требуют статистического исследования.

Флуктуации могут быть описаны с помощью статистики, в качестве одной из характеристик нестабильности.

*Дрейф частоты.*

Известно, что рублидиевым стандартам частоты присущ дрейф частоты во времени, обусловленный изменением распределения рабочего вещества внутри спектральных приборов, составляющих ДА, процессами старения, связанными с поглощением этого вещества стенками этих приборов и другими взаимосвязанными процессами. Данные процессы носят долговременный характер, проявляются на длительных временах работы стандарта и с достаточной точностью аппроксимируются линейной временной зависимостью [3].

Значение линейного дрейфа в первые месяцы работы КСЧ-РГЯ (квантовый стандарт частоты на рублидиевой газовой ячейке) составляет  $(1...3) \cdot 10^{-11}$  о. е./мес., после года работы прибора  $(1...5) \cdot 10^{-12}$  о. е./мес. На рисунке 2 приведен долговременный дрейф частоты стандарта 2009 года, снятый экспериментальным путем. Отдельные выбросы и скачки частоты на графике обусловлены сбоями системы измерения, а также условиями испытания стандарта, но, как видно из рисунка, они не мешают определить основную тенденцию изменения дрейфа частоты во

времени. Вместе с тем, необходимость сохранения точностных характеристик аппаратуры систем синхронизации специального назначения в периоды отсутствия сигналов спутниковых систем навигации оставляет актуальным ис-

пользование в этой аппаратуре КСЧ-РГЯ с высокими эксплуатационными и метрологическими характеристиками, обеспечивающих «автономный» режим работы системы в течение длительного периода.

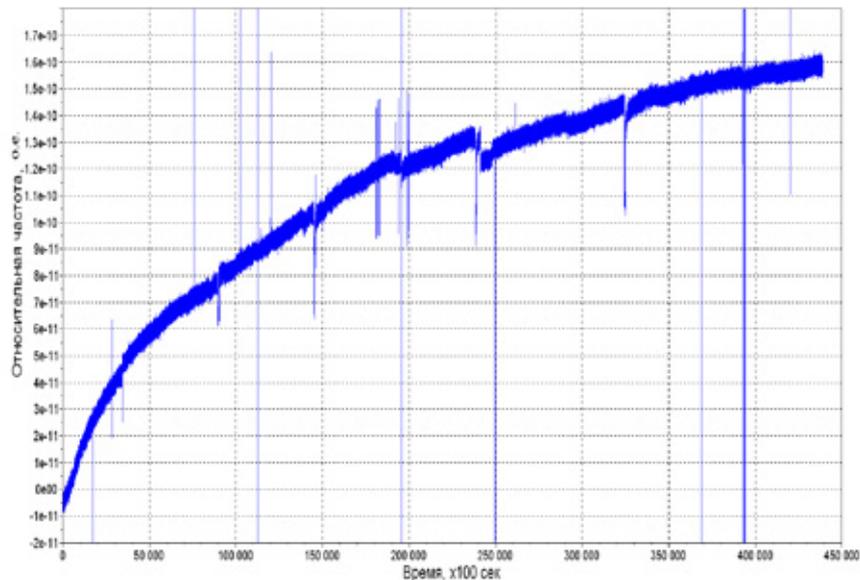


Рис. 2. Долговременный дрейф частоты стандарта 2009 года

После года работы дрейф частоты имеет низкое значение, которое составляет (1...5) Е-12о. е./мес и достаточно хорошо аппроксимируется линейной функцией. Что позволяет строить точные прогнозы поведения частоты стандарта во времени. Темой данной бакалаврской работы будет разработка стенда для автоматической настройки атомного дискриминатора, описание методики настройки атомного дискриминатора, который является одной из важнейших частей, обеспечивающих работу стандартов частоты.

### 3.2 Актуальность рубидиевых стандартов частоты

Рубидиевые стандарты нашли применение в наземных системах синхронизации и навигации, а также в спутниковой системе навигации ГЛОНАСС. В случае обеспечения непрерывного сличения и корректировки частоты стандарта их относительная погрешность по частоте в течение всего времени эксплуатации не превысит 5Е-12 о. е. Такая возможность позволила снизить требования к эксплуатационным характеристикам непосредственно физических блоков стандартов — атомных дискриминаторов и, как следствие, упростить их конструкцию, уменьшить вес и габариты.

Малые габариты, низкая стоимость при сохранении высоких метрологических характеристик обусловили быстрый рост разработок и производства таких приборов и их применения в широком спектре направлений.

Рубидиевые стандарты частоты завоевывают большую популярность благодаря небольшим размерам и неплохими характеристиками. Вместе с тем, им присущ долговременный дрейф частоты. В то же время данная проблема успешно решается с помощью корректировки частоты по сигналам ГЛОНАСС, GPS или при сличении со стандартом более высокого класса. Подобное применение называется «дисциплинированным стандартом частоты».

### Заключение

Рубидиевые стандарты частоты остаются актуальны в настоящее время и способны использоваться в различных отраслях науки и техники, соответствия высоким требованиям к точности.

Литература:

1. Басевич, А. Б. Применение в аппаратуре систем единого времени квантовых стандартов частоты. СПб: ОАО «РИРВ», 2014. 70 с.
2. Басевич, А. Б. Стандарт частоты: Руководство по эксплуатации. СПб: ОАО «РИРВ», 2005. 61 с.
3. Геворкян, А. Г. Квантовый стандарт частоты: Эскизный проект. СПб: ОАО «РИРВ», 1990. 47 с.

## Получение высокостабильной частоты в рубидиевых стандартах частоты

Соколов Александр Олегович, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе описывается метод получения высокостабильной частоты в рубидиевых стандартах частоты.*

**Ключевые слова:** стандарт частоты, рубидиевая газовая ячейка, дискриминатор атомный

Определение частоты стало наиболее точным измерительным процессом. Поэтому все шире проявляется тенденция сведения измерений самых разнообразных физических величин к измерению частоты. Это в свою очередь предъявляет все более жесткие требования к точности, надежности и удобству измерения частоты и превращает этот процесс в одну из наиболее актуальных физических и технических задач. С этой проблемой тесно связаны точные измерения промежутков времени и разности фаз периодических процессов, необходимые для многих областей науки и техники. Области применения точного измерения частоты: служба времени, навигация, исследование космоса, многие другие области науки. Одним из основных элементов систем измерения частоты является опорный стандарт частоты.

### 1. Квантовые стандарты частоты

КСЧ представляют собой источники сигналов с эталонными частотами. В этих приборах используются физические принципы, при которых значение и неизменность во времени частоты выходных сигналов определяются стабильностью частот соответствующих энергетическим переходам атомов и молекул различных веществ и их изотопов, таких как  $H_2$ , Cs, Rb [1].

По принципам построения квантовые стандарты частоты подразделяются на приборы активного и пассивного типа. Наиболее точными КСЧ активного типа являются водородные генераторы. Примером подобного использования является эталонный стандарт частоты, находящийся в Москве.

Широкое распространение получили стандарты пассивного типа, в которых преобразованная частота кварцевого генератора сравнивается с частотой атомного перехода рабочего вещества в физическом блоке — атомном дискриминаторе (ДА). Среди ДА в настоящее время чаще всего используются цезиевые атомно-лучевые трубки (АЛТ) и дискриминаторы на рубидиевой газовой ячейке. В соответствии с этим общепринято использовать названия атомно-лучевые стандарты (цезиевые или рубидиевые) и квантовые стандарты частоты на рубидиевой газовой ячейке (КСЧ-РГЯ) с оптической накачкой или просто рубидиевые стандарты частоты.

### 2. Дискриминатор атомный

Атомный дискриминатор представляет из себя одну из главных частей квантового стандарта частоты на рубидиево-газовой ячейке (КСЧ-РГЯ). Работа высокостабильного квантового стандарта частоты основана на принципе подстройки менее стабильной частоты кварцевого генератора по высокостабильной частоте энергетического перехода между двумя состояниями (называемыми сверхтонкими подуровнями атомов рубидия Rb 87) [2].

Остановимся поподробнее на механизме обеспечения и регистрации переходов в атомном дискриминаторе. Схема атомного дискриминатора представлена на рисунке 1.

Основная задача атомного дискриминатора — обеспечение высокостабильной частоты квантовых переходов, эта частота равна 6834687000 Гц (в литературе 6834.7 МГц). Для выделения этой частоты используется метод оптической накачки [3].

### 3. СВЧ-поле

С выхода ГК сигнал частотой 20 МГц подается на вход преобразователя частоты.

В преобразователе частоты сигнал частотой 20 МГц преобразуется в сигнал 5 МГц. Синусоидальный сигнал частотой 5 МГц поступает на выходной разъем «Выход 5 МГц». Второй сигнал частотой 5 МГц (меандр) поступает с преобразователя частоты на синтезатор частоты.

В синтезаторе частоты сигнал 5 МГц преобразовывается путем некротного преобразования частоты в синусоидальный сигнал 5.313 МГц. Для определения знака и величины расстройки преобразованной частоты ГК относительно частоты сверхтонкого перехода применяется низкочастотная (НЧ) модуляция или манипуляция сигнала СВЧ-поля, облучающего ячейку. Обычно значение частоты НЧ модуляции выбирают в пределах (50...300) Гц. В стандарте частоты она выбрана 78 Гц.

В синтезаторе частоты вырабатывается низкочастотный сигнал 78 Гц (меандр), который используется для осуществления низкочастотной манипуляции СВЧ-поля, для чего сигнал прямоугольной формы вводится в один из каскадов синтезатора частоты, и сигнал 5.313 МГц оказывается промодулирован частотой 78 Гц.

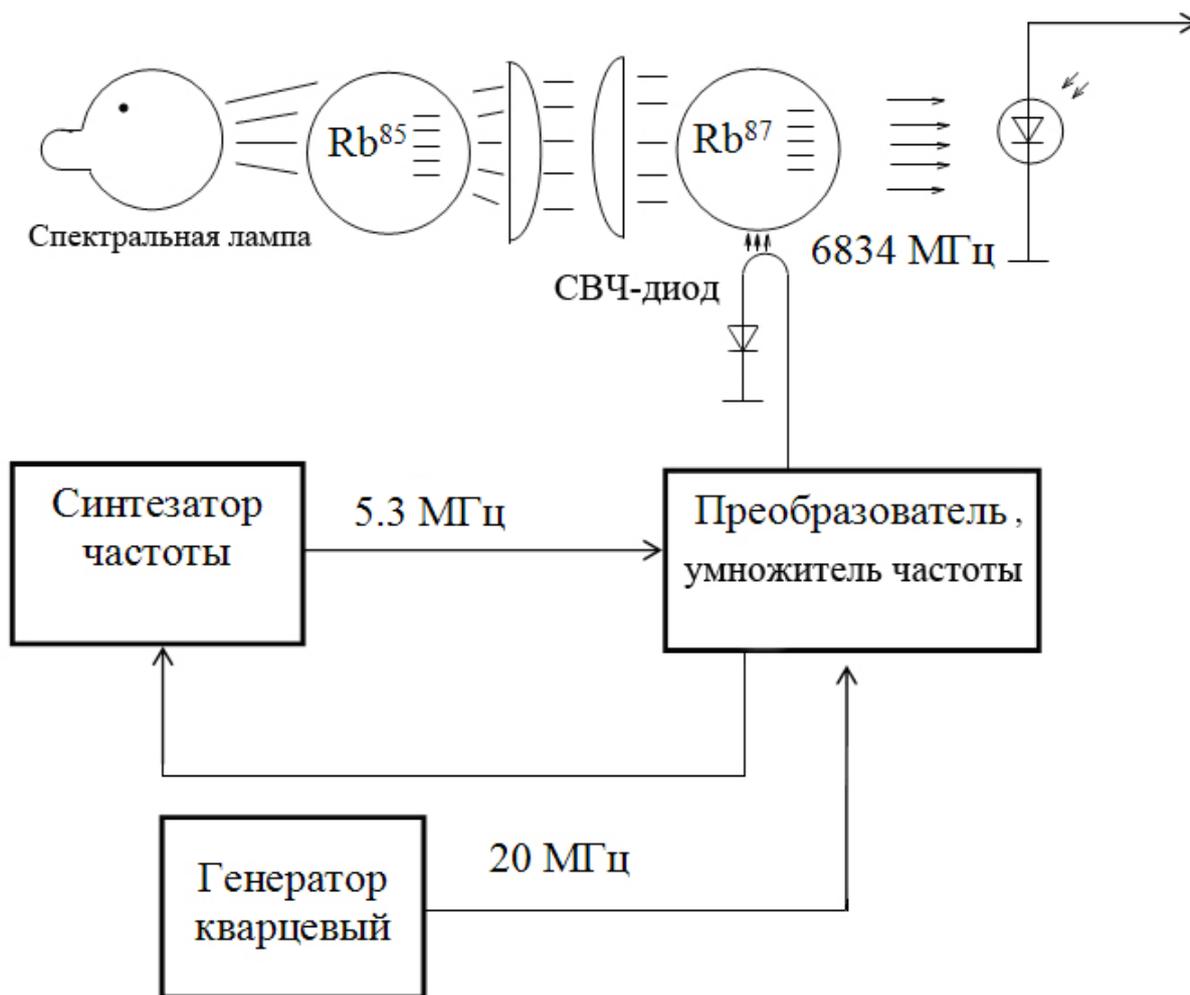


Рис. 1. Схема накачки и регистрации переходов

Сигнал ошибки несет в себе информацию об отклонении текущей частоты стабилизации от заявленной в документации. Этот же сигнал поступает на синхронный детектор, расположенный в формирователе сигналов управления (ФСУ).

На рисунке 2 приведена характеристика радиочастотного поглощения. Этот рисунок иллюстрирует изменение фазы сигнала ошибки  $U_{CO}$  при расстройке преобразованной частоты ГК относительно резонанса, а также появление сигнала двойной частоты (ДЧ)  $U_{дч}$  и равенство нуля  $CO$  при совпадении преобразованной частоты ГК с частотой сверхтонкого перехода атомов  $Rb^{87}$ .

Из рисунка 2 видно также, что фаза  $CO$  несет в себе информацию о знаке, а амплитуда  $CO$  о величине расстройки преобразованной частоты ГК, и, таким образом,  $CO$  может быть использован для автоматической подстройки частоты ГК.

Сигнал ошибки поступает на вход формирователя сигнала управления (ФСУ), где усиливается избирательным усилителем, настроенным на частоту 78 Гц, и поступает на синхронный детектор (СД). В СД сигнал ошибки преобразуется в постоянное напряжение, которое через интегратор поступает для точной подстройки частоты кварцевого генератора.

Частота кварцевого генератора подстраивается, таким образом, пока частота преобразованного сигнала с умножительного СВЧ-диода точно не совпадает с частотой 6834.7 МГц перехода атомов  $Rb^{87}$ .

### Заключение

На рассмотренном методе получения высокостабильной частоты основаны все рубидиевые стандарты частоты, которые широко используются во многих отраслях науки и технике.

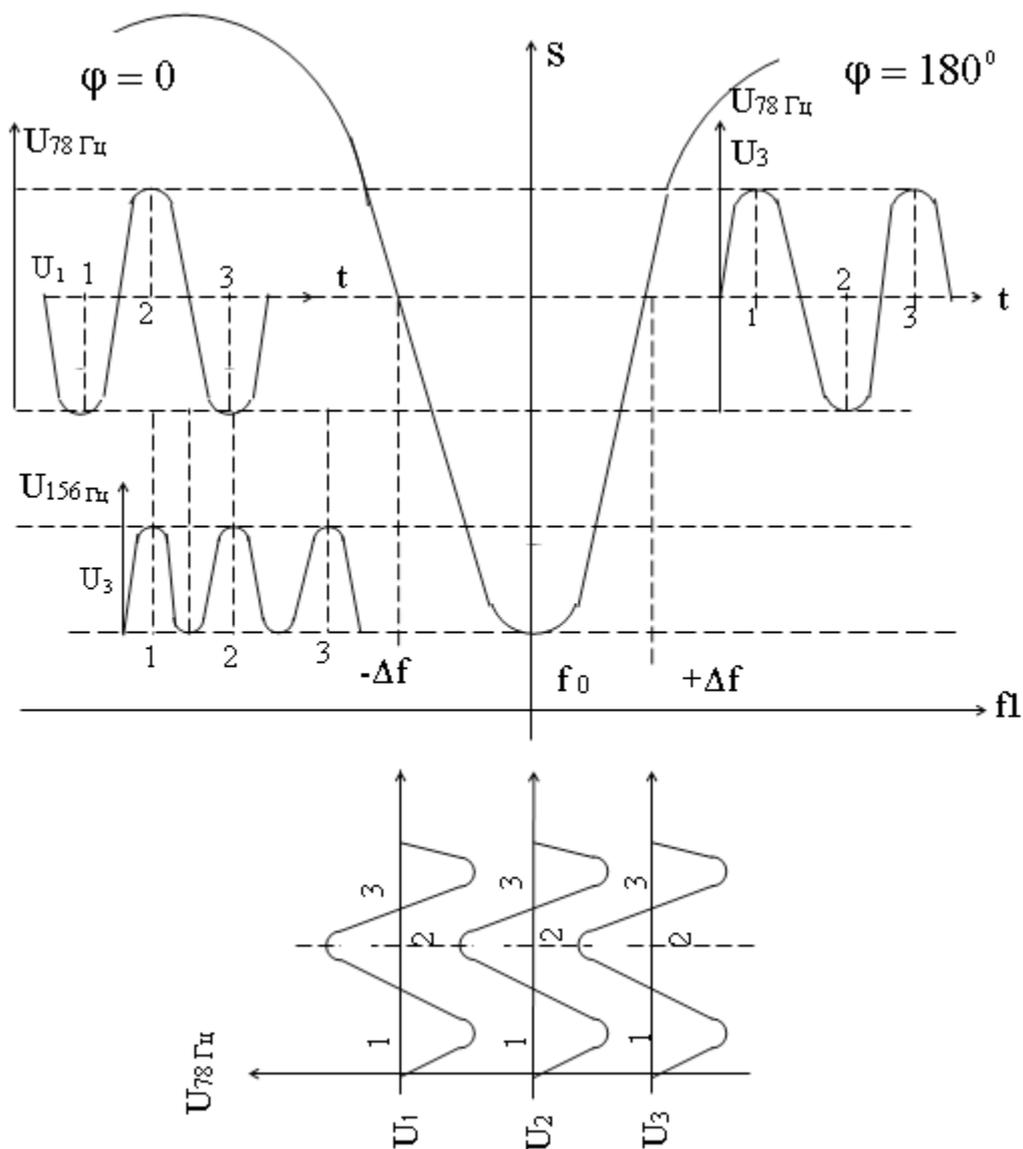


Рис. 2. Характеристика радиочастотного поглощения

Литература:

1. Басевич, А. Б. Применение в аппаратуре систем единого времени квантовых стандартов частоты. СПб: ОАО «РИРВ», 2014. 70 с.
2. Басевич, А. Б. Стандарт частоты: Руководство по эксплуатации. СПб: ОАО «РИРВ», 2005. 61 с.
3. Геворкян, А. Г. Квантовый стандарт частоты: Эскизный проект. СПб: ОАО «РИРВ», 1990. 47 с.

## Модель гравитационного поля планеты в системе гравитирующих стержней

Хромова Ирина Викторовна, студент  
Санкт-Петербургский государственный университет

Моделирование внешнего гравитационного поля Земли важно для вычисления траекторий естественных и искусственных тел. Простейшую модель центрального поля шара построил Ньютон. Учет несферичности Земли привел к использованию разложения потенциала по сферическим функциям. Значения параметров разложения приближенно определяются по наблюдениям Луны, ИСЗ и по гравиметрическим и геодезическим измерениям. Известный набор значений получил название «Стандартная Земля». Перечисленные сведения можно найти в книге Аксенова Е. П. [1]. Хорошее приближение дает модель двух неподвижных центров [1]. Обобщением является построение системы из многих материальных точек [5]. В нашей задаче используется модель из нескольких гравитирующих стержней, жестко связанных с Землей [4], а также модели, состоящие из «зубцов» и из «кочек». Введем геоцентрическую цилиндрическую систему координат  $R, \theta, z$ . Ось  $z$  направим вдоль оси вращения Земли. Перейдем к безразмерным величинам. Для этого введем новую систему единиц. Пусть одна единица длины — 6371 км, единица массы —  $5,9726 \cdot 10^{24}$  кг, гравитационная постоянная  $G = 1$ . На этой оси поместим набор симметричных относительно начала СК однородных бесконечно тонких стержней, уместающихся на отрезке  $[-1, 1]$ . Плотность каждого стержня равна  $\mu_k$ . Полагаем, что концы отрезка находятся внутри Земли.

### Постановка задачи

Будем строить варианты моделей с одинаковой безразмерной массой, равной единице, которые помещаются в сферу единичного радиуса. Вариант модели обозначим  $M(S, D, N)$ . Параметр  $S \in \{\text{point}, \text{segment}(s), \text{point} \& \text{segment}(s)\}$  описывает структуру — дискретная модель из материальных точек, из кусочно-непрерывных стержней, из точек и стержней соответственно. При этом гладкость линейной плотности стержней  $\mu(\mathbf{u})$ ,  $\mathbf{u} \in \{\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}\}$  может быть различной — на концах стержней может испытывать скачок сама плотность и/или ее производная, а могут быть непрерывны и плотность и производная (случаи пенька  $s = 0$ , зубца  $s = 1$ , кочки  $s = 2$ ).  $D = 1, 2, 3$  означает размерность модели, то есть количество осей, на которых расположены точки и стержни.  $N$  — это число элементов модели. Массы, размеры элементов также могут различаться. Простейшим случаем является модель  $M(\text{point}, 1, 1)$ , состоящая из одной материальной точки.

Введем декартову систему координат  $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$  с началом в центре масс системы. Размазав модель равномерно по оси  $\mathbf{z}$ , получим варианты  $M(\text{segment}(s), 1, 1)$  с пеньком либо с зубцом, либо с кочкой. Далее, добавляя распределения масс вдоль осей  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{y}$  получим варианты  $M(\text{point}, 2, N)$ ,  $M(\text{point}, 3, N)$ ,  $M(\text{segment}(s), 2, N)$ ,  $M(\text{segment}(s), 3, N)$ . Аналогично можно поступить с вариантами  $M(\text{point} \& \text{segment}(s), D, N)$ , располагая попеременно точки и стержни. Ограничимся моделями с зеркальной симметрией относительно плоскости  $\mathbf{z} = 0$ , но при этом будем строить модели с ротационной симметрией. В этом случае можно рассматривать вращение системы.

Введем новую характеристику гравитационного поля системы — квазикруговую скорость (ККС)  $W$  с помощью скалярного произведения:

$$W^2(\mathbf{r}) = -\mathbf{r} \cdot \nabla \Phi(\mathbf{r}), \mathbf{r} = (\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})^T.$$

В системе с ротационной симметрией относительно оси  $\mathbf{z}$  и зеркальной симметрией она совпадает с обычной круговой скоростью  $V(R)$  при  $\mathbf{z} = 0$ :

$$V^2(R) = -R \left. \frac{\partial \Phi(R, z)}{\partial R} \right|_{z=0}, R = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Нужно построить для рассматриваемого потенциала  $\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  изолинии ККС в трех координатных плоскостях — экваториальной  $\mathbf{z} = 0$  и двух меридиональных —  $\mathbf{x} = 0$  и  $\mathbf{y} = 0$ . В случае сферической модели все изолинии будут окружностями.

### Типы рассматриваемых распределений масс:

1. Разрывное кусочно-постоянное распределение
2. Непрерывное кусочно-линейное пилообразное распределение

Построим кусочно-линейное распределение масс, график которого имеет пилообразный вид. Расположим нечетное количество зубцов  $p$  симметрично относительно начала СК на оси  $z$ . Зубцы образуют равнобедренные треугольники с основаниями  $2h_k$  и высотой  $1/h_k$ , где  $k$  — номер зубца. Зубцу приписываем массу  $m_k$  [4]. Считаем, что зубцы не пересекаются друг с другом, а крайние зубцы не выходят за интервал  $[-1, 1]$ .

3. Гладкое кусочно-параболическое распределение

Построим гладкое кусочно-параболическое распределение, график которого имеет вид «кочек». Функция плотности одного элемента состоит из 3 частей, каждая из которых является частью параболы. Масса «кочки» равна  $m_k$ , основание  $2h_k$ , середину основания обозначим  $z_k$ .

При  $h_k \rightarrow 0$  получаем дельта-функцию, которая отображает точечную массу величиной  $m_k$ . Положение материальной точки совпадает с координатой  $z_k$ .

**Гравитационное поле**

Введем новую характеристику гравитационного поля системы — квазикруговую скорость (ККС). Рассмотрим изолинии ККС для каждого вида потенциала. ККС  $W$  вводим с помощью скалярного произведения:

$$W^2(\mathbf{r}) = -\mathbf{r} \cdot \nabla\Phi(\mathbf{r}), \mathbf{r} = (x, y, z)^T. \tag{1}$$

Это выражение является вириалом. Вириал для системы  $n$  точек массами  $m_i$  имеет вид [6]:

$$\sum_{i=1}^n m_i (x_i \ddot{x}_i + y_i \ddot{y}_i + z_i \ddot{z}_i). \tag{2}$$

Так как  $\Phi$  — потенциал модели, то уравнения движения будут иметь вид:

$$m_i \ddot{x}_i = -\frac{\partial \Phi}{\partial x_i}; m_i \ddot{y}_i = -\frac{\partial \Phi}{\partial y_i}; m_i \ddot{z}_i = -\frac{\partial \Phi}{\partial z_i}. \tag{3}$$

Выразив из (3)  $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$  и подставив в выражение (2), получим выражение (1). Теорема вириала гласит, что усредненная по бесконечному интервалу времени кинетическая энергия механической системы равна усредненному по тому же интервалу вириалу сил. Следовательно, введенная ККС является характеристикой гравитационного поля.

Рассмотрим изолинии ККС для различных моделей. Сначала исследуем модель двух стержней постоянной плотности на оси  $z$  (Рис. 1).

В экваториальной плоскости изолинии будут окружностями, так как влияние стержней одинаковое в любой момент времени, потому что располагаются они на оси  $z$ . Из-за ротационной симметричности модели график изолинии в любой меридиональной плоскости будет одинаковым. Изолинии ККС вытягиваются вдоль оси  $z$ , округляясь по мере отдаления от центра. При изменении типа распределения стержня на зубчатый, изолинии отдаляются от центра (Рис. 2).

Исследуем, как изменение гладкости распределения отразится на виде изолиний. На рис. 3 сравнены две модели — с зубчатым и кочкообразным распределением. Как видно из рисунка, увеличение порядка гладкости отражается незаметно, вид изолиний идентичен.

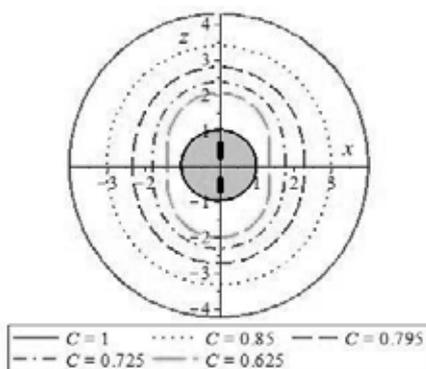


Рис. 1. Изолинии ККС  $M(segment(0), 1, 2)$  в меридиональной плоскости

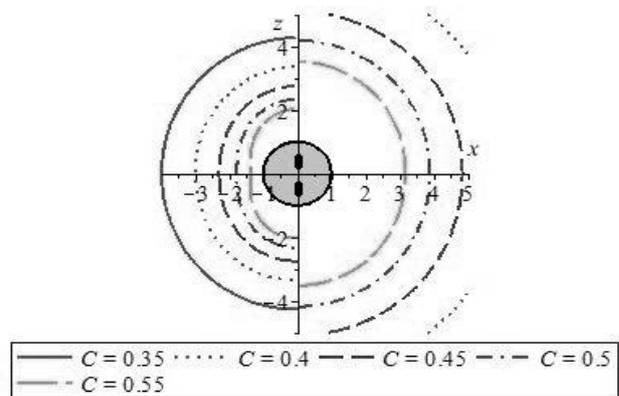


Рис. 2. Изолинии ККС. Слева  $M(segment(0), 1, 2)$ , справа  $M(segment(1), 1, 2)$

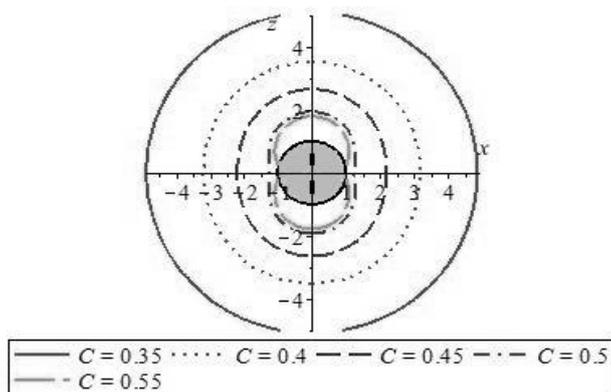


Рис. 3. Изолинии ККС Слева  $M(\text{segment}(1), 1,2)$ , справа  $M(\text{segment}(2), 1,2)$

### Заключение

Предлагаемая модель внешнего гравитационного поля Земли является довольно гибкой благодаря наличию большого числа параметров. Изменяя вид распределения можно достичь хорошего приближения к выражению внешнего потенциала Земли как суммы кеплерова потенциала и возмущающей части.

Модели такого рода можно строить и для других планет Солнечной системы. Значения параметров могут приближенно определяться по известным данным о некоторых планетах.

### Литература:

1. Аксенов, Е. П. Теория движения искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1977. 360 с.
2. Кутузов, С. А. Математическое описание астрономических систем. Учеб. пособие. -СПб.: Изд. СПбГУ, 2004. 244 с.
3. Антонов, В. А., Никифоров И. И., Холшевников К. В. Элементы теории гравитационного потенциала и некоторые случаи его явного выражения. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2008. 208 с.
4. Кодрик, В. В., Кутузов С. А. Моделирование внешнего поля Земли с помощью гравитирующих стержней // Труды XLII международной научной конференции аспирантов и студентов «Процессы управления и устойчивость» / Под ред. А. С. Еремина, Н. В. Смирнова. -СПб, издат. дом СПбГУ, 2011. 588 с. с. 145–150.
5. Антонов, В. А., Тимошкова Е. И., Холшевников К. В. Введение в теорию ньютоновского потенциала. М.: Наука, 1988. 272 с.
6. Огородников, К. Ф. Динамика звездных систем, М: Физматгиз, 1958. 644 с.

## Исследование возможности применения ориентированных массивов углеродных нанотрубок в газоаналитических системах

Чуменко Екатерина Александровна, студент;

Шурыгин Илья Олегович, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе исследовалась возможность применения ориентированных массивов углеродных нанотрубок в газоаналитических системах. Данное исследование является актуальным, учитывая то, что углеродные нанотрубки являются довольно молодым, но достаточно перспективным материалом нанoeлектроники, который обладает рядом уникальных свойств.*

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, метод каталитического пиролиза, блок газоаналитической системы, электрическое сопротивление, газовая среда

Углеродные нанотрубки — удивительные объекты, которые, вероятно, приведут нас к технологической революции в ближайшем будущем, где им предстоит занять такое же место в нашей жизни, какое в настоящее время за-

нимают кремниевые технологии. Космический лифт, привязанный самым прочным из тросов; транспортные средства; приведенные в действие водородом; искусственные мускулы — вот только несколько примеров из тех технологических чудес, которые становятся явью благодаря передовой науке, занимающейся углеродными нанотрубками (УНТ). УНТ обладают уникальными свойствами. «Среди наиболее интересных свойств УНТ в первую очередь следует назвать связь между геометрической структурой нанотрубки и ее электронными характеристиками. В зависимости от угла ориентации графитовой плоскости, составляющей нанотрубку, относительно ее оси (хиральность) нанотрубка может либо обладать металлической проводимостью, либо иметь полупроводниковые свойства. При этом такая важная характеристика электронных свойств полупроводящей нанотрубки, как ширина запрещенной зоны, определяется ее геометрическими параметрами — хиральностью и диаметром. Тем самым углеродные нанотрубки образуют принципиально новый класс электронных приборов рекордно малых размеров. Разработка интегральных схем, включающих в себя элементы на основе УНТ, может привести к революционным изменениям в области миниатюризации современных компьютеров.

Еще одно важное свойство УНТ обусловлено возможностью их заполнения газообразными либо жидкими веществами. Поскольку УНТ является поверхностной структурой, вся её масса заключена в поверхности её слоев. Поэтому УНТ имеют аномально высокую удельную поверхность, что, в свою очередь, определяет особенности их электрохимических и сорбционных характеристик. Расстояние между графитовыми слоями в многослойной углеродной нанотрубке близко к соответствующему значению для кристаллического графита (3,4 нм).

Это расстояние достаточно для того, чтобы внутри УНТ могло разместиться некоторое количество вещества. Тем самым УНТ можно рассматривать как уникальную емкость для хранения веществ, находящихся в газообразном, жидком либо твердом состоянии. В случае, если речь идет о веществе, способном сорбироваться на внутренней поверхности графитового слоя, составляющего нанотрубку, плотность сорбированного вещества может приближаться

к соответствующему значению плотности для конденсированного состояния.

Вещество проникает внутрь нанотрубки под действием внешнего давления либо в результате капиллярного эффекта и удерживается внутри нее благодаря сорбционным силам. При этом графитовая оболочка обеспечивает достаточно хорошую защиту содержащегося в ней материала от внешнего химического либо механического воздействия. Именно это свойство УНТ и стало основополагающим в данной работе.

### 1. Синтез углеродных нанотрубок

Метод синтеза cvd унт заключается в разложении углеводородов до углерода и последующего синтеза углеродных наноструктур на различных носителях (подложках). Установки cvd-синтеза в большинстве своем обладают схожей конструктивной базой. Схема макетной установки унт для исследования процесса синтеза углеродных структур показана на рисунке 1. Основной рабочий объем установки представлен кварцевым реактором (1) длиной от 80 до 100 см, помещенным в термоблок (2). Конструкция оснащена электронным блоком контроля и регулирования температуры нагрева термоблока (3). Термопара (4), фиксированная в непосредственной близости к основной зоне протекания синтеза, позволяет точно оценивать температуру протекающих технологических процессов, а также выявлять некоторые особенности, например, небольшой рост или падение температуры реактора в начале и конце процесса. Следует отметить наличие трапецевидного распределения градиента температуры по длине термоблока: на небольшом участке в начале температура плавно повышается и снижается в конце, а в продолжительной основной зоне, предназначенной для протекания процесса пиролиза углеводородов и синтеза углеродных структур, стабилизируется до заданного значения.

Непосредственно установка химического парофазного синтеза углеродных наноструктур УНТ, которая была использована в данной работе, изображена на рисунке 2.

Процесс можно разделить на несколько этапов. В первой зоне реактора при 100–200°C газ-носитель насы-

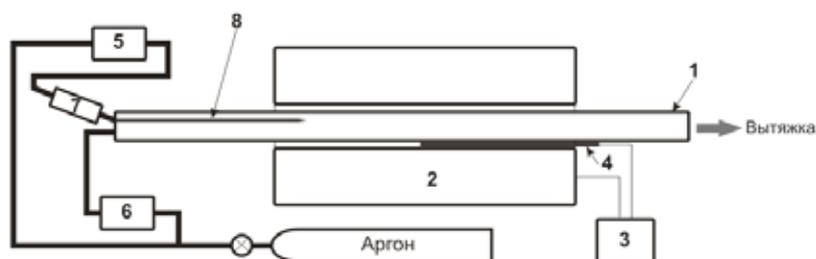


Рис. 1. Схема установки каталитического пиролиза жидких и газообразных углеводородов:

- 1 — кварцевый реактор; 2 — трубчатый нагреватель; 3 — блок управления температурой в рабочей зоне реактора; 4 — термопара; 5 РРГ задания расхода реагента; 6 — РРГ задания расхода газа-носителя; 7 — одноразовый шприц; 8 — игла инжектора

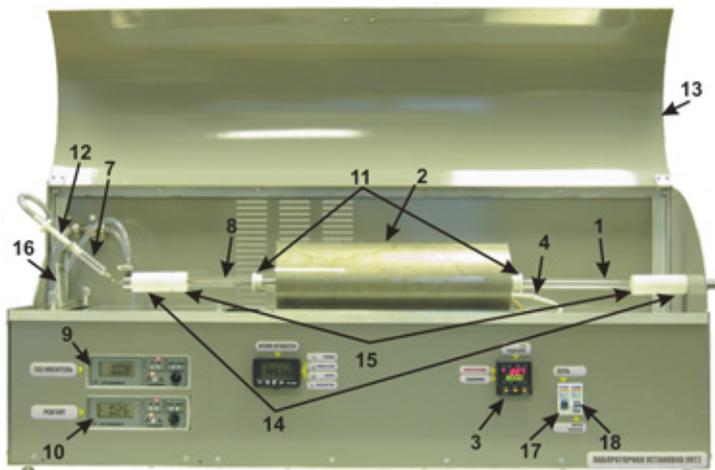


Рис. 2. Внешний вид установки УНТ-2: 9 — блок управления РРГ задания расхода газа-носителя; 10 — блок управления РРГ задания расхода реагента; 11 — втулки для центровки кварцевого реактора; 12 — шток; 13 — защитный экран трубчатого нагревателя; 14 — уплотнители; 15 — шайбы уплотнителя; 16 — держатель шприца; 17 — тумблер сети; 18 — тумблер нагрева

щается реагентами, состоящими из раствора катализатора (металлоорганика) и углеводорода, который, разлагаясь, служит источником углерода для синтеза. Насыщенный реагентами газ поступает во вторую высокотемпературную зону (600–1050 °С), где углеводороды разлагаются до углерода, а катализатор — до металла. В этой зоне непосредственно происходит синтез УНТ.

Во всех опытах температура синтеза равнялась 800 °С. Расход газа-носителя и расход реагента также оставался неизменным и составил 3,0 отн. ед. и 0,15 отн. ед. соответственно. Объём реагента (смесь гексана и ферроцена, доля в растворе которого составляла 1 %) равнялся 2 мл. Температура, до которой охлаждался реактор перед извлечением образцов, равнялась 350 °С. В качестве углеродсодержащего вещества применялся гексан, пиролиз происходил в атмосфере азота. Катализатором выступало железо, образующееся в результате пиролитического разложения ферроцена. Использование ферроцена, обусловлено его относительно невысокой стоимостью, широким распространением во многих технологических процессах и хорошей воспроизводимостью экспериментов по синтезу УНТ. Время протекания CVD-процесса в среднем составляет от 5 до 10 минут. Еще 30–40 минут уходит на остывание реактора.

## 2. Селективный рост массивов УНТ

в первом этапе исследований изучались возможности синтеза в описанном выше реакторе различных углеродных наноструктур, и в первую очередь углеродных нанотрубок. При этом источником углерода служил гексан С<sub>6</sub>H<sub>14</sub> с буферным газом аргоном, а углерод осаждался на поверхность подложки. В качестве материалов подложек использовались чистый монокристаллический кремний и

диоксид кремния, а в качестве катализаторов — частицы железа, входящие в состав ферроцена, который вводился вместе с углеродсодержащим компонентом.

В каждом отдельном случае использования различных подложек в данной установке разнообразие синтезируемых наноструктур оказывается достаточно великим. При этом на подложках осаждается как аморфный углерод и частицы сажи, так и разнообразные углеродные волокна — нанотрубки с различным числом слоев и размерами.

По достижении нужного режима ставился вопрос о селективности роста. Для этого на различные подложки (монокристаллический кремний, диоксид кремния, окись алюминия на кремнии, карбид кремния, методами фотолитографии наносились рисунки из алюминия, меди и фоторезиста.

Результаты селективного роста представлены ниже на рисунках 3, 4, 5.

## 3. Исследование зависимости сопротивления массивов УНТ от изменения температуры в среде инертного газа и в присутствии паров различных органических веществ

Для того чтобы можно было измерить зависимость сопротивления массива УНТ от температуры был разработан и изготовлен блок газоаналитической системы, схема и внешний вид которого представлен на рис. 6 и 7.

Блок представляет собой замкнутый объем из инертного и термостойкого материала (фторопласт), в котором размещен термостол с системой контактных электродов и термопарой.

Чувствительный элемент газоаналитической системы представлял собой кусочек монокристаллического

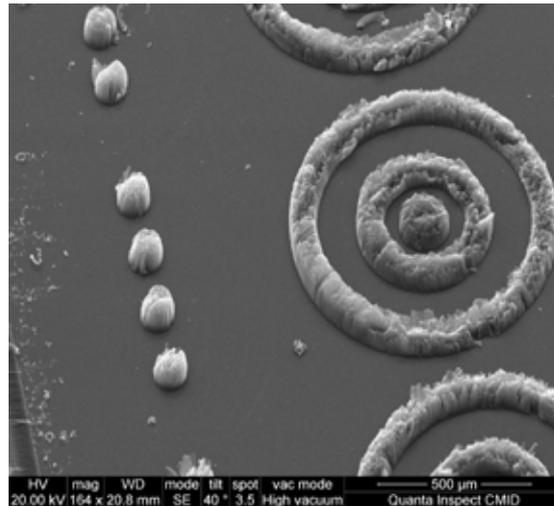


Рис. 3. Выращенный массив УНТ на Si-подложке с фотолитографией

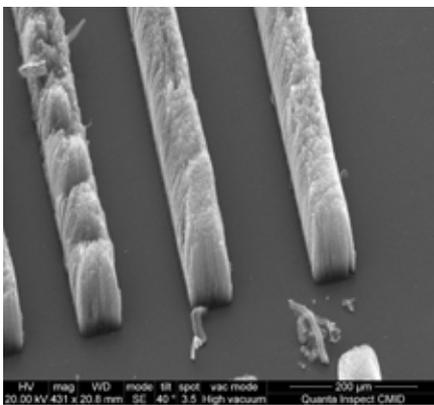


Рис. 4. Выращенный массив УНТ

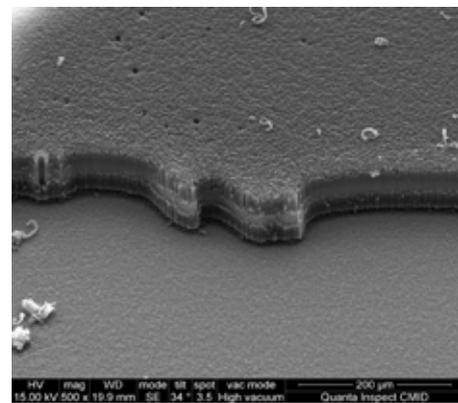


Рис. 5. Si-подложка с выращенным массивом УНТ

кремния прямоугольной формы размером 10x15 мм со слоем термического SiO<sub>2</sub>, на котором были сформированы металлические электроды. Схема структуры представлена на рис. 8, а его фотография на рис. 9.

**Проведение эксперимента.** На первом этапе образец массива нагревался до 220 С в среде инертного газа (азот).

После чего нагрев отключался и проводилось измерение электрического сопротивления массива УНТ при текущей (падающей) температуре через каждые 10 градусов. На втором этапе действия были аналогично первому за исключением того, что в камеру поступали пары различных жидкостей. Жидкости подбирались по критериям классов

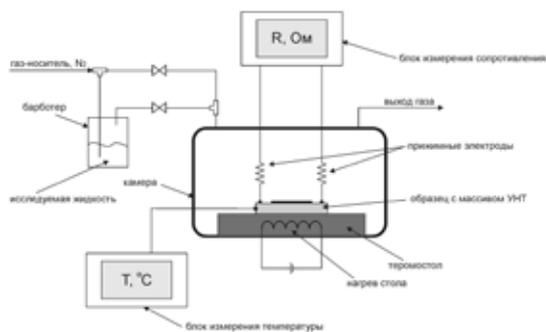


Рис. 6. Схема блока газоаналитической системы

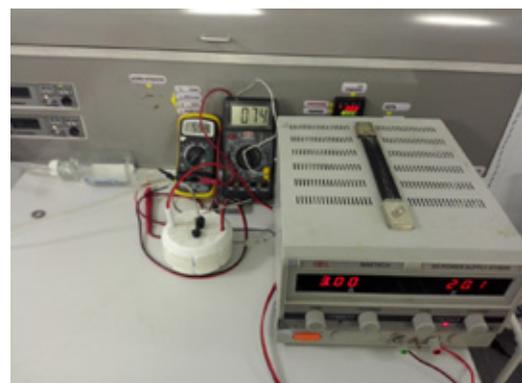


Рис. 7. Блок газоаналитической системы

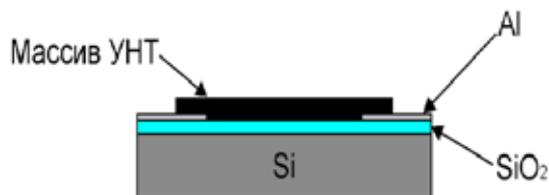


Рис. 8. Схема чувствительного элемента газоаналитической системы

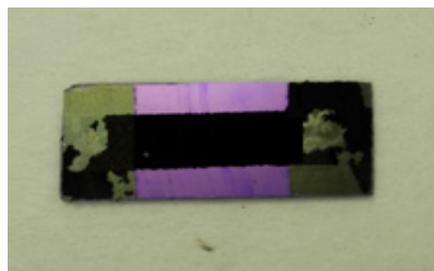


Рис. 9. Фотография чувствительного элемента газоаналитической системы

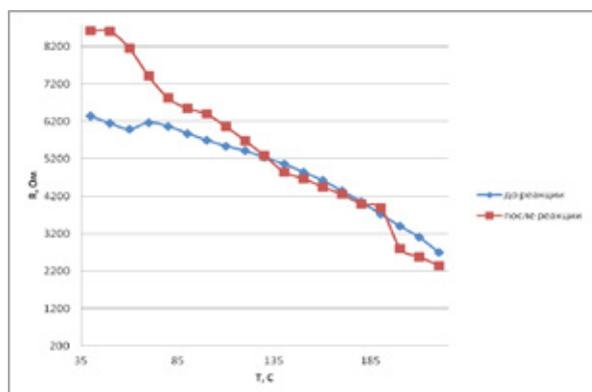


Рис. 10. Зависимость сопротивления массива УНТ от температуры в парах аммиака ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )

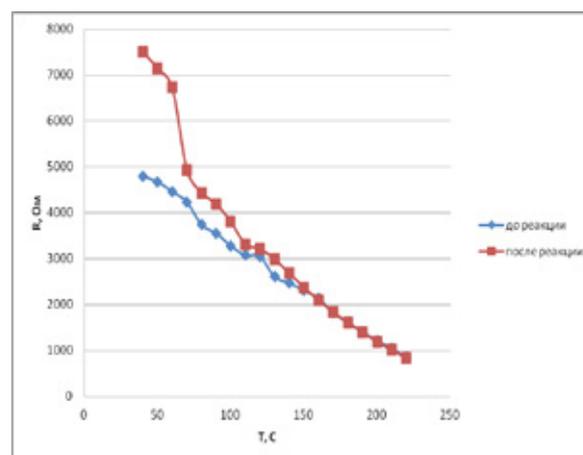


Рис. 11. Зависимость сопротивления массива УНТ от температуры в парах этилацетата ( $\text{CH}_3\text{-COO-CH}_2\text{-CH}_3$ )

соединений и полярности молекул. Исследовалось влияние адсорбции паров: аммиака.

Результаты представлены на графиках 10, 11.

### Заключение

На основании проведенных исследований была установлена зависимость проводимости массива УНТ от температуры в присутствии различных паров органических веществ. Были представлены модели влияния адсорбированных веществ на проводимость УНТ. И на основании анализа полученных данных можно сделать вывод, что упорядоченные массивы УНТ можно использовать, как активные элементы в газочувствительных сенсорах. А при введении математической обработки из данных о изменении проводимости и эталонных кривых можно извлечь

Литература:

1. Елецкий, А. В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства. // УФН. — 2002. — № 2. — 386 с.
2. А. Басаев, В. Галперин, А. Павлов, Ю. Шаман, С. Шаманаев. Особенности синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) и их массивов на установке УНТ-2. [Электронный ресурс] URL: <http://www.nanoindustry.su/journal/article/1866> (Дата обращения: 10.05.2016)

информацию о типе вещества и его концентрации в парах, но решение этих задач не входило в данную работу.

Как видно из представленных графиков наблюдается устойчивая зависимость электрического сопротивления массива УНТ от температуры массива и содержания в атмосфере над массивом паров как органических, так и неорганических веществ. При анализе графиков можно предположить, что именно эффект адсорбции вносит значительный вклад на разность проводимости массива УНТ при одинаковой температуре. Также видно, что на проводимость сильно и по разному влияет, то к какому классу соединений относились пары веществ, а так же, видимо, насколько поляризована молекула. Из графиков так же можно наблюдать, что максимальный эффект наблюдается в районе точки кипения исследуемых паров.

## Анализ радиационной стойкости космических аппаратов связи при проектировании

Шурыгин Илья Олегович, студент;

Чуменко Екатерина Александровна, студент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

*В представленной работе объектами исследования являлись космические аппараты на круговых орбитах.*

**Ключевые слова:** поглощенная доза, космический аппарат, радиационная стойкость, круговая орбита, заряженные частицы, радиационный пояс земли

Одни из первых космических аппаратов несли свою службу всего около года. В настоящее время возникает задача конструирования аппаратов со сроком активного существования 10–15 лет. Такие аппараты в значительной степени могут обеспечить потребности человечества в таких сферах как геология, метеорология, телекоммуникации и телевидения и других. Все современные виды дальней связи (интернет, GPS, связь специального назначения и др.) используют радиоэлектронные системы космических аппаратов (спутников), находящихся в зоне радиационных поясов Земли, аппараты телекоммуникации подвергаются воздействию высокоэнергетических частиц солнечного и галактического излучения. В связи с большой энергией всех компонентов космических лучей (~ МэВ) они обладают высокой проникающей способностью и могут существенно изменить параметры полупроводниковых интегральных схем и привести к отказу систем связи при их длительной работе в космосе. В связи с развитием тенденции импортозамещения и возникла необходимость разработки спутников связи, базирующихся на отечественной электронной базе.

### 1. Особенности функционирования космических аппаратов связи

В зависимости от назначения спутников их запуск производят на различные виды орбит.

#### 1.1 Виды орбит и функционирование спутников.

Орбиты спутников подразделяются на три вида:

1. низкие (до 2000 км от Земли);
2. средние (от 2000 до ~ 36000 км);
3. высокие от 36000.

В первом приближении орбиты спутников делятся на низкие (до 2000 км от Земли), средние (ниже геостационарной орбиты) и высокие. Пилотируемые полеты совершаются не выше 600 км, поскольку космические корабли не должны входить в окружающие нашу планету радиационные пояса. Энергичные протоны внутреннего радиационного пояса создают опасность для жизни космонавтов. Максимальная интенсивность облучения достигается на высоте около 3000 км, которой избегают все космические аппараты. Продолжительность полета должна быть такой, за которую спутник выйдет в заданную точку ста-

ционарной орбиты. Как только аппарат достигнет апогея, опять включаются двигатели для поворота плоскости переходной орбиты и поднятия перигея до высоты стационарной орбиты. Затем двигатели выключаются, и спутник отделяется от ракеты-носителя.

#### 1.2 Влияние солнечной активности.

Влияние солнечной активности на потоки частиц радиационного поля Земли в основном проявляется на низких орбитах космических аппаратов с высотой до 1000 км. С уменьшением солнечной активности поток протонов возрастает и, наоборот, уменьшается с увеличением солнечной активности.

Объяснение этого эффекта связано с эффектом рассеяния захваченных частиц на атомах атмосферы, так как на этих высотах дрейфовые оболочки, по которым движутся захваченные частицы, соприкасаются со слоями верхней атмосферы Земли. При этом захваченные частицы взаимодействуют с атомами атмосферы, рассеиваются на них и выбывают из потока. Эффект рассеяния и, следовательно, уменьшение потока захваченных частиц наиболее заметен в годы максимума солнечной активности, когда происходит наиболее сильное увеличение концентрации атомов атмосферы на конкретной дрейфовой оболочке из-за разогрева атмосферы. Влияние солнечной активности на величину потоков частиц солнечных космических лучей, проявление которых носит дискретный и случайный характер, проявляется в увеличении частоты их появления с увеличением солнечной активности. Поэтому, при одной продолжительности полета вблизи максимума или минимума солнечной активности вероятность появления событий солнечных космических лучей выше во время максимума солнечной активности. При этом следует подчеркнуть, что вероятность появления одного события солнечных космических лучей одинаковой величины от солнечной активности практически не зависит.

#### 1.3 Конструктивные особенности спутников.

Все основные мировые производители создают геостационарные спутники связи и вещания на основе оригинальных унифицированных спутниковых платформ или модулей служебных систем. Унификация и модульность спутниковых платформ позволяет производителю уменьшить расходы на проектирование каждого спутника, обеспечить определённую серийность их производства,

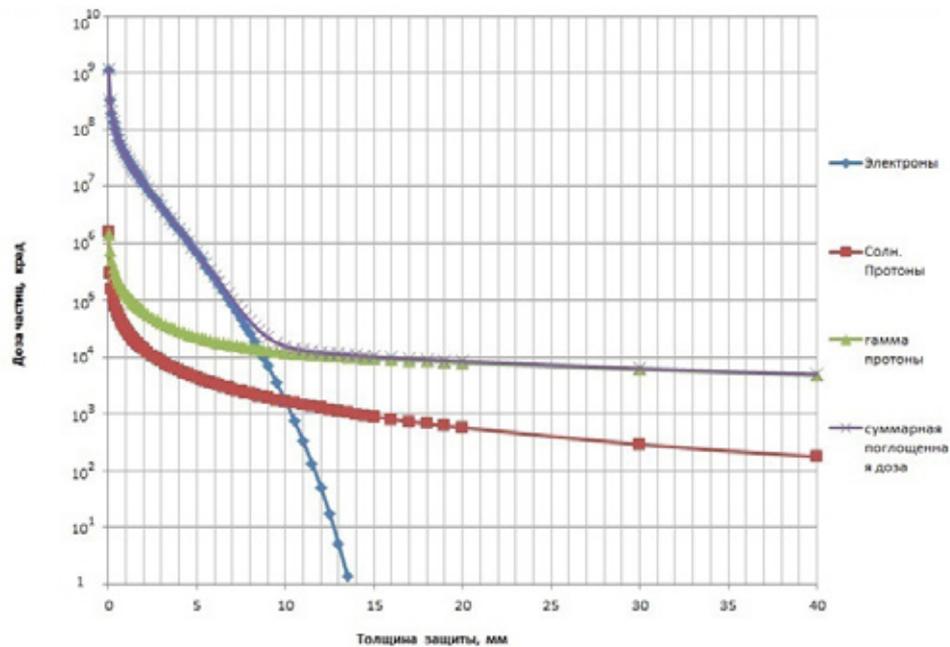


Рис. 1. Поглощенная доза от толщины защиты для круговой орбиты

повысить надежность спутников за счет применения однотипных отработанных на Земле и в космосе бортовых систем и агрегатов, а также сократить время производства, испытаний и сдачи спутника в эксплуатацию на орбите.

## 2. Анализ радиационной стойкости космических аппаратов связи

В качестве объекта исследования был выбран космический аппарат, запускаемый на две орбиты — круговую и геосинхронную. Подобные типы орбит оптимально подходят для запуска аппаратов связи. Диапазон покрытия спутников на круговой орбите позволяет охватить практически все земное пространство, а диапазон спутников на геостационарной позволяет добиться нужного сигнала в заданной области.

Оценка поглощенных доз проводилась с помощью программного пакета OMERE. По результатам моделирования установлено, что при данном сроке активного существования при использовании стандартной толщины защиты 3 мм суммарная поглощенная доза от всех видов излучения на круговой орбите 4395 крэд (рис. 1).

## 3. Моделирование прохождения протонов

С помощью программного пакета SRIM было выяснено, какое количество ионизирующего излучения пройдет сквозь корпус и индивидуальную защиту ЭК космического аппарата, рассчитано, сколько частиц и с какими энергиями проходит при стандартной толщине защиты 3 мм, материал алюминий. На рис. 2 представлена траектория движения протонов с энергией 20 МэВ при прохождении алюминия толщиной 3 мм. Из полученных

результатов видно, что при такой толщине защиты высокоэнергетичные частицы не проходят через материал корпуса, что составляет 93,2%. Однако, оставшаяся доля частиц беспрепятственно проходит через вещество и вполне способно вызвать отказ ЭК. Поэтому необходима разработка индивидуальных защитных экранов для активных электронных компонент, способная в достаточной мере защитить элементы.

В последнее время наиболее эффективными свойствами для защиты обладают структуры (экраны), которые состоят из нескольких слоев. Они дают возможность уменьшить дозовые нагрузки на устройства космического аппарата на несколько порядков. Один из вариантов экрана, состоящий из чередующихся слоев металла. Экран состоит из трех слоев, внешние слои содержат алюминий («легкий» металл), средний слой содержит «тяжелый» металл. Наличие «тяжелого» металла, выбрано исходя из тормозных способностей материалов, которые зависят от их атомного номера. Первый слой защиты уменьшает воздействие частиц с высокими энергиями, но, в то же время, сам является источником тормозного излучения. Слой, расположенный посередине, состоящий из более «тяжелого» металла, уменьшает (хорошо поглощает) тормозное излучение. Последний слой до конца отсекает электроны и ослабляет тормозное излучение, которое испускается из первого слоя. Поэтому было принято решение исследовать трехслойную защиту.

## Заключение

Проведена оценка суммарной поглощенной дозы в зависимости от параметров орбиты и толщины корпуса, а также толщины защитных корпуса блока для активных

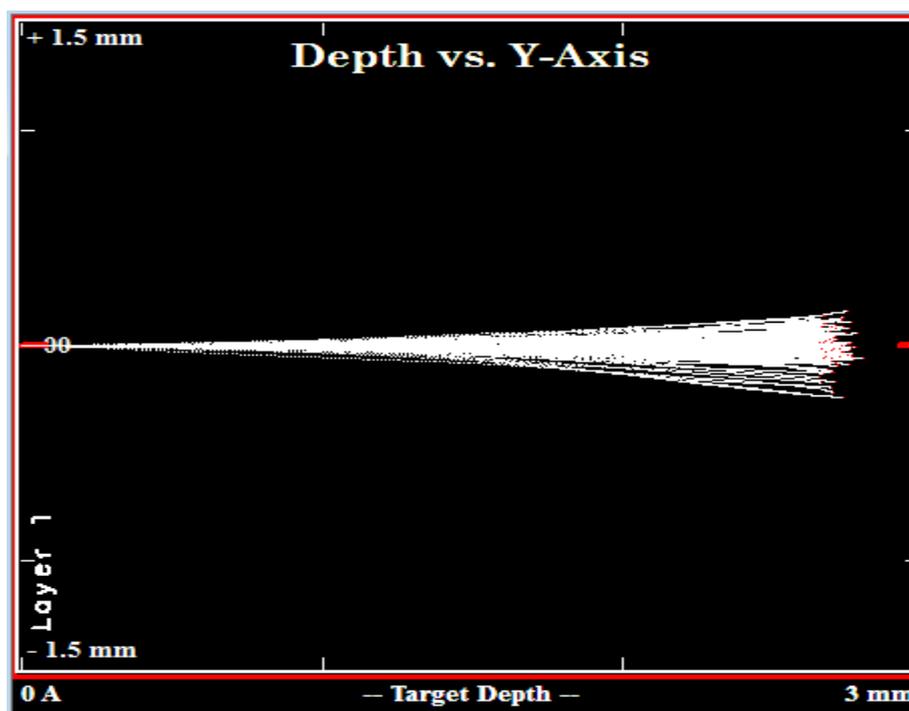


Рис. 2. Стандартная толщина защиты 3 мм, энергия 20 МэВ

ЭК. Получена суммарная поглощенная доза для двух разных орбит: для круговой значение поглощенной дозы составило 4395 крад при использовании толщины защитного экрана 3 мм и сроке активного существования 15 лет. На круговой орбите величина поглощенной дозы выше, т. к. частицы обладают более высокой энергией и проникающей способностью. Был получен график зависи-

мости суммарной поглощенной дозы от толщины защиты (корпуса блока). Из полученных результатов можно сделать вывод, что при стандартной толщине корпуса блока значение поглощенной дозы для не радиационно-стойких компонентов будет не безопасным, поэтому возникает необходимость создания индивидуальных защитных экранов для наиболее уязвимых компонент.

Литература:

1. Орбиты космических аппаратов / GALSPACE. URL: <http://galspace.spb.ru/orbita/17.htm> (дата обращения: 11.05.2016).
2. Мырова, Л. О., Попов В. Д., Верхотуров В. И. Анализ стойкости систем связи к воздействию излучений. М.: Радио и связь, 1993. 268 с.
3. Новиков, Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. М.: Университетская книга, 2010. 192 с.
4. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов / С. С. Полесский, В. И. Жаднов, М. С. Артюхова и др. // Компоненты и технологии. 2010. № 9. с. 93–98.
5. В борьбе с радиацией / Н. С. Василенков, А. И. Максимов, С. А. Грабчиков и др. // Технологии. 2015. № 5. с. 38–41.
6. Орбиты, которые мы выбираем / Вокруг света. URL: <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/6763/> (дата обращения: 07.05.2016).
7. SRIM — The Stopping and Range of Ions in Matter / SRIM. URL: <http://www.srim.org/> (дата обращения: 01.06.2016).

# Молодой ученый

Международный научный журнал  
Выходит два раза в месяц

№ 15 (119) / 2016

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Главный редактор:**

Ахметов И. Г.

**Члены редакционной коллегии:**

Ахметова М. Н.  
Иванова Ю. В.  
Каленский А. В.  
Куташов В. А.  
Лактионов К. С.  
Сараева Н. М.  
Абдрасилов Т. К.  
Авдеюк О. А.  
Айдаров О. Т.  
Алиева Т. И.  
Ахметова В. В.  
Брезгин В. С.  
Данилов О. Е.  
Дёмин А. В.  
Дядюн К. В.  
Желнова К. В.  
Жуйкова Т. П.  
Жураев Х. О.  
Игнатова М. А.  
Калдыбай К. К.  
Кенесов А. А.  
Коварда В. В.  
Комогорцев М. Г.  
Котляров А. В.  
Кузьмина В. М.  
Кучерявенко С. А.  
Лескова Е. В.  
Макеева И. А.  
Матвиенко Е. В.  
Матроскина Т. В.  
Матусевич М. С.  
Мусаева У. А.  
Насимов М. О.  
Паридинова Б. Ж.  
Прончев Г. Б.  
Семахин А. М.  
Сенцов А. Э.  
Сенюшкин Н. С.  
Титова Е. И.  
Ткаченко И. Г.

Фозилов С. Ф.

Яхина А. С.

Ячинова С. Н.

**Международный редакционный совет:**

Айрян З. Г. (Армения)  
Арошидзе П. Л. (Грузия)  
Атаев З. В. (Россия)  
Ахмеденов К. М. (Казахстан)  
Бидова Б. Б. (Россия)  
Борисов В. В. (Украина)  
Велковска Г. Ц. (Болгария)  
Гайич Т. (Сербия)  
Данатаров А. (Туркменистан)  
Данилов А. М. (Россия)  
Демидов А. А. (Россия)  
Досманбетова З. Р. (Казахстан)  
Ешиев А. М. (Кыргызстан)  
Жолдошев С. Т. (Кыргызстан)  
Игисинов Н. С. (Казахстан)  
Кадыров К. Б. (Узбекистан)  
Кайгородов И. Б. (Бразилия)  
Каленский А. В. (Россия)  
Козырева О. А. (Россия)  
Колпак Е. П. (Россия)  
Куташов В. А. (Россия)  
Лю Цзюань (Китай)  
Малес Л. В. (Украина)  
Нагервадзе М. А. (Грузия)  
Прокопьев Н. Я. (Россия)  
Прокофьева М. А. (Казахстан)  
Рахматуллин Р. Ю. (Россия)  
Ребезов М. Б. (Россия)  
Сорока Ю. Г. (Украина)  
Узаков Г. Н. (Узбекистан)  
Хоналиев Н. Х. (Таджикистан)  
Хоссейни А. (Иран)  
Шарипов А. К. (Казахстан)

**Руководитель редакционного отдела:** Кайнова Г. А.

**Ответственные редакторы:** Осянина Е. И., Вейса Л. Н.

**Художник:** Шишков Е. А.

**Верстка:** Бурьянов П. Я., Голубцов М. В., Майер О. В.

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются.

За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.

При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Материалы публикуются в авторской редакции.

**АДРЕС РЕДАКЦИИ:**

**почтовый:** 420126, г. Казань, ул. Амирхана, 10а, а/я 231;

**фактический:** 420029, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25.

E-mail: [info@moluch.ru](mailto:info@moluch.ru); <http://www.moluch.ru/>

**Учредитель и издатель:**

ООО «Издательство Молодой ученый»

ISSN 2072-0297

Подписано в печать 27.08.2016. Тираж 500 экз.

Отпечатано в типографии издательства «Молодой ученый», 420029, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, 25