

## СЕКЦИЯ 11

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Председатель – д.т.н., проф. А.И.ТИХОНОВ*  
*Секретарь – к.ф.-м.н., доцент М.А.СОЛУНИН*

*П.В. Лылов, студ.; рук. И.А. Крылов, к.т.н., доц.;*  
*В.Х. Костюк, к.ф.-м.н., доц.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МЕТАЛЛОВ

Одной из основных задач лабораторной работы «ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА И ПОЛУПРОВОДНИКА» является сравнение теоретических моделей, объясняющих зависимость сопротивлений металла и полупроводника от температуры, с результатами эксперимента. Проведение экспериментальной проверки моделей проводится на специальном стенде. Графическое представление полученных зависимостей и определение параметров полупроводника (ширины запрещенной зоны полупроводника  $E_g$ ) и металла (температурного коэффициента сопротивления металла  $\beta_T$ ) выполняется студентами самостоятельно обычными способами. Процесс обработки экспериментальных данных занимает длительное время и может приводить к ошибкам, так, что его приходится повторять.

Не надо доказывать важность правильной обработки и грамотного представления результатов на графиках. Поэтому проведение вычислительного эксперимента поможет разобраться в причинах ошибок и правильно оценить результаты эксперимента. Обработка данных может быть многократно повторена, можно менять параметры опыта. Интересно сначала получить результаты вычислительного эксперимента, а потом сравнить их с реальными значениями. В ходе такой работы можно понять ошибки процесса вычислений. Обработка данных

может проводиться статистическими методами (в данной работе применяется метод наименьших квадратов).

Для проведения вычислительного эксперимента задаются начальные условия: температура начала и конца опыта, шаг по температуре. Включается «нагрев». В соответствии с условиями опыта строятся кривые  $R_m(t)$  и  $R_p(t)$  на одной координатной сетке и зависимости  $\ln R_p(1/T)$  на другой. Программа может обрабатывать любое количество данных. Минимальное число точек – 10. На экран также выводятся таблицы экспериментальных данных.

Программа может работать и в другом режиме. Для этого требуется ввести данные конкретного опыта и дать команду их обработать.

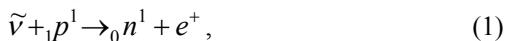
Применение вычислительного эксперимента делает наглядным сами результаты опыта и его обработку, исключает ошибки при проведении расчетов.

*А.А. Орлов, студ.; рук. А.Н. Алентьев, к.ф.-м.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ, ПО РЕГИСТРАЦИИ АНТИНЕЙТРИНО**

Диагностика процессов, протекающих в ядерном реакторе атомных электростанций (АЭС) чрезвычайно важна для своевременной коррекции режима работы ядерного реактора (ЯР). Наряду с традиционными методами в данной работе предлагается проводить диагностику по результатам регистрации антинейтрино. Ядерный реактор современных мощных атомных электростанций излучает антинейтрино с очень высокой плотностью потока  $\Phi \sim 10^{20}$  частиц/(см<sup>2</sup>·с). Несмотря на исключительно малое эффективное сечение взаимодействия антинейтрино ( $\tilde{\nu}$ ) с веществом ( $y \sim 10^{-43}$  см<sup>2</sup>) высокое значение плотности потока позволяет надёжно регистрировать названные частицы. Разработанная функциональная схема экспериментальной установки для регистрации антинейтрино ЯР представлена на рис. 1.

Устройство детектора антинейтрино Д состоит из трёх ёмкостей. Первая и третья (С1, С2) с размерами (2Ч2Ч0,6) м<sup>3</sup> заполнены жидким сцинтиллятором. Третья ёмкость М1 (мишень для  $\tilde{\nu}$ ) (2Ч2Ч0,1) м<sup>3</sup> заполнена водным раствором соли кадмия. В этой ёмкости происходит взаимодействие антинейтрино с протоном мишени по схеме:



где  ${}_0n^1$  – нейтрон,  $e^+$  – позитрон.

Позитрон через время  $t \sim 10^{-11}$  с аннигилирует с электроном среды по схеме

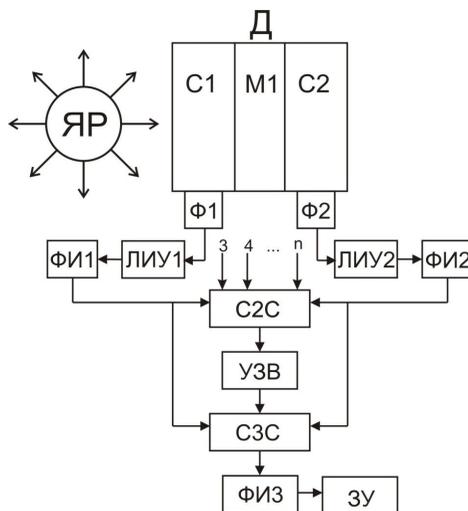


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для регистрации антинейтрино ядерного реактора АЭС

Гамма-кванты, энергия каждого из которых равна 0,511 МэВ, вызывают посредством Комптона-эффекта первый импульс люминесцентного свечения сцинтиллятора. Свет люминесценции регистрируется фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) Ф1, Ф2 и соответственно возникают импульсы напряжения на выходах Ф1, Ф2, которые подаются на линейные импульсные усилители ЛИУ1, ЛИУ2 и формируются по амплитуде и длительности с помощью формирователей ФИ1, ФИ2. Сформированные импульсы подаются на схему двойных совпадений С2С и тройных совпадений С3С. Импульс с выхода С2С через устройство задержки времени УЗВ подается на С3С. Названный импульс задерживается на время диффузии нейтрона (1). По истечении времени диффузии происходит захват  ${}_0n^1$  ядром кадмия  ${}_{48}\text{Cd}^{112}$  по схеме:



где  $({}_{48}\text{Cd}^{113})^*$  – ядро кадмия в возбуждённом состоянии.

Гамма-кванты (3) с суммарной энергией  $E = 9,1$  МэВ вызывают второй импульс света люминесценции, и соответственно возникнут импульсы напряжения на выходе Ф1, Ф2. События (2), (3) фиксируются схемой тройных совпадений СЗС. Импульс с выхода СЗС подаётся на формирователь ФИ. Сформированный импульс подаётся на запоминающее устройство ЗУ.

В реальном эксперименте число ФЭУ, включаемых на совпадение, может достигать нескольких десятков, что существенно повысит эффективность регистрации  $\tilde{\nu}$  и практически исключит регистрацию импульсов иного происхождения. В этом случае СЗС будет схемой  $n$ -кратных совпадений.

Таким способом отобранные импульсы позволяют с высокой вероятностью регистрировать процессы (1) – (3). При  $\Phi \sim 10^{15}$  частиц/(см<sup>2</sup>·с) и  $y \sim 10^{-43}$  см<sup>2</sup> ожидается число зарегистрированных антинейтрино  $N_{\tilde{\nu}} \sim 10^2$  частиц/час. Ожидаемые статистически значимые результаты эксперимента позволят получить дополнительные сведения о сложных динамических процессах, протекающих в ЯР, что может служить дополнительным (к традиционным) бесконтактным способом контроля режима работы ядерного реактора.

*С.А. Кононов, А.А. Рябинин, студенты;  
рук. М.В. Дмитриев, к.т.н., доц.; Г.А. Шмелева, к.п.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА К ТОКУ**

Одной из важнейших характеристик баллистического гальванометра является его динамическая постоянная, определяющая вместе с баллистической постоянной область применения этого прибора. С введением в лабораторный практикум гальванометра М95 встала задача определения этой постоянной.

Динамическая постоянная зависит от числа витков рамки, площади витка, модуля кручения нити подвеса и индукции магнитного поля в зазоре постоянного магнита; измерение этих величин на конкретном приборе весьма непростая задача. В то же время чувствительность гальванометра к току, являющаяся величиной обратной динамической

постоянной, измерить достаточно просто. Для этого собирается схема измерения (рис. 1).

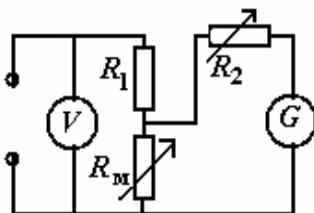


Рис. 1. Измерительная схема

На схему подается напряжение 0,5 – 0,8 В от регулируемого источника постоянного тока. Резистор  $R_1$  –сопротивлением 9 кОм,  $R_m$  – одна часть магазина сопротивлений (1 – 50 Ом), резистор  $R_2$  – другая часть магазина сопротивлений (1 – 999 Ом). Ток в цепи гальванометра, как легко видеть из схемы, определяется следующим приближенным выражением:

$$I_g = \left( V \frac{R_m}{R_1} \right) \left( \frac{1}{R_2 + R_g} \right),$$

где  $R_g$  - внутреннее сопротивление гальванометра, которое известно из паспорта прибора, или же измеряется с помощью этой же схемы. Чувствительность к току определяется формуле

$$S_i = N/I_g,$$

где –  $N$  деление шкалы гальванометра, соответствующее току  $I_g$ . Измерения производятся для пяти точек шкалы гальванометра и по этим результатам определяется среднее значение чувствительности к току. Затем рассчитывается динамическая постоянная.

*И.В. Косяк, Д.В. Хуснуллин, студенты;  
рук. Н.Г. Демьянцева, ст. преп.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РОЛЬ УЧЕБНЫХ ФИЛЬМОВ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

Современные информационные технологии, в том числе мультимедиа, открывают студентам доступ к нетрадиционным источникам ин-

формации, позволяют реализовать принципиально новые формы и методы обучения.

Использование в процессе обучения видеоматериалов и мультимедийных презентаций способствует улучшению усвоения учебного материала; уменьшению времени решения стандартных задач; улучшению поведенческого, эмоционального, положительного отношения к изучаемым предметам.

Технология мультимедиа позволяет реализовать большинство методов обучения, способно во многих случаях усовершенствовать или даже частично заменить в учебном процессе такие классические методы обучения, как метод устного изложения учебного материала (лекция, рассказ, объяснение и др.).

Некоторые зарубежные ученые утверждают, что внедрение мультимедиа в образование должно идти на основе того опыта, который уже накоплен в результате применения традиционных технических средств в учебном процессе вуза.

Сочетание комментариев преподавателя с видеoinформацией или анимацией значительно активизирует внимание студентов к содержанию излагаемого преподавателем учебного материала и повышает интерес к новой теме. Обучение становится занимательным и эмоциональным, принося эстетическое удовлетворение и повышая качество излагаемой преподавателем информации. При этом существенно изменяется роль преподавателя в учебном процессе. Преподаватель эффективнее использует учебное время, сосредоточив внимание на обсуждении наиболее сложных фрагментов учебного материала.

В связи с актуальностью данной темы на кафедре физике создан банк учебных фильмов, видео-лекций, демонстраций физических опытов по всем разделам общей физике. Данный материал может использоваться преподавателями на лекциях и лабораторных работах, студентами при самостоятельной подготовке к занятиям и экзаменам.

*И.А. Корнев, асп.; рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Программы для моделирования физических процессов используют некоторую расчётную базу, созданную либо для конкретной предметной области, либо несущую более универсальный характер. Так, для моделирования электрических и электромеханических процессов не-

обходимо использовать специфическое программное обеспечение, берущее на себя все вычисления, в частности, матричные операции и функции численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Таким образом, стоит задача создания универсальной динамической библиотеки, способной интегрироваться с открытыми и вновь разрабатываемыми приложениями, поставляя в них функции формализации электрической цепи, а также методы обработки и решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, к которой сводится задача моделирования динамических режимов электрической цепи.

Разрабатываемая библиотека ориентирована на задачи электромеханики, поэтому она позволяет работать как с электрическими цепями, та и с каскадами электромеханических устройств, под которыми понимаются несколько устройств на одном валу. Расчётная библиотека не предусматривает работу с визуальными изображениями моделируемых устройств – эти функции берёт на себя прикладная программа, использующая данную библиотеку.

Для моделирования аналоговых цепей любой сложности достаточно пяти элементов: сопротивления, индуктивность, электроёмкость, источника тока и источника напряжения. Все реальные устройства представляются схемами замещения, состоящими из этих пяти базовых элементов, а также в некоторых случаях еще и матриц взаимных индуктивностей.

В основу математического аппарата разрабатываемой библиотеки положены теоретические основы, изложенные в [1]. Так или иначе, все математические модели по расчёту электрических цепей базируются на правилах Кирхгофа, но имеют свои отличительные особенности. Существует метод узловых потенциалов, метод сечений, метод контурных токов и другие. Наиболее эффективным для расчёта переходных процессов в цепях, содержащих полный набор базовых элементов, считается метод смешанных величин, строящийся на основе комбинации метода сечений и метода контурных токов. При этом для каждой ветви электрической цепи рассчитывается зависимость тока или напряжения от времени.

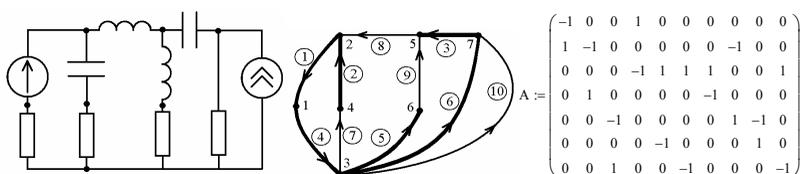


Рис 1. Формирование матрицы соединений

За построение исходной электрической цепи (рис. 1) отвечает базовое приложение, в которое внедрена разработанная математическая библиотека. Это может быть виртуальный лабораторный стенд [2], позволяющий в интерактивном режиме построить визуальную модель электрической цепи, или программный код, генерирующий модель электрической цепи в пакетном режиме по заданной программе. В обоих случаях библиотека предоставляет для генерации математической модели электрической цепи полный набор функций, позволяющих построить граф электрической цепи, из которого выделяется остов, а затем строится матрица соединений, обработка которой по методу переменных состояния позволяет получить систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамические режимы электрической цепи.

Ветви графа, характеризующиеся напряжением, ёмкостью или сопротивлением называются *z*-ветвями (берётся в расчёт сопротивление ветви), а ветви, которые содержат источники тока и катушки индуктивности – *y*-ветвями (берётся в расчёт проводимость).

В остов входят все источники напряжения, и стараются включить наибольшее количество электроемкостей. Оставшиеся ветви остова, при невозможности построения только из заданных элементов включают в себя сопротивления и индуктивности. Ветви остова называются собственно ветвями, остальные ветви графа, не вошедшие в остов, называются связями. Для узлов графа, к которому подходит всего одна ветвь остова и любое количество связей, строится уравнение по методу сечений (сечение окружает данный узел, пересекая только одну ветвь остова). Для контуров графа, в который входит только одна связь, строится уравнение по методу контурных токов.

Имея матрицу соединений **A** (рис. 1), можно получить матрицы сечений и контуров.

Предварительно исключив из матрицы **A** последнюю строку, которая несёт избыточную информацию, можно представить **A** в виде

$$\mathbf{A} = [ \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 ], \quad (1)$$

где матрица **A**<sub>1</sub> описывает остов графа, а **A**<sub>2</sub> описывает оставшиеся связи графа. Матрица контуров **D** имеет структуру

$$\mathbf{D} = [ \mathbf{1} \mathbf{D}_2 ], \quad (2)$$

где **D**<sub>2</sub> получается из матрицы **A**:

$$\mathbf{D}_2 = \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{A}_2. \quad (3)$$

Матрицу  $\mathbf{D}$  в расширенном виде можно представить как:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{D}_{2yy} & \mathbf{D}_{2zy} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{D}_{2zz} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{D}_{2yy}$  – матрица, соответствующая у-связям, которые пересекаются сечениями, соответствующими у-ветвям дерева;  $\mathbf{D}_{2zy}$  – матрица, соответствующая z-связям, которые пересекаются сечениями, соответствующими у-ветвям дерева;  $\mathbf{D}_{2zz}$  – матрица, соответствующая z-связям, которые пересекаются сечениями, соответствующими z-ветвям дерева.

Матрица сечений  $\mathbf{C}$  получается как:

$$\mathbf{C} = [-\mathbf{D}_2^t \mathbf{1}] \quad (5)$$

и в развёрнутом виде имеет структуру:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{yy} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_{zy} & \mathbf{F}_{zz} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{F}_{yy}$  – матрица, соответствующая у-ветвям дерева, которые входят в состав контуров, построенных от у-связей графа;  $\mathbf{F}_{zy}$  – матрица, соответствующая у-ветвям дерева, которые входят в контуры, образованные z-связями;  $\mathbf{F}_{zz}$  – матрица, соответствующая z-ветвям дерева, которые входят в контуры, образованные z-связями.

Таким образом, можем построить систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}_y \mathbf{Y}_y \mathbf{D}_y^t & -\mathbf{F}_{zy}^t \\ \mathbf{F}_{zy} & \mathbf{C}_z \mathbf{Z}_z \mathbf{C}_z^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_y \\ \mathbf{I}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где матрицы  $\mathbf{Y}$  и  $\mathbf{Z}$  являются матрицами переходных проводимостей и сопротивлений.

Некоторые проводимости и сопротивления содержат дифференциальный оператор  $p = \frac{d}{dt}$ , например,  $Z(p) = Lp$  и  $Y(p) = \frac{1}{Cp}$ . Выражая эти элементы из системы уравнений (7), приводим ее к каноническому виду Коши:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{X} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{X}$  – вектор неизвестных (мгновенные токи для уравнений, построенных по методу контурных токов, и мгновенные напряжения для

уравнений, построенных по методу сечений);  $\mathbf{M}$  – квадратная матрица коэффициентов;  $\mathbf{F}$  – вектор правых частей.

Следует отметить, что при отсутствии взаимных индуктивностей матрица  $\mathbf{M}$  имеет диагональную структуру. При наличии взаимных индуктивностей (например, при моделировании электрических машин) в ней появляются недиагональные элементы, расчет которых осуществляется в соответствии с теорией тех устройств, которые поставляют в электрическую цепь взаимные индуктивности.

Интегрирование системы уравнений (8) осуществляется с использованием метода Эйлера или метода Рунге-Кутты. Расчет осуществляется особой функцией библиотеки, которая осуществляют всего один шаг расчета, возвращая после этого рассчитанные значения токов и напряжений в ветвях в вызывающее приложение. Именно вызывающее приложение отвечает за организацию непрерывного расчетного цикла по времени. Это позволяет организовать расчетный процесс с обработкой его результатов в реальном времени средствами базового приложения, в качестве которого зачастую удобно использовать какой-либо математический процессор (например, MatLab или Excel), обеспечивающий пользователя богатым набором средств обработки численных массивов данных.

#### Библиографический список

1. **Нейман Л.Р.**, Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – Т. 1. – 536 с.
2. **Тихонов А.И.** Разработка моделей и методов анализа и синтеза решений в автоматизированном проектировании электромеханических устройств. Диссертация на соиск. уч. ст. д.т.н., специальность 05.13.12. – Системы автоматизации проектирования (электротехника и энергетика), Иваново, 2007г.

*Д.М. Севрюгов, асп.; рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

### МОДЕЛЬ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Одной из типичных задач, решаемых с использованием метода Монте-Карло, является задача расчета теплового поля. В [1] приведена имитационная модель на основе метода Монте-Карло, позволяющая рассчитывать процессы теплопередачи в твердых телах. При этом теп-

лообмен между поверхностью твердого тела с температурой  $\mathcal{G}_n$  и охлаждающей средой с температурой  $\mathcal{G}_{охл}$  описывается законом:

$$q_{mo} = \alpha(\mathcal{G}_n - \mathcal{G}_{охл}), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности.

Следующей задачей в плане моделирования тепловых полей методом Монте-Карло является задача имитации процессов теплопередачи в жидкой и газообразной среде, в частности, в идеальном газе.

Математическая модель на основе метода Монте-Карло строится путем наблюдения за ансамблем объектов, поведение которых задается статистическими правилами, основанными на объективных физических законах. В частности, это могут быть частицы, являющиеся прообразом молекул идеального газа, движение которых описывается законами механики в соответствии с молекулярно-кинетическими представлениями о природе вещества. Каждая  $i$ -я частица обладает массой  $m'_{oi}$  и движется в объеме с заданной формой со скоростью  $\bar{v}'_i$ . Связь с реальной массой молекулы газа  $m_{oi}$  и ее скоростью  $\bar{v}_i$  задается с помощью масштабов подобия по массе молекулы и скорости

$$m_m = \frac{m'_{oi}}{m_{oi}}, \quad m_v = \frac{v'_i}{v_i} = \frac{m_l}{m_t}, \quad (2)$$

где  $m_l$  и  $m_t$  – масштабы по пространству и времени; штрихованные величины соответствуют модели, нештрихованные – оригиналу.

В качестве независимых масштабов подобия модели термодинамической системы используются масштабы  $m_m$ ,  $m_l$  и  $m_t$ , а также масштабы по количеству молекул  $m_N = N' / N$  и по эффективному диаметру молекул  $m_d = d' / d$ . Здесь  $N'$  и  $N$  – соответственно количество частиц модели и молекул газа в моделируемой термодинамической системе (ТДС);  $d'$  и  $d$  – соответственно произвольно задаваемый диаметр частицы модели и эффективный диаметр молекулы газа ТДС.

Зависимые масштабы рассчитываются по формулам:

- масштаб по скорости по (2);
- по объему  $V$

$$m_v = \frac{V'}{V} = m_l^3; \quad (3)$$

- по концентрации молекул  $n$

$$m_n = \frac{n'}{n} = \frac{N'}{V'n} = \frac{m_N N}{m_l^3 V n} = \frac{m_N}{m_l^3}; \quad (4)$$

- по давлению  $p$

$$m_p = \frac{p'}{p} = \frac{\frac{1}{3} n' m'_0 \langle v'^2 \rangle}{p} = \frac{m_n m_m m_v^2 \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle}{p} =$$

$$= \frac{m_N}{m_l^3} m_m \frac{m_l^2}{m_t^2} \frac{1}{3} \frac{n m_0 \langle v^2 \rangle}{p} = \frac{m_N m_m}{m_l m_t^2},$$

$$\text{где } \langle v'^2 \rangle = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} v'^2_{xi} = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} (v'^2_{xi} + v'^2_{yi} + v'^2_{zi}), \quad (6)$$

$v'_{xi}, v'_{yi}, v'_{zi}$  – составляющие скорости частиц по осям координат;

- по температуре  $T$

$$m_T = \frac{T'}{T} = \frac{p'}{n' kT} = \frac{m_p}{m_n} \frac{p}{nkT} = \frac{m_p}{m_n} = \frac{m_l^3}{m_N} \frac{m_N m_m}{m_l m_t^2} = \frac{m_l^2 m_m}{m_t^2}, \quad (7)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;

- по молярной массе  $\mu$

$$m_\mu = \frac{\mu'}{\mu} = \frac{m'_0 N'_A}{\mu} = \frac{m_m m_N m_0 N_A}{\mu} = m_m m_N, \quad (8)$$

где  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авогадро;  $N'_A = m_N N_A$  – число Авогадро в модели;

- по энергии  $W$

$$m_W = \frac{W'}{W} = \frac{i v R' T'}{2 W} = m_N m_T \frac{i v R T}{2 W} = \frac{m_N m_l^2 m_m}{m_t^2}, \quad (9)$$

где  $i$  – количество степеней свободы молекулы исследуемого газа;  $R = 8,31$  Дж/(моль К) – универсальная газовая постоянная;

- по средней длине свободного пробега молекул  $\langle l \rangle$

$$m_{\langle l \rangle} = \frac{\langle l' \rangle}{\langle l \rangle} = \frac{\frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} l'_i}{\langle l \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} d'^2 n' \langle l \rangle} = \frac{1}{m_d^2 m_n \sqrt{2\pi} d^2 n \langle l \rangle} = \frac{m_l^3}{m_d^2 m_N}; \quad (10)$$

- по среднему числу соударений молекул;

$$m_Z = \frac{\langle Z' \rangle}{\langle Z \rangle} = \frac{\langle v' \rangle}{\langle l' \rangle \langle Z \rangle} = \frac{m_v \langle v \rangle}{m_l \langle l \rangle \langle Z \rangle} = \frac{m_l}{m_t} \frac{m_d^2 m_N}{m_l^3} = \frac{m_d^2 m_N}{m_l^2 m_t}. \quad (11)$$

Из модели определяется концентрация частиц  $n'$ , по которой рассчитывается концентрация молекул  $n = n' / m_n$ . Давление газа на стенки ТДС определяется из модели как

$$p = \frac{p'}{m_p} = \frac{1}{3m_p} n' m'_0 \langle v'^2 \rangle = \frac{n' m'_0}{3N' m_p} \sum_{i=1}^{N'} (v'^2_{xi} + v'^2_{yi} + v'^2_{zi}). \quad (12)$$

Температура газа определяется как

$$T = \frac{T'}{m_r} = \frac{p'}{m_r n' k}. \quad (13)$$

Внутренняя энергия газа:

$$W = \frac{W'}{m_w} = \frac{i}{2m_w} \nu R' T' = \frac{i}{2m_r} \nu R T'. \quad (14)$$

Стенка ТДС может быть как теплоизолированной, так и теплопроводной. Во втором случае на поверхности устанавливается определенная температура. При соударении частицы с теплопроводной границей, частица приобретает скорость, которая соответствует температуре поверхности с учетом распределения Максвелла

$$F(v) = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}. \quad (15)$$

Связь модели и оригинала по количеству тепла, переданного через теплопроводную стенку, имеет вид

$$Q = \frac{Q'}{m_w} = \frac{i}{3m_w} \sum_{i=1}^{N'_i} \left[ \frac{m'_0}{2} (v'^2_{i+} - v'^2_{i-}) \right], \quad (16)$$

где  $v'_{i+}$  и  $v'_{i-}$  – скорость  $i$ -й частицы до (индекс «-») и после (индекс «+») столкновения со стенкой.

Следует отметить, что исследования модели должны проводиться с учетом допущения о равновесии термодинамических процессов. Это значит, что все величины следует фиксировать только после достижения системой состояния термодинамического равновесия.

#### Библиографический список

1. **Северюгов Д.М.**, Тихонов А.И. Разработка версии метода Монте-Карло для моделирования теплового поля (XVI Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. - с.134-137.

А.С. Шмелев, асп.; рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Задача расчета трехмерного магнитного поля может быть решена путем имитации потоком частиц закона Био-Савара-Лапласа

$$d\vec{H} = \frac{dI}{4\pi} \frac{d\vec{l}_n \times \vec{r}}{r^3} = \frac{jdV_n}{4\pi r^2} \left( \frac{d\vec{l}_n}{dl_n} \times \frac{\vec{r}}{r} \right) = \frac{jdV_n}{4\pi r^2} (\vec{e}_l \times \vec{e}_r), \quad (1)$$

где  $d\vec{H}$  – вклад в напряженность магнитного поля в точке, заданной радиус-вектором  $\vec{r}$  элементом проводника сечением  $dS_n$  и длиной  $dl_n$ , по которому протекает ток  $dI$ ;  $\vec{j}$  – плотность тока в элементе проводника;  $dV_n = dS_n \cdot dl_n$  – элементарный объем проводника;  $\vec{e}_l = \frac{d\vec{l}_n}{dl_n}$  и

$\vec{e}_r = \frac{\vec{r}}{r}$  – единичные векторы.

Введем фиктивную величину

$$d\vec{E} = \frac{jdV_n}{4\pi r^2} \vec{e}_r, \quad (2)$$

для которой справедлива теорема Гаусса

$$\oint_S d\vec{E} d\vec{S} = j_n dV_n, \quad (3)$$

или в дифференциальной форме

$$\text{div} d\vec{E} = j_n, \quad (4)$$

где  $j_n$  – плотность тока в элементе проводника  $dV_n$ .

Получим

$$d\vec{H} = \vec{e}_l \times d\vec{E}. \quad (5)$$

В соответствии с методом Монте-Карло элемент модели проводника с током  $dV_n$  излучает в пространство поток расчетных частиц плотностью

$$\dot{G} = \frac{I}{dt} \frac{1}{dV_n} \sum_{i=1}^{dN} G_i = m_j j. \quad (6)$$

Каждая  $i$ -я частица имеет вес  $G_i$  и движется в дальнейшем хаотично с постоянным шагом в объеме расчетной области, сохраняя память об

ориентации в пространстве элемента с током  $d\vec{l}_n$ , излучившего ее, в виде тройки направляющих косинусов элемента проводника:

$$e_{ix} = \cos \alpha_n = \frac{dl_{nx}}{dl_n}, \quad e_{iy} = \cos \beta_n = \frac{dl_{ny}}{dl_n}, \quad e_{iz} = \cos \gamma_n = \frac{dl_{nz}}{dl_n}. \quad (7)$$

Масштабный коэффициент подобия  $m_j = \frac{\dot{G}}{j}$  в (6) может быть выбран произвольным образом. Количество частиц  $dN$ , излучаемых за один такт времени  $dt$  элементом проводника  $dV_n$  при условии равенства весов частиц  $G_i = G$  определяется как

$$dN = \frac{m_j j}{G} dV_n dt. \quad (8)$$

Для потока частиц от элемента  $dV_n$  справедлива теорема Гаусса:

$$d\Phi = \oint_S d\vec{\varphi} d\vec{S} = \frac{I}{dt} \left( \sum_{i=1}^{N_+} G_i - \sum_{i=1}^N G_j \right) = \dot{G} dV_n, \quad (9)$$

где  $\vec{\varphi}$  – вектор плотности потока частиц;  $N_+$  – количество частиц, входящих за пределы произвольной поверхности  $S$  за время  $dt$ ;  $N_-$  – количество частиц, входящих в объем, ограниченный поверхностью  $S$  за время  $dt$ .

В дифференциальной форме уравнение (9) принимает вид

$$\operatorname{div} d\vec{\varphi} = \dot{G}, \quad (10)$$

изоморфный с уравнением (4). Это значит, что, определив из модели для произвольной точки пространства вектор  $d\vec{\varphi}$ , мы можем рассчитать и вектор

$$d\vec{E} = \frac{d\vec{\varphi}}{m_j}, \quad (11)$$

при условии, что метрические размеры в модели и оригинале совпадают, то есть метрический масштаб  $m_l = 1$ .

Выделим в расчетной области произвольный элемент  $dV$  со сторонами  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ . Тогда вектор плотности потока в данной области определится из модели как

$$d\vec{\varphi} = \frac{I}{2 \cdot dt} \left[ \frac{\vec{e}_x}{dydz} \left( \sum_{i=1}^{dN_x} G_i - \sum_{j=1}^{dN_x} G_j \right) + \frac{\vec{e}_y}{dxdz} \left( \sum_{i=1}^{dN_y} G_i - \sum_{j=1}^{dN_y} G_j \right) + \frac{\vec{e}_z}{dxdy} \left( \sum_{i=1}^{dN_z} G_i - \sum_{j=1}^{dN_z} G_j \right) \right], \quad (12)$$

где  $dN_+$  – количество частиц, проходящих через две стороны элемента  $dV$  за время  $dt$  вдоль соответствующей оси координат в положитель-

ном направлении данной оси;  $dN$  – количество частиц, проходящих через две стороны элемента  $dV$  за время  $dt$  вдоль соответствующей оси координат в направлении, противоположном направлению данной оси;  $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$  – единичные орты по осям координат. Окончательно имеем

$$d\vec{H} = \vec{e}_l \times d\vec{E} = \frac{l}{m_j} \begin{bmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \cos \alpha_n & \cos \beta_n & \cos \gamma_n \\ d\varphi_x & d\varphi_y & d\varphi_z \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Суммарная напряженность магнитного поля в каждой точке пространства определяется суммой вкладов от каждого элемента проводников с током, то есть

$$\vec{H} = \int_V \vec{e}_l \times d\vec{E}. \quad (14)$$

Для учета границ раздела сред удобно использовать конечно-элементную аппроксимацию расчетной области. В отличие от метода конечных элементов разбиение расчетной области на треугольные элементы необходимо осуществлять только для нелинейных сред, магнитная проницаемость которых меняется от одной точки к другой.

Учет магнитных характеристик сред осуществляется аналогично тому, как это описано в [1, 2, 3], а именно: при переходе частицы с весом  $G_{ucx}$  из  $i$ -го элемента с магнитной проницаемостью  $m_i$  в  $j$ -й элемент с проницаемостью  $m_j > m_i$ , она делится на две частицы, весом

$$G_j = \frac{G_{ucx} \mu_i}{\mu_j}, \quad G_i = G_{ucx} - G_j. \quad (15)$$

Частица с весом  $G_i$  остается в  $i$ -м элементе, а частица с весом  $G_j$  переходит в  $j$ -й элемент. При  $m_j \leq m_i$  частица свободно переходит из  $i$ -го элемента в  $j$ -й. Величина магнитной проницаемости  $m$  в каждом элементе рассчитывается исходя из величины  $H$  в элементе.

Алгоритм легко распараллеливается с использованием технологии программирования на видеокартах Cuda.

#### Библиографический список

1. Тихонов А.И., Шмелев А.С. Использование метода Монте-Карло при моделировании физических полей // Вестник научно-промышленного общества. М: «Алев-В», 2011, Вып. 1, с. 40-46.
2. Шмелев А.С., Тихонов А.И. Разработка версии метода Монте-Карло для моделирования двумерного магнитного поля на треугольной сетке (XVI Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. - с.137-140.

3. Шмелев А.С., Тихонов А.И. Расчет магнитного поля методом Монте-Карло на треугольной сетке // Энергия 2011: Тезисы докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, Т. 4, 2011. - с. 88-89.

*Н.В.Прохорова, асс.; рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ ПРИ РАБОТЕ НА ВИРТУАЛЬНОМ ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ ПО ФИЗИКЕ**

Одним из важнейших компонентов учебного процесса в курсе физики являются лабораторные работы. Это позволяет не только непосредственно соприкоснуться с реальными объектами и исследовать их характеристики, но и глубже понять теорию, получаемую на лекционных занятиях. Каждая работа проводится на типовом испытательном стенде, содержащем сам объект испытания и все необходимые для работы измерительные, коммутирующие, регулирующие и прочие приборы. В процессе работы студенты собирают схему эксперимента и проводят испытания по предлагаемой им программе. Затем студенты отчитываются по проделанной работе перед преподавателем, который оценивает степень их знаний. Такая практика закрепления знаний хорошо проверена временем.

Современная персональная компьютерная техника позволяет существенно расширить возможности данной практики. Особенно интересны в данном отношении имитационные системы (тренажеры), позволяющие с максимальной степенью подобия воспроизвести виртуальные модели реальных объектов. Наибольших успехов здесь добились создатели компьютерных игр, целиком захватывающих внимание человека, уводя его в мир виртуальных образов. Достоинства игровых систем могут быть использованы и в целях обучения.

В случае виртуального испытательного стенда имитация может быть осуществлена путем воспроизведения на экране виртуальной панели, подобной рабочей панели реального стенда (рис. 1) [1, 2]. На данной панели можно разместить приборы, внешний вид которых мало отличается от вида реальных приборов. Каждый прибор имеет свои соединительные клеммы, которые с помощью соединительных проводов (опять же виртуальных) могут быть связаны с клеммами других приборов, образуя электрическую цепь. Выбор приборов из предлагаемого системой меню, размещение их на панели стенда и сборка

схемы должна осуществляться студентом в интерактивном режиме. Весь необходимый для этого диалог с системой осуществляется в соответствии с принятыми в системе Windows стандартами.

Система позволяет осуществлять имитацию работы с реальным стендом. То есть после сборки схемы студент имеет возможность с помощью “выключателя” подать “напряжение” на схему, после чего схема реагирует на это так, как это происходит в реальности: стрелки приборов приходят в движение, ошибки в схеме (типа коротких замыканий) приводят к соответствующим аварийным последствиям и т.п. В правильно собранной схеме студент может воспользоваться разного рода регулирующей аппаратурой для создания соответствующих условий эксперимента, снять показания измерительных приборов и т.п.

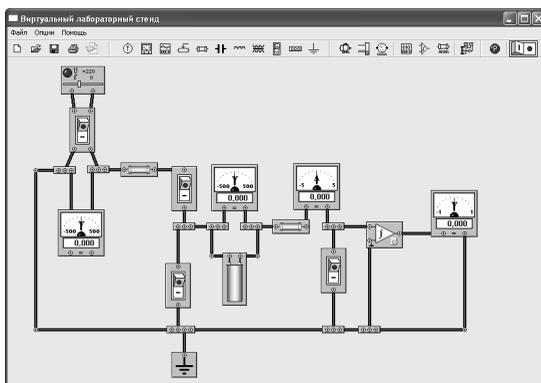


Рис. 1. Схема для измерения емкости конденсатора с помощью интегратора тока

Одно из достоинств виртуального тренажера состоит в отслеживании всех действия студента, что существенно расширяет возможности оценки его умений, навыков и компетенций. Для этого в системе ведется протокол событий, под которыми понимается движение курсора, формирование проводников, выбор виртуальных устройств, изменение параметров устройств, включение/выключение выключателей, изменение положений ползунков регулирующей аппаратуры. Протокол событий сохраняется в отдельном файле. В последствие по нему можно восстанавливать весь ход эксперимента, чтобы продемонстрировать преподавателю результат той работы, которую студент провел во время, отведенное для самостоятельной подготовки.

Основанием для оценки работы студента с имитационным стендом является содержимое файла протокола, который содержит полную информацию обо всех действиях студента и всех характерных состоя-

ниях виртуального стенда, файл схемы эксперимента, а также письменный отчет студента по проделанной работе в формате Excel.

Работа подсистемы формирования оценки за работу со стендом строится по следующим компетенциям:

1. Профессиональная компетентность:
  - умение разрабатывать и следовать программе эксперимента;
  - умение выбирать приборы и оборудование;
  - умения разрабатывать и собирать электрические схемы;
  - умение реализовывать эксперимент на практике.
2. Компетентность в работе с информацией:
  - умение фиксировать показания приборов.
  - умение формировать таблицы данных;
  - умение формировать диаграммы по результатам экспериментов.
3. Личностные компетенции:
  - умение принимать оперативные решения в экстремальных (аварийных) ситуациях;
  - аккуратность в работе;
  - уверенность в своих действиях.

При формировании оценки рассчитывается либо информационная энтропия действий студента, либо среднеквадратичное отклонение результатов эксперимента. Так, например, при оценке умения следовать программе эксперимента рассчитывается энтропия по формуле

$$S = \sum_{i=1}^{N_p} \ln \frac{N_i!}{N_{ip}! \cdot (N_i - N_{ip})!}, \quad (1)$$

где  $N_i$  – общее количество действий, выполненных студентом по  $i$ -му разделу программы эксперимента (например, количество выполненных соединений);  $N_{ip}$  – количество данных событий, реально присутствующее в  $i$ -м разделе программы;  $N_p$  – количество разделов.

Оценка  $B_{nэ}$  складывается из баллов  $B_{nэi}$  по каждому разделу работ с учетом весовых коэффициентов  $K_{nэi}$  по формуле:

$$B_{nэ} = \frac{\sum B_{nэi} \cdot K_{nэi}}{\sum K_{nэi}}. \quad (2)$$

Балл по каждому разделу  $B_{nэi}$  вычисляется из условия  $B_{nэi} = 5$ , если  $S_i = 0$ ,  $B_{nэi} = 0$ , если  $S_i = S_{maxi}$ , то есть

$$B_{nэi} = 5 \left( 1 - \frac{S_i}{S_{maxi}} \right). \quad (3)$$

Максимально возможное значение энтропии по  $i$ -му разделу  $S_{maxi}$  вычисляется из условия  $N_{ip} = N_i - N_{ip}$ , то есть  $N_{ip} = N_i / 2$ .

Оценка за соответствие списка приборов рассчитывается на основании двух множеств: множество  $M_1 = M_{mp} \cup M_p$ , являющееся объединением списка объектов, требуемых для данного эксперимента  $M_{mp}$ , со списком объектов, реально выбранных пользователем  $M_p$ , и множество  $M_2 = M_{mp} \cap M_p$ , являющееся пересечением этих списков. Энтропия списка объектов определяется по формуле

$$S = \ln \frac{N_1!}{N_2! \cdot (N_1 - N_2)!}, \quad (4)$$

где  $N_1$  – количество элементов множества  $M_1$ ,  $N_2$  – количество элементов множества  $M_2$ .

Оценка рассчитывается по формуле, аналогичной формуле (3).

По величине энтропии рассчитываются также оценки за умение собирать электрические схемы, за уверенность в своих действиях и аккуратность в работе.

Оценка корректности полученных в ходе эксперимента результатов даст основания для расчета балла за умение реализовывать эксперимент на практике  $B_3$ . Для этого оценить степень отличия полученных в ходе эксперимента графических зависимостей от эталонных характеристик. Сравнение характеристик осуществляется путем расчета средней относительной квадратичной невязки:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \left( \frac{P_j - P_{j0}}{P_{j0}} \right)^2}{N}}, \quad (5)$$

где  $P_j$  – значения ординаты  $j$ -й точки кривой, полученной студентом в эксперименте;  $P_{j0}$  – значения ординаты  $j$ -й точки на эталонной кривой.

Зная величину  $F$  можно рассчитать оценку по формуле

$$B_3 = 5(1 - F). \quad (6)$$

Аналогичным образом рассчитываются также оценки за соответствие характеристик приборов, за эстетичность собранной схемы, за умение обрабатывать информацию.

#### Библиографический список

1. **Тихонов А.И., Прохорова Н.В.** Электричество: метод. указания к выполнению лаб. работ с использованием виртуального лабораторного стенда / Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 36 с.
2. **Тихонов А.И., Прохорова Н.В.** Магнетизм: метод. указания к выполнению лаб. работ с использованием виртуального лабораторного стенда / Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 36 с.

*А.А. Струговец, студ.; рук. А.Н. Алентьев, к.ф.-м.н., доц.;  
М.А. Солунин, к.ф.-м.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСКА DVD В КАЧЕСТВЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ В ДЕМОНСТРАЦИОННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

В данной работе рассмотрена возможность использования диска типа DVD в качестве дифракционной решётки (ДР). В предлагаемой ДР чередуются очень узкие полоски диска DVD. Ширина плоской полосы  $a$  и ширина углубления  $b$  определяют период решётки.

$$d = a + b. \quad (1)$$

Функциональная схема лабораторного стенда для демонстрации дифракционной картины представлена на рис. 1.

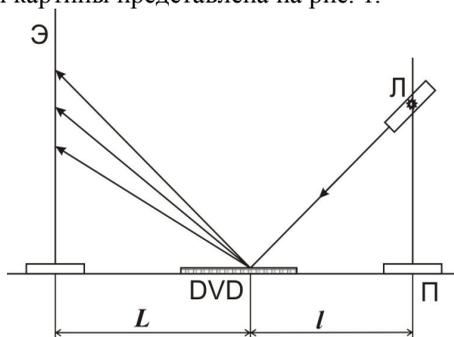


Рис. 1. Схема лабораторного стенда для демонстрации дифракционной картины в отражённом свете от диска DVD

Свет лазера Л, с длиной волны  $\lambda = 620$  нм закреплен на подставки П так, что представляется возможным изменять угол  $\beta$  падения света на ДР. Перемещение подставки с лазером позволяет изменять расстояние  $l$  от источника света до ДР. Предусмотрено также изменение расстояния  $L$  от ДР до экрана Э. Наблюдение дифракционной картины проводится в отраженном свете. Решетка  $AB$ , дающая дифракционную картину в отраженном свете, действует также как прозрачная решетка  $A'B'$ , являющаяся проекцией  $AB$  на фронт волны (рис.2). Постоянная решетки  $A'B'$  будет:

$$d' = d \cos \alpha = (a + b) \cos \alpha. \quad (2)$$

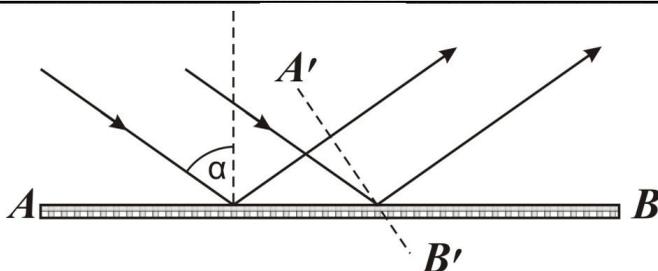


Рис. 2. К расчёту дифракционной картины в отражённом свете

Положение главных максимумов дифракционной картины прозрачной ДР определяется соотношением

$$d' \sin \varphi = \pm k\lambda, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – определяет направление на главные максимумы дифракционной картины и принимает следующие значения:  $\varphi = \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots$ .

Учитывая (2), (3) можно определить период решётки по формуле

$$d = \frac{k\lambda}{\cos \alpha \sin \varphi}. \quad (4)$$

В ходе эксперимента с диском DVD наблюдались узкие резко выраженные главные максимумы (5ч7) дифракционной картины в отражённом свете. Используя экспериментальные данные, проведён расчет периода решётки по формуле (4)  $d = (1,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , что находится в удовлетворительном согласии с техническими характеристиками данного типа диска DVD. Для сравнения с полученными результатами проведён опыт, в котором использовался грампластинный диск для проигрывателя в качестве отражающей дифракционной решётки. В этом случае наблюдались широкие размытые частично перекрывающиеся 2ч3 максимума дифракционной картины в отражённом свете. Период для такого типа решётки составлял величину  $d_{\Gamma} = (2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-4} \text{ м}$ .

Результаты выполненной экспериментальной работы определённо указывают, что диск типа DVD может быть эффективно использован в демонстрационном эксперименте в лабораторном практикуме по оптике.

*А.В. Подобный, студ.; рук. М.А. Солунин, к.ф.-м.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ**

Создание технологий беспроводной передачи информации ознаменовало бурное развитие науки последних десятилетий. Электромагнитные волны позволяют передавать сигналы на любые нужные расстояния и получать информацию о самых удаленных областях вселенной.

Передача энергии и информации - явления, с точки зрения законов физики, родственные, поскольку информация передается не сама по себе, а вместе с порциями энергии. Сегодня никого не удивляют технологии передачи информации беспроводным путем. Задача ученых – разработать подобные технологии для беспроводной передачи энергии. Возможно, что государство, сумевшее обеспечить первенство в развитии технологий беспроводной передачи энергии, заявит на свое экономическое лидерство на мировой арене.

Возможность поставки на Землю из космоса экологически чистой энергии Солнца, отказ от большинства машин, работающих на двигателях внутреннего сгорания, в пользу электромобилей, питающихся беспроводной энергией, поможет решить глобальные проблемы неминуемой исчерпаемости топливных природных ресурсов Земли и загрязнения окружающей среды. Беспроводная передача электроэнергии позволит сделать прорыв в развитии медицины, в частности, в энергообеспечении вживляемых в тело пациента имплантатов.

В настоящее время единственным рациональным способом транспортировки электрической энергии являются батареи и аккумуляторы. Но они имеют долгий срок зарядки и дают лишь кратковременную возможность автономного электроснабжения. Поэтому сегодня проблема беспроводной передачи энергии является актуальной.

Первым, кому удалось передать электрическую энергию на расстояние, стал выдающийся сербский физик и изобретатель Никола Тесла (1856-1943гг.). В 1889 году ученый сумел передать на расстояние двадцати пяти миль без проводов электрическую энергию, необходимую для питания двухсот ламп. С того времени никому из ученых не удалось добиться столь масштабных результатов.

Мы провели эксперимент, демонстрирующий возможность беспроводной передачи электроэнергии.

Суть эксперимента в следующем. В качестве источника беспроводной энергии было сделано устройство, генерирующее электромагнитные колебания. В качестве приемника беспроводной энергии используется устройство, превращающее электромагнитные волны в электрический ток (Рис. 1).

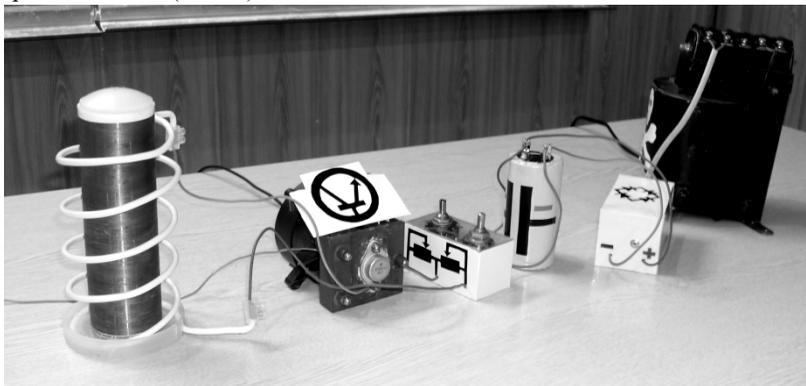


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

В основе устройства, создающего электромагнитные колебания высокой частоты, лежит одна из известных схем (Рис. 2а). В дальнейшем будем называть его «Генератором электромагнитных колебаний».

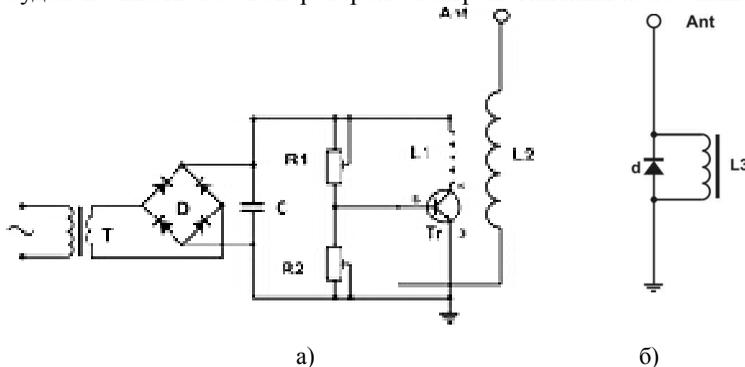


Рис. 2. Электрическая схема генератора (а) и приемника (б)

На схеме использованы следующие обозначения: Т – трансформатор, D – диодный мост, С – конденсатор, R1 и R2 – переменные резисторы (сопротивления), Tr – транзистор (Б – база, Э – эмиттер, К – коллектор), L1 – катушка индуктивности (5 витков медного провода с площадью поперечного сечения 6 мм<sup>2</sup>), L2 – катушка индуктивности (1350 витков медного провода с площадью

поперечного сечения  $0,0314 \text{ мм}^2$ ), L3 – катушка приемника, d – светодиод, Ant – антенна.

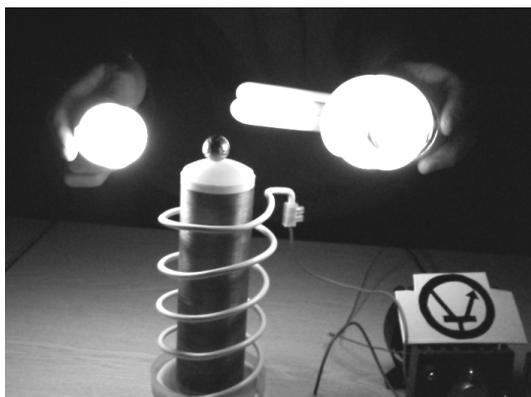


Рис. 3. Эффект свечения ламп с флуоресцентным покрытием вблизи генератора

Принцип действия данного генератора заключается в следующем. Трансформатор Т преобразует напряжение переменного тока из сети 220 вольт в 30, который затем проходит через диодный мост D, выпрямляющий его, делая постоянным. Конденсатором С ток выравнивается. Переменные резисторы R1 и R2 регулируют напряжение, подаваемое на базу транзистора Tr. В транзисторе напряжение, подаваемое на базу Б и эмиттер Э регулируют сопротивление между эмиттером и коллектором.

Катушки L1 и L2 представляют собой колебательные контуры, где C1 и C2 – их паразитные межвитковые емкости, которые зависят от окружающей среды. Поэтому, чем ближе экспериментатор к катушкам, тем больше их емкость, и, соответственно, ниже внутренняя частота колебательного контура.

При подаче напряжения на генератор, в катушке L1 возрастает ток - возникает электромагнитное поле. Так как L1 и L2 связаны между собой слабой индуктивной связью, в катушке L2 возникает ЭДС индукции. Ток в ней начинает течь от базы к антенне. Это влечет уменьшение напряжения на базе и эмиттере, что, в свою очередь, увеличивает сопротивление между коллектором и эмиттером. Вследствие этого ток, подаваемый на выводы катушки L1, начинает уменьшаться - течь в другую сторону. Из-за этого в катушке L2, индуктивно связанной с катушкой L1, ток также начинает течь в противоположную сторону - к базе. На базе и на эмиттере напряжение увеличивается, сопротивление

между коллектором и эмиттером уменьшается, ток в катушке L1 опять возрастает. Эти процессы повторяются.

Частота выходного тока будет равна внутренней частоте колебательного контура L1C1 и вычисляется по формуле:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1)$$

но емкость C1 очень мала, поэтому частота переменного тока высокая. Высокочастотный переменный ток порождает электромагнитные волны той же частоты. Данное излучение вызывает, например, свечение ламп с флуоресцентным покрытием (Рис. 3).

Приемник представляет собой антенну Ant и колебательный контур R3L3C3, в котором C3 - межвитковая емкость катушки L3. Катушка L3 состоит из нескольких сотен витков медной проволоки, намотанной на ферромагнитный сердечник. Ферромагнитным сердечником катушка настраивается на частоту приемника путем регулирования зазора между сердечником и катушкой. В качестве нагрузки R3 используется светодиод d, являющийся одновременно и индикатором тока, возникающим в приемнике (Рис. 2б). Внутренняя частота контура приемника настроена на внутреннюю частоту контура передатчика R1L1C1. В антенне приемника, настроенной контуром в резонанс с генератором возникает ЭДС. Цепь «приемник - генератор» замыкается на заземлении.

Данный эксперимент, наглядно показавший возможность беспроводной передачи электроэнергии на расстояние, выявляет основные проблемы данного способа беспроводной передачи энергии – его низкий КПД. При увеличении расстояния от передатчика до приемника концентрация получаемой энергии резко падает. Поэтому задача современных ученых состоит в том, чтобы увеличить, во-первых, коэффициент полезного действия передаваемой электроэнергии на расстояние и, во-вторых, расстояние передачи энергии - до необходимого. С другой стороны надо учитывать тот факт, что современный человек окружен спутниковым телевидением и радио, микроволновыми печами, сотовыми телефонами и ретрансляционными вышками. Становится обыденной беспроводная передача данных Wi-Fi и Bluetooth. Все это является сильными излучателями электромагнитных волн. Даже переменный ток в розетках создает излучение. Это значит, что мегаватты энергии просто-напросто исчезают в никуда. Поэтому наша задача состоит не только в том, чтобы передавать электроэнергию без проводов, но и в том, чтобы получить ее из окружающего нас излучения. И если это произойдет, мы, по крайней мере, забудем, что такое

разряженный мобильный телефон. Решение именно этих задач позволит человечеству совершить прорыв в беспроводное будущее.

*К.Г. Плужян, студ.; рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ГЕОМЕТРОФИЗИКА НА ОСНОВЕ ПОЛИЧИСЕЛ

Коммутативно-ассоциативные гиперкомплексные числа и связанные с ними линейные пространства изучены, как ни странно, крайне мало. Исторически первой успешной попыткой обобщения понятия комплексного числа считается открытие в 1843 г. Уильямом Гамильтоном кватернионов – упорядоченных четвёрок действительных чисел, обладающих некоммутативным умножением базисных единиц:

$$\begin{aligned} X_4 &= x_0 \mathbf{1} + x_1 e_1 + x_2 e_2 + x_3 e_3 \\ e_1^2 &= e_2^2 = e_3^2 = -\mathbf{1} \\ e_1 e_2 &= e_3; e_2 e_3 = e_1; e_3 e_1 = e_2; \\ e_2 e_1 &= -e_3; e_3 e_2 = -e_1; e_1 e_3 = -e_2. \end{aligned}$$

Кватернионы сыграли выдающуюся роль в алгебре и геометрии, однако по мере развития векторного анализа были отнесены на второй план и сегодня применяются крайне редко. С тех пор, как в конце XIX века Фробениусом была доказана теорема, согласно которой система комплексных чисел является единственным расширением понятия действительного числа, сохраняющего его основные алгебраические свойства, к которым относится и отсутствие делителей нуля. Вторая, так называемая, обобщённая теорема Фробениуса, допуская некоммутативность и неассоциативность умножения, расширяя количество алгебр, не имеющих делителей нуля, до изоморфных кватернионам. Между тем, снятие требования об отсутствии делителей нуля позволяет строить гиперкомплексные системы с коммутативным и ассоциативным умножением без ограничений на размерности. Исследование именно таких алгебр представляется достаточно интересной самостоятельной задачей.

Простейшим коммутативно-ассоциативными числовыми системами (для краткости условимся называть их *поличислами*, или полисистемами), содержащими делители нуля, являются двойные и дуальные числа. Их алгебры получаются путем применения к действительным числам процедуры удвоения Диксона – Кэли с мнимой гиперболической или параболической единицей. Квадраты этих единиц, в отличие от квадрата классической эллиптической единицы, равны не  $-1$ , а  $+1$  и

О соответственно. Известно, что свойства таких чисел существенно беднее комплексных, чем, отчасти, и объясняется пренебрежением математиков к аналогичным алгебраическим построениям. Проблема применения этих числовых систем в физике заключается ещё и в том, что крайне сложно найти геометрическую интерпретацию поличислам, содержащим в своей основе параболические делители нуля.

Дабы не встретиться с подобной проблемой, я предположу к рассмотрению так называемую алгебру  $H_4$  – квадрупольногиперболические числа. Обычно, алгебра задаётся добавлением к аксиомам действительных чисел аксиом сложения и умножения объектов вида:

$$\begin{aligned} H_4 &= h_0 \mathbf{1} + h_1 \varepsilon_1 + h_2 \varepsilon_2 + h_3 \varepsilon_3 \\ H'_4 &= h'_0 \mathbf{1} + h'_1 \varepsilon_1 + h'_2 \varepsilon_2 + h'_3 \varepsilon_3 \\ \varepsilon_1^2 &= \varepsilon_2^2 = \varepsilon_3^2 = +1 \end{aligned}$$

Где  $h_i$  и  $h'_i$  – действительные числа, называемые компонентами, а  $\mathbf{1}, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – базисные единицы. Выбор именно гиперболических базисных единиц позволяет дать наиболее простую геометрическую интерпретацию компонентам данной полисистемы. Алгебра  $H_4$  задаёт четырёхмерный вектор в данной группе поличисел с богатыми алгебраическими свойствами, пригодными для описания геометрии пространства в духе 4-измерений ОТО.

Руководствуясь изречением, которое приписывают Пифагору: «Мир есть число», исследуем свойства пространств, описываемых алгеброй поличисел. Так уж повелось, но в природе число, а точнее метрика (расшифруем данное понятие позже), формирует реальные свойства пространства-времени. Скажем, для изучения знаменитой ОТО Эйнштейна достаточно взять стандартный учебник по псевдоримановой геометрии, где подробно вводятся такие понятия, как метрика, геодезические линии, символы Кристоффеля, Леви-Чивита, тензоры Римана и другие понятия дифференциальной геометрии и тензорного анализа. Если Вы осилите эту литературу, то можете гордиться тем, что в совершенстве освоили ОТО Эйнштейна не прибегая к физической интерпретации и литературе. Число задаёт геометрию, геометрия диктует законы физики пространства-времени. Выбор оптимальной геометрии, свойственной природе – один из основных задач теоретической физики.

Введём основные аксиомы группы  $H_4$ :

$$H_4 + H'_4 = (h_0 + h'_0)\mathbf{1} + (h_1 + h'_1)\varepsilon_1 + (h_2 + h'_2)\varepsilon_2 + (h_3 + h'_3)\varepsilon_3$$

$$\begin{aligned}
 H_4 H_4^0 &= (h_0 h_0^2 + h_1 h_1^2 + h_2 h_2^2 + h_3 h_3^2) \mathbf{1} + \\
 &+ (h_0 h_1^2 + h_1 h_0^2 + h_2 h_3^2 + h_3 h_2^2) e_1 + \\
 &+ (h_0 h_2^2 + h_1 h_3^2 + h_2 h_0^2 + h_3 h_1^2) e_2 + (h_0 h_3^2 + h_1 h_2^2 + h_2 h_1^2 + h_3 h_0^2) e_3
 \end{aligned}$$

Получаем алгебру коммутативно-ассоциативных поличисел, в которой таблица умножения базисных единиц имеет вид:

	1	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$
1	1	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$
$\epsilon_1$	$\epsilon_1$	1	$\epsilon_3$	$\epsilon_2$
$\epsilon_2$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	1	$\epsilon_1$
$\epsilon_3$	$\epsilon_3$	$\epsilon_2$	$\epsilon_1$	1

Введём понятие сопряжённого числа из  $H_4$ :

$$\begin{aligned}
 H_4^0 &= h_0 \mathbf{1} + h_1 e_1 + h_2 e_2 + h_3 e_3 \\
 H_4^1 &= h_0 \mathbf{1} - h_1 e_1 + h_2 e_2 - h_3 e_3 \\
 H_4^2 &= h_0 \mathbf{1} + h_1 e_1 - h_2 e_2 - h_3 e_3 \\
 H_4^3 &= h_0 \mathbf{1} - h_1 e_1 - h_2 e_2 + h_3 e_3
 \end{aligned}$$

Из непосредственной подстановки убеждаемся, что:

$$\begin{aligned}
 H_4^0 H_4^1 H_4^2 H_4^3 &= h_0^4 + h_1^4 + h_2^4 + h_3^4 - 2h_0^2 h_1^2 - 2h_0^2 h_2^2 - \\
 &- 2h_0^2 h_3^2 - 2h_1^2 h_2^2 - 2h_1^2 h_3^2 - 2h_2^2 h_3^2 + 8h_0 h_1 h_2 h_3 \equiv \mathcal{S}_4
 \end{aligned}$$

Последнюю форму назовём полиформой ( $\mathcal{S}_4$ ) числа  $H_4$ . Используя данную форму введём понятие модуля квадрониперболического числа – метрику пространства алгебры  $H_4$ :

$$|H_4| = |H_4^0 H_4^1 H_4^2 H_4^3|^{1/4}$$

Числа, не равные нулю, но полиформа которых равна нулю, являются делителями нуля. Среди множеств делителей нуля алгебры  $H_4$ , особенно простыми алгебраическими свойствами, выделяются четыре:

$$S_0 = \frac{\mathbf{1}}{4(1 + \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)}$$

$$S_1 = \frac{1}{4(1 - \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3)}$$

$$S_2 = \frac{1}{4(1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3)}$$

$$S_3 = \frac{1}{4(1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3)}$$

Эти делители нуля – абсолютный базис, замечательны тем, что их таблица умножения выглядит наиболее просто:

	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
$S_0$	$S_0$	0	0	0
$S_1$	0	$S_1$	0	0
$S_2$	0	0	$S_2$	0
$S_3$	0	0	0	$S_3$

Обратная связь базисных единиц с вышеуказанными делителями нуля алгебры  $H_4$  задаёт полную группу и выражается соотношением:

$$I = S_0 + S_1 + S_2 + S_3,$$

$$\varepsilon_1 = S_0 - S_1 + S_2 - S_3,$$

$$\varepsilon_2 = S_0 + S_1 - S_2 - S_3,$$

$$\varepsilon_3 = S_0 - S_1 - S_2 + S_3.$$

4-векторы, построенные на абсолютном базисе, легко не только складывать, но и умножать и делить. Ансамбль взаимно сопряжённых векторов, записанных в абсолютном базисе, имеет вид:

$$H_4^0 = h_0 S_0 + h_1 S_1 + h_2 S_2 + h_3 S_3,$$

$$H_4^1 = h_1 S_0 + h_0 S_1 + h_3 S_2 + h_2 S_3,$$

$$H_4^2 = h_2 S_0 + h_3 S_1 + h_0 S_2 + h_1 S_3,$$

$$H_4^3 = h_3 S_0 + h_2 S_1 + h_1 S_2 + h_0 S_3.$$

Полиформа числа  $H_4$  в абсолютном базисе также принимает вид:

$$F_4 = h_0 h_1 h_2 h_3,$$

откуда получаем выражение величины модуля числа из  $H_4$  через его компоненты в абсолютном базисе:

$$|H_4| = |h_0 h_1 h_2 h_3|^{1/4}.$$

Последняя форма – это метрика пространства  $H_4$ .

С понятием метрики мы встречаемся уже в школе: теорема Пифагора – это метрика евклидовой геометрии. Метрика задаёт функцию, определяющую расстояния между точками в пространстве данной геометрии. В евклидовой, псевдоевклидовой (геометрия Минковского СТО) и псевдоримановой геометрии (ОТО) используется квадратичная метрика, хотя можно предположить, что в 4-мерном пространстве-времени СТО и ОТО логичней использовать метрику 4-степени, о чём Бернхард Риман говорил в своей знаменитой лекции «О гипотезах, лежащих в основании геометрии», хотя сам же не стал развивать это направление в силу сложности работы со степенями, выше двойки.

Цель данной работы – познакомить студента-специалиста в области инженерной физики с развивающимся направлением современной теоретической физики и геометрофизики. Исследования по данной тематике ведутся в ВУЗах нашей страны и зарубежном. Несмотря на кажущуюся простоту, данная геометрия описывает нетривиальные свойства пространства-времени. Именно на изучение данных свойств нацелена работа с данной теорией.

#### Библиографический список

1. Гиперкомплексные числа в геометрии и физике. Журнал. Тома 1-14 (2004-2010).

*В.А. Николаев, студ.; рук. Н.Г. Демьянцева, ст. преп.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЛОПАТОК ТУРБИН

Лопаточный аппарат - «сердце» турбины. В нем до 50 различных ступеней, в которых установлены тысячи лопаток. Лопатка первой ступени может уместиться на ладони. Длина лопатки последней ступени более метра. Одни работают в условиях высокого давления пара при температуре 560 и более градусов по Цельсию, другие (последняя ступень) - в условиях вакуума, в среде низкотемпературного влажного пара. В газотурбинных установках лопатки работают при температуре 850 и более градусов.

Для изготовления лопаток применяются нержавеющие, высоколегированные стали, жаропрочные сплавы на основе никеля, титановые сплавы. При обработке лопаток должна быть обеспечена заданная точность и высокий класс чистоты поверхности. Допуски - сотые доли миллиметра. Чистота - 8-9-й класс - близка к зеркальной поверхности. Поэтому для обработки лопаток применяют электрохимический метод обработки, который предназначен для обработки заготовок из очень прочных, вязких, хрупких материалов. Данный метод в ряде случаев имеет очень существенные преимущества перед обработкой резанием: отсутствует силовое воздействие инструмента на заготовку, не возникает наклеп обработанной поверхности, дефектный слой незначителен, удаляются прижоги поверхности, полученные при шлифовании, повышаются антикоррозионные, прочностные и другие эксплуатационные характеристики деталей. Электрохимический метод обработки обеспечивает непрерывность процесса при одновременном формообразовании всей обрабатываемой поверхности, что позволяет обрабатывать очень сложные наружные и внутренние поверхности заготовок.

Электрохимическая обработка основана на законах анодного растворения металлов при электролизе. При прохождении электрического тока через электролит на поверхности заготовки, включенной в электрическую цепь и являющейся анодом, происходят химические реакции, и поверхностный слой металла превращается в химическое соединение. Продукты электролиза переходят в раствор. Производительность процесса зависит от электрохимических свойств электролита, обрабатываемого токопроводящего материала и плотности тока. Точность обработки значительно повышается при использовании импульсного напряжения. Для исследования влияния различных режимов нестационарного электролиза на точность и производительность электрохимической обработки металлов на кафедре физики создана экспериментальная лабораторная установка, которая может использоваться как в учебном процессе при изучении раздела «Электростатика», так и в научно-исследовательской работе студентов.

*А. Подобный, студ.; рук. М.А. Солунин, к.ф.-м.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПЛАЗМЕННЫЙ ГЕНЕРАТОР ЗВУКОВЫХ ВОЛН КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ЗВУКА**

История устройства, преобразующего энергию электрического сигнала в энергию звукового поля, началась в 1876, когда шотландский ученый Александр Белл запатентовал первую электродинамическую головку. С того времени излучатель, основанный на физическом явлении, в соответствии с которым проводник, помещенный в постоянное магнитное поле, при протекании через него тока испытывает действие силы Лоренца, принципиально не изменился. Между тем данное устройство имеет неразрешимые недостатки. Один из них - присутствие подвижных деталей, являющихся источниками звука. Именно на эти подвижные части излучателя действуют различные неизбежные «паразитные» силы, искажающие звук, что делает невозможным получить прямую АЧХ данного излучателя.

Одним из решений данной проблемы является использование излучателя, у которого отсутствуют подвижные детали.

В 1900 году британский физик Вильям Дуддел, работающий над проблемой уменьшения шума уличных фонарей, открыл, что изменения параметров цепи питания дуговой лампы влияют на частоту звука, издаваемого разрядами. Результатом работы ученого стала демонстрация научному сообществу альтернативного источника звук - «поющей дуги» - электрического разряда, способного изменять воспроизводимую звуковую частоту.

В 1946 году французский изобретатель Зигфрид Клейн, усовершенствовав конструкцию Дуддела, ввел термин ионофон. В его излучателе коронный разряд создавался между анодом, помещенным в кварцевую трубку, и металлическим цилиндрическим катодом вокруг ее внешней стороны. В основе работы прибора Клейна - явление излучения звука нагретым ионизированным воздухом за счет изменения его температуры и, соответственно, объема. Конструкция не имела подвижных деталей, негативно влияющих на качество звука.

Конец 20-го века ознаменовался бурным развитием цифровых технологий, что вынуждает при необходимости всю информацию при необходимости переводить в двоичный код. Сегодня повсеместно используются цифровые источники или преобразователи звука, оперирующие исключительно информацией, переведенной в двоичный код. Чтобы оцифровать звук, то есть представить его в виде нулей и единиц, необходима широтно-импульсная модуляция (ШИМ), преобразующая аналоговый синусоидальный сигнал в прямоугольные импульсы, проинтегрировав которые, можно получить такую же синусоиду напряжения (Рис. 1).

Верхняя граница прямоугольного импульса при этом равняется логической единице, а нижняя – нулю. После проведения необходимых

операций над сигналом он пропускается через специальный фильтр для получения на выходе из устройства аналогового сигнала. При свершении каждого из этих преобразований качество сигнала неизменно ухудшается (Рис. 2а).

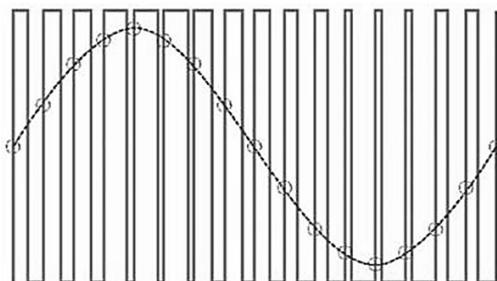


Рис. 1. Пример широтно-импульсной модуляции

Мы повторили эксперимент по генерации звука ионизированным газом. Было собрано устройство, демонстрирующее возможность генерации звука ионизируемым воздухом.

В демонстрируемом устройстве аналоговый аудио сигнал так же, как и в цифровых аудиоустройствах, дискретизируется благодаря ШИМ. Полученный прямоугольный сигнал многократно усиливается и подается на повышающий трансформатор, на выходе из которого мы имеем напряжение порядка нескольких киловольт высокой частоты, что способствует образованию высокочастотной электрической дуги (Рис.2б). Вместе с подключенной аудиосистемой процесс преобразования звука усложняется (Рис 2в).

Мгновенное значение напряжения звукового сигнала влияет на ширину импульса (чем выше напряжение, тем больше ширина импульсов). Чем больше ширина импульсов, тем больше энергии «вкладывается» в дуговой разряд, который передает эту энергию нагретому ионизируемому воздуху. В свою очередь, воздух, совершая работу, расширяется и сужается с той же частотой, с которой меняется энергия, а, соответственно, и аудио сигнал. Расширение и сужение газа способствует образованию колебаний воздуха в слышимом диапазоне. То есть дуга становится источником необходимого нам звука.

В отличие от ионофона Клейна данная модель имеет неоспоримое преимущество. В ионофоне звук генерировал коронный разряд, который в силу своей специфичности создавал много вредных для организма человека оксидов азота. В данном же эксперименте в качестве

излучателя используется дуговой разряд, который образует в разы меньше вредного газа.

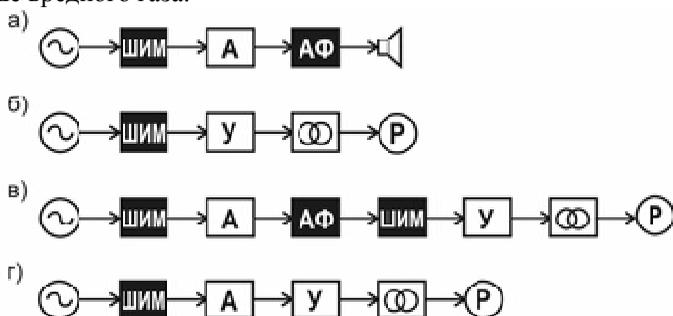


Рис. 2. Обозначения: ШИМ – широтно-импульсный модулятор, АФ – аналоговый фильтр, P – разрядник, У – усилитель, А – модуль, управляющий звуком

Для воспроизведения качественного звука частота его дискретизации должна быть высокой. В цифровом источнике звука, например, в mp3 плеере, частота дискретизации звука равна порядка 45 кГц. Это значит, что мы теоретически можем взять цифровой сигнал от этого источника, минуя специальные фильтры, преобразующие дискретный сигнал в аналоговый, усилить их (усилить дискретный сигнал намного проще, чем аналоговый), подать на повышающий трансформатор, и на выходе его иметь плазменный излучатель с более высоким качеством звука. В связи с тем, что достигается уменьшение числа преобразователей звука (сигнал минует аналоговый фильтр и ШИМ), возрастает его качество (Рис 2г).

Так как воздушные колебания создают ионизированный высокотемпературный газ, то можно утверждать, что звуковая частота генерируется плазмой. Поэтому нашу модель прибора можно назвать плазменным генератором звуковых частот (рис. 3).

Как говорилось выше, в нем отсутствует подвижная система, а, значит, нет проблем с переходными искажениями и резонансами. Также данный генератор обладает круговой диаграммой направленности и воспроизведением частот до 50 кГц.

Наряду с явными преимуществами плазменный излучатель обладает рядом недостатков: низким КПД, невозможностью воспроизведения низких частот и опасно высоким напряжением.

Тем не менее, некоторые зарубежные производители используют плазменные генераторы в своих аудио устройствах, применяя их вместе со стандартными низкочастотными излучателями. Данная аппаратура является эксклюзивной и относится к классу Hi-End.

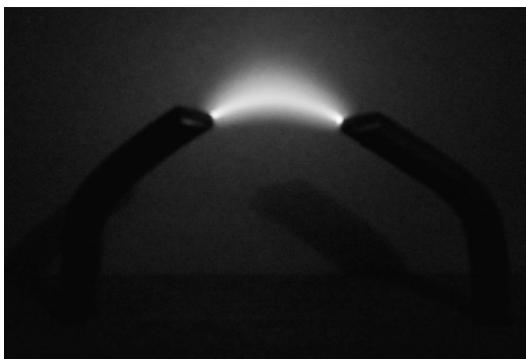


Рис. 3. Высокочастотная электрическая дуга в эксперименте является источником аудиосигна).

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что, несмотря на все имеющиеся недостатки, плазменный генератор звуковых волн способен воспроизводить идеально чистый звук без помех, что может быть использовано в научных лабораториях для различных исследований.

Следует особо отметить, что в данной работе в процессе исследования уже разработанных схем плазменных генераторов звуковых частот, была выдвинута идея по возможному упрощению преобразователя и улучшению качества воспроизводимого звука.

С появлением цифровых технологий, использующих дискретные сигналы, разработка плазменного генератора звуковых частот принимает актуальный характер. Возможно, что когда-нибудь ученые придумают более рациональный безынерционный излучатель, с приемлемым КПД, и тогда произойдет настоящая революция в развитии способа воспроизведения качественного звука.

*Д.В. Аникеев, студ.; рук. А.Н. Алентьев, к.ф.-м.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЦИНТИЛЯЦИОННОГО СЧЁТЧИКА В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ И НЕПРЕРЫВНОЙ РАБОТЫ

Длительная и непрерывная работа сцинтиляционных счётчиков с повышенной эффективной площадью, в частности, в нейтринных экспериментах, требует автоматической коррекции режима работы фотоэлектронных умножителей (ФЭУ).

Функциональная схема предлагаемой системы коррекции представлена на рис. 1.

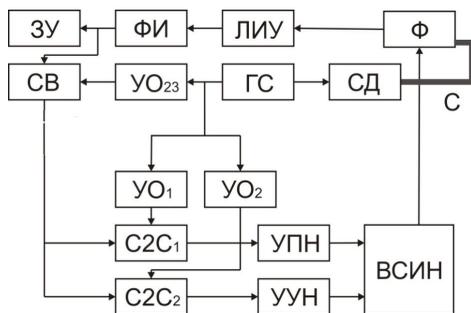


Рис. 1. Функциональная схема автоматической коррекции режима работы ФЭУ

В качестве опорного источника света, засвечивающего фотокатод ФЭУ, использовался светодиод (СД) с характерной длиной волны излучаемого света  $\lambda = 533$  нм. На СД с генератора ГС подаются прямоугольные импульсы напряжения с тремя значениями амплитуды (рис. 2), которые связаны следующими соотношениями:

$$U_1 < U_2 < U_3; \quad U_2 - U_1 = U_3 - U_2. \quad (1)$$

Число импульсов в единицу времени с амплитудой  $U_1, U_2, U_3$  будет соответственно  $N_1, N_2, N_3$ , при этом  $N_1 = N_2 = N_3$ . Импульсы света СД посредством световода С засвечивают катод фотоэлектронного умножителя Ф. Импульсы напряжения с выхода Ф усиливаются линейным импульсным усилителем ЛИУ и подаются на формирователь импульсов ФИ. Сформированные по амплитуде и длительности импульсы

подаются на схему вычитания СВ. С помощью устройства отбора УО<sub>23</sub> отбираются с генератора импульсы N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub> и подаются на второй вход схемы вычитания. Если запоминающее устройство ЗУ регистрирует импульсы N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>, то на выходе СВ число импульсов будет:

$$N_2 + N_3 - (N_2 + N_3) = 0. \quad (2)$$

В этом случае корректировка режима работы фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) не требуется.

Если ЗУ регистрирует N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>, то на выходе СВ число импульсов определится соотношением:

$$N_1 + N_2 + N_3 - (N_2 + N_3) = N_1. \quad (3)$$

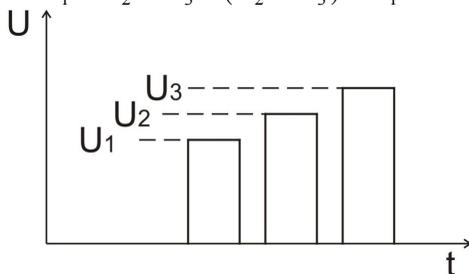


Рис. 2. Импульсы напряжения на выходе генератора ГС

В этом случае требуется уменьшить напряжение на диодной системе ФЭУ.

Если ЗУ регистрирует только импульсы N<sub>3</sub>, то на выходе СВ число импульсов определится выражением:

$$N_3 - (N_2 + N_3) = N_2. \quad (4)$$

В этом случае требуется повысить напряжение, подаваемое на ФЭУ.

Импульсы с выхода СВ подаются на схемы совпадения С2С<sub>1</sub> и С2С<sub>2</sub>. На вторые входы названных схем подаются импульсы N<sub>1</sub> и N<sub>2</sub> соответственно с выходов устройств отбора импульсов УО<sub>1</sub>, УО<sub>2</sub>. Импульс совпадения С2С<sub>1</sub> подается на устройство понижающее напряжение (УПН) высоковольтного стабилизированного источника напряжения (ВСИН) и соответственно понижается напряжение на диодной системе ФЭУ. Импульс совпадения С2С<sub>2</sub> подается на устройство увеличивающее напряжение (УУН).

Разработанная система автоматической корректировки режима работы ФЭУ включается периодически на 1-2 секунды, в течение которых вход ЗУ блокируется.

Отмеченные выше изменения напряжения позволяют автоматически корректировать режим работы ФЭУ.

