

## Сканер электростатического поля

Кузнецов Н.В., Романова Т.Н., Скуйбин Б.Г., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
pusher08@rambler.ru, rtn@bmstu.ru, bgscuibin@yandex.ru

### Аннотация

В данной статье рассматривается программно-технический комплекс, разработанный для выполнения лабораторной работы по исследованию электростатического поля в рамках курса физики. Созданный сканер позволяет автоматизировать процесс сбора большого количества данных о конфигурации поля, обычно проводимый вручную. В специально разработанном приложении поле наглядно визуализируется в виде цветовой карты, есть возможность программно построить эквипотенциальные и силовые линии поля.

### 1 Введение

Одними из наиболее часто предлагаемых для выполнения студентами лабораторных работ по курсу физики являются лабораторные работы по изучению электростатического поля. Они позволяют обучающимся получить практическое представление о структуре электрического поля, создаваемого неподвижными заряженными телами в вакууме.

Стандартный метод исследования в таких работах — построение эквипотенциальных поверхностей и силовых линий поля. Для моделирования электростатического поля используется аналогия между полем, созданным заряженными телами в вакууме, и электрическим полем постоянного тока, текущего в однородной среде.

Между соотношениями, характеризующими стационарное электрическое поле постоянных токов в проводящей среде, и соотношениями, характеризующими электростатическое поле в диэлектрике, можно провести формальную аналогию.

Соотношения для электрического поля токов в проводящей среде:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0; \int_A^B \mathbf{E} d\mathbf{l} = U_A - U_B;$$

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}; \operatorname{div} \mathbf{J} = 0; \int_S \mathbf{J} d\mathbf{s} = \Delta i.$$

Для электростатического поля в диэлектрике:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0; \int_A^B \mathbf{E} d\mathbf{l} = U_A - U_B;$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}; \operatorname{div} \mathbf{D} = 0; \int_S \mathbf{D} d\mathbf{s} = \Delta q.$$

Эти соотношения формально совпадут, если заменить вектор электрического смещения  $\mathbf{D}$  вектором плотности тока  $\mathbf{J}$ , электрический заряд  $q$  током  $i$  и абсолютную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  удельной проводимостью  $\gamma$  [Демирчян и др., 2009].

Поля удовлетворяют одним уравнениям, и в них выполняются граничные условия для сходных величин, а значит совокупность эквипотенциальных и силовых линий в этих двух полях будет одинаковой (картины поля будут совпадать).

Исследование поля производится следующим образом: электроды некоторой конфигурации, на которые подается напряжение, помещают в среду с низкой проводимостью. Замер потенциала поля осуществляется с помощью зонда, подключаемого к измерительному прибору (вольтметру).

Существующие лабораторные работы основываются на проведении измерений потенциала в большом количестве точек вручную. Чаще всего используется электролитическая ванна, заполненная жидким электролитом, в которую помещают электроды под напряжением. Построение эквипотенциальных поверхностей производится с помощью поиска точек поля, имеющих одинаковый потенциал.

Такой подход дает только общее представление об электростатическом поле и малоприменим для исследования полей, создаваемых проводниками сложной конфигурации. Поэтому было решено автоматизировать процесс сбора и обработки данных о потенциале в точках поля с помощью разработки специальной экспериментальной установки и программного обеспечения.

## 2 Техническая часть

### 2.1 Плата с графитовым напылением

В качестве слабопроводящей среды используется графитовое покрытие, напыляемое на текстолитовую плату с проводниками. На рис. 1 показан пример конфигурации проводников на такой плате. К проводнику-точке подводится плюс напряжения, к проводнику-линии – минус. Для наглядности на схему наложена цветовая карта отсканированного электростатического поля.

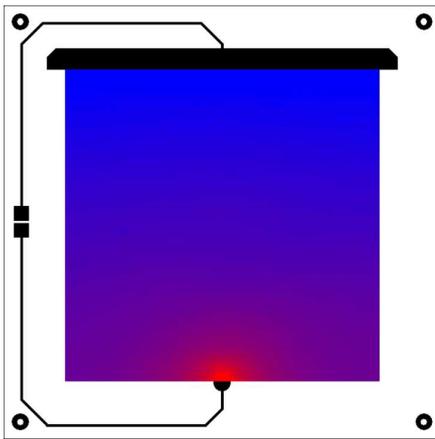


Рис. 1. Схема расположения проводников на исследуемой плате

### 2.2 Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 2), устанавливаемая на плату, представляет собой координатный стол, по которому перемещается щуп, считывающий напряжение между точкой на покрытии платы и заземленным проводником. Собранные данные поступают в компьютер, где анализируются и визуализируются специальным приложением.

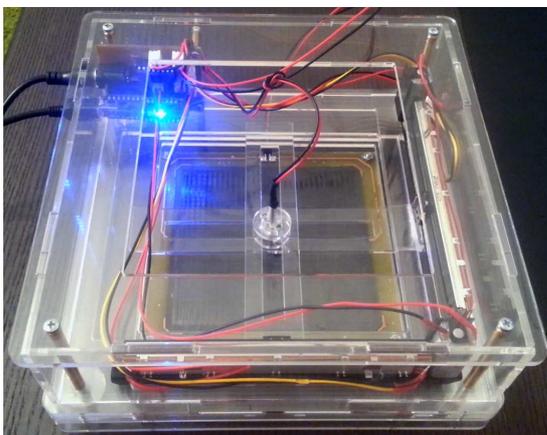


Рис. 2. Экспериментальная установка

Координатный стол был смоделирован в программе SolidWorks 2013 и изготовлен с помощью лазерной резки из трехмиллиметрового оргстекла (рис. 3).

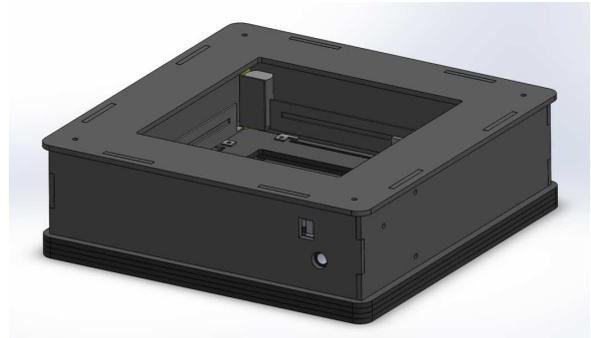


Рис. 3. Модель установки

Для перемещения щупа по плоскости и определения его позиции используются два моторизованных потенциометра (рис. 4). Движки потенциометров присоединены к направляющим (осей X и Y), на пересечении которых расположен щуп. В потенциометры встроены моторы для перемещения движков.



Рис. 4. Моторизованный потенциометр

Подаваемое на моторы напряжение регулируется драйвером электродвигателей с двумя выходами L293D (рис. 5).



Рис. 5. Микросхема L293D

Управление установкой и пересылка данных на компьютер осуществляется микроконтроллерной платой Arduino Nano (рис. 6).

Принципиальная схема установки представлена на рис. 7.



Рис. 6. Arduino Nano

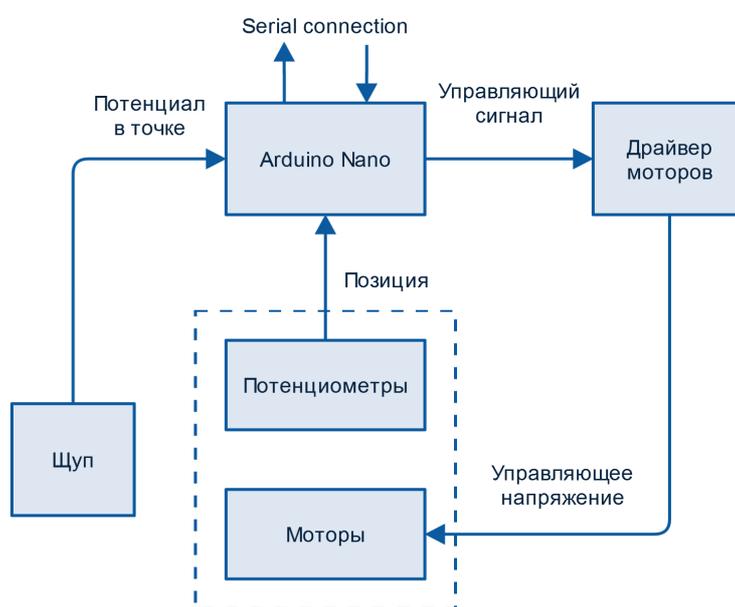


Рис. 7. Принципиальная схема установки

### 2.3 Печатная плата

Arduino Nano, драйвер двигателей, а также все необходимые разъемы для подключения питания, потенциометров и моторов установлены на специально изготовленную печатную плату. Рисунок платы (рис. 8) создан в программе DipTrace. Для изготовления применялась «лазерно-утюжная технология»: рисунок платы распечатан на лазерном принтере, после чего тонер перенесен на фольгированный текстолит с помощью ламинатора, разогретого до 180 градусов. Травление платы производилось в растворе перекиси водорода с добавлением лимонной кислоты и поваренной соли.

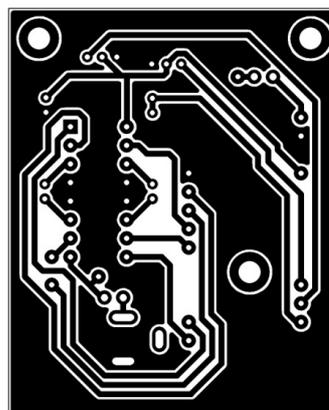


Рис. 8. Рисунок печатной платы

### 3 Программная часть

#### 3.1 Управляющая программа экспериментальной установки

Управляющая программа для установки была написана в интегрированной среде разработки ArduinoIDE. Используемый язык программирования основан на C/C++.

Созданные классы:

##### 1. Motor

Через методы данного класса осуществляется управление моторами потенциометров (задание направления и скорости вращения). При инициализации задаются выводы контроллера, подключенные к драйверу для управления мотором.

##### 2. PID

Пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор.

Основная задача в управлении установкой – перемещение щупа в заданную позицию. Так как в установке применяются обыкновенные DC-двигатели, система обладает большой инерционностью. С помощью ПИД-регулятора можно добиться плавной работы координатного стола. Во время каждой итерации на вход регулятора подается информация о текущей и требуемой позиции, на выходе получается величина управляющего сигнала для мотора.

При инициализации объекта данного класса указываются коэффициенты для составляющих P, I и D регулятора (подбираются экспериментально).

##### 3. SlidePot

«Моторизованный потенциометр». Обеспечивает взаимодействие объектов классов Motor и PID.

##### 4. CoordinateTable

«Координатный стол». Объединяет в себе два объекта класса SlidePot.

Рабочая область установки рассматривается как матрица точек (64 на 64, разрешение сканирования может быть изменено). Щуп «змейкой» обходит все точки. При достижении очередной точки считывается потенциал, информация отправляется на компьютер.

#### 3.2 Приложение для компьютера

Программа разработана в среде Embarcadero RAD Studio.

В плату Arduino встроены контроллер для последовательной передачи данных, который может использоваться для связи с компьютером. На компьютере соответствующее соединение представлено виртуальным COM-портом. Для упрощения работы с портом используется свободно распространяемый компонент ComDrv32. С его помощью производится отправка команд на экспериментальную установку и получение от нее данных в процессе сканирования.

Отсканированное электростатическое поле отображается в приложении с помощью «цветовой карты» (в точках с низким потенциалом изображение синее, при повышении потенциала цвет постепенно переходит в красный). Для исследования поля на данный момент реализованы функции построения эквипотенциальных и силовых линий (пользователь выбирает некоторую точку поля, и через нее программно строится соответствующая линия).

##### 3.2.1 Интерфейс

На рис. 9 обозначены основные элементы интерфейса приложения:

1 – Графическое отображение электростатического поля. По нажатию на графическую область через указанную точку строится эквипотенциальная (желтый цвет) или силовая линия поля (голубой цвет).

2 – Управление подключением к экспериментальной установке. Отображение статуса подключения.

3 – Управление процессом сканирования.

4 – Выбор построения эквипотенциальных или силовых линий поля. Кнопка очистки графической области от линий.

5 – Меню сохранения или загрузки отсканированного поля.

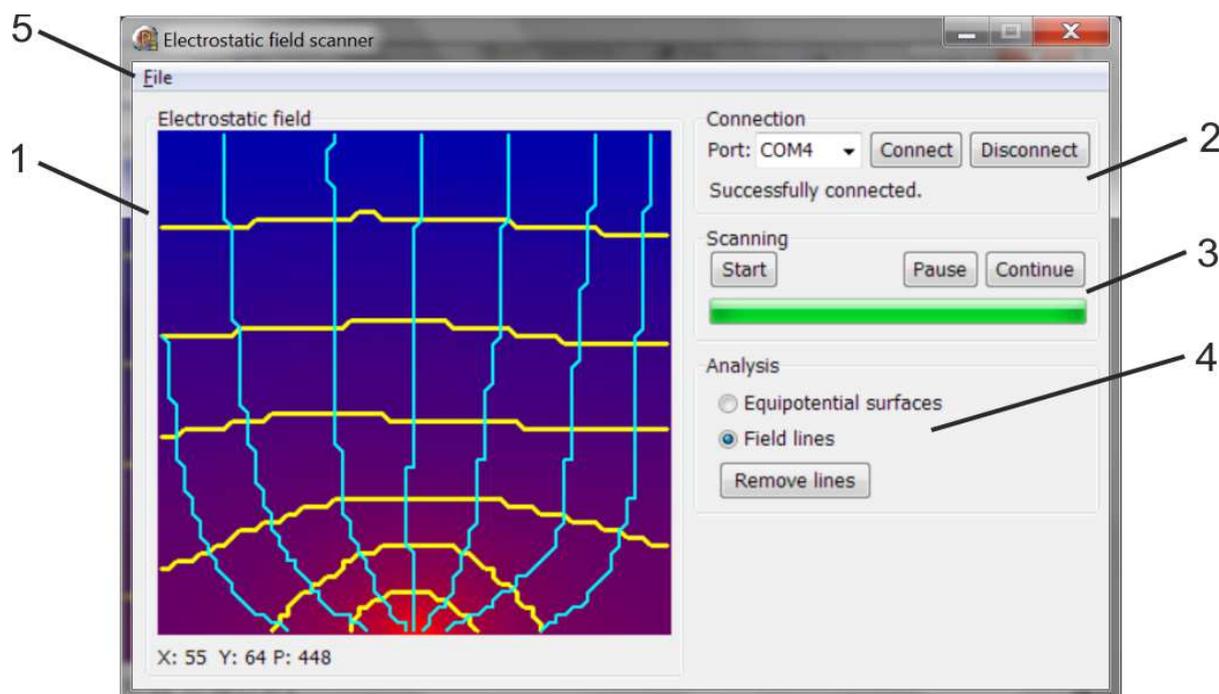


Рис. 9. Интерфейс приложения

### 3.2.2 Анализ поля

Нажимая на графическую область, пользователь задает стартовую точку для построения эквипотенциальной или силовой линии поля. Из нее пошагово в две стороны начинает строиться соответствующая линия. Процесс продолжается до тех пор, пока линия не дойдет до границы поля или не замкнется. На каждом шаге построения рассматривается квадрат 3 на 3 точки (центральная точка – текущая). Исходя из потенциалов в этих точках, вычисляется вектор градиента поля. Если строится силовая линия поля, то линия продолжается по направлению градиента, если эквипотенциальная, то перпендикулярно градиенту.

## 4 Заключение

В ходе данной работы был создан программно-технический комплекс для изучения электростатического поля. В отличие от существующих комплектов для лабораторных работ по данной теме, требующих от студентов больших затрат времени на снятие данных о конфигурации поля, разработанная экспериментальная установка позволяет получить подробную и наглядную картину поля менее чем за 30 секунд. Ос-

новное направление дальнейшего развития разработки – увеличение интерактивности компьютерного приложения. Например, студенту может быть предложено по отсканированным данным «нарисовать» на экране предположительный вид эквипотенциальных и силовых линий поля, а затем сравнить результат с картиной, полученной с помощью программного анализа. При небольших доработках система также может быть использована, например, для изучения магнитных полей.

## Список литературы

[Демирчян и др., 2009] Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Том 3. – Питер, 2009.