

*Научная статья*

ББК 74.262.23

УДК 372.853

С. В. Марков

ДОСТУПНАЯ ЦИФРОВАЯ ЛАБОРАТОРИЯ  
НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ *ARDUINO MEGA 2560*  
ДЛЯ УЧЕБНОГО ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Показана возможность создания в совместной проектной деятельности школьного учителя и обучающихся современной цифровой лаборатории на базе микроконтроллерной платформы *Arduino MEGA 2560*, предназначенной для демонстрационного и лабораторного физического эксперимента.

*Ключевые слова:* микроконтроллерная плата *Arduino MEGA 2560*, цифровая физическая лаборатория, цифровые датчики, натурный компьютерный эксперимент по физике.

S. V. Markov

ACCESSIBLE DIGITAL LABORATORY BASED ON  
THE *ARDUINO MEGA 2560* PLATFORM  
FOR EDUCATIONAL PHYSICS EXPERIMENT

The possibility of creating a modern digital laboratory based on the microcontroller platform *Arduino MEGA 2560*, designed for demonstration and laboratory physics experiment, in the project activity of a teacher and students is shown.

*Keywords:* *Arduino MEGA 2560* microcontroller board, digital physics laboratory, digital sensors, full-scale computer physics experiment.

DOI: 10.62957/2307-5457-2024-3-52-66

Основой большинства учебных экспериментальных установок являются электроизмерительные приборы. От их качества и возможностей во многом зависит методика проведения эксперимента и достоверность получаемых результатов. Новые подходы к проведению лабораторного физического эксперимента на уроках физики, а также в организации исследовательской и проектной работы школьников открывает использование доступных микроконтроллеров в учебных приборах.

В современной технике и электронике широкое применение находят микроконтроллеры, которые позволяют управлять всеми типами систем и устройств. Микроконтроллеры используются во всей современной бытовой технике, робототехнике, медицинских приборах, автомобилях и многих других областях, поэтому знакомство и

изучение принципов работы, возможностей и способов применения микроконтроллеров является существенным элементом обучения школьников.

Важным источником учебного познания в школьном обучении физике является учебный эксперимент [1]. Важность и практическая ценность проведения эксперимента для обучающихся заключается в том, что он является отражением научного подхода к изучению физических явлений [2].

Повысить заинтересованность учащихся в учебном эксперименте можно, например, при разработке учебных лабораторий с применением доступных микроконтроллеров [3, 4, 5] в рамках дополнительного образования технического направления. В данной статье подробно рассматривается возможность создания в условиях школы аналога компьютерной лаборатории на базе платформы *Arduino MEGA 2560*, которая обсуждалась нами ранее в докладе [6] и является более усовершенствованной по сравнению с рассмотренной в статье [7]. Основное отличие микроконтроллерной платы *Arduino MEGA 2560* от *Arduino UNO* — это наличие большего количества пинов, что позволяет подключать больше датчиков и исполнительных устройств.

Ранее созданные нами программы к приборам представляли отдельные *скетчи*, которые надо было каждый раз загружать в контроллер перед проведением эксперимента при работе с различными датчиками. Это приводило к заметной задержке во времени.



Рис. 1. Общий вид прибора [6]

В настоящее время на базе микроконтроллерной платы *Arduino MEGA 2560* разработана программа, которая способна объединять все разработанные минипрограммы (функции) к различным датчикам и измерительным устройствам и интегрировать в одну общую программу. Построенная таким образом структура программы позволяет размещать минипрограммы управления большим количеством различных датчиков, которые учащийся может выбрать в зависимости от вида подключенного устройства.

Для проведения эксперимента достаточно запустить программу в среде *PascalABC.NET*, *Python* или *Processing* (в нашем случае они используются для отображения информации), а минипрограмму, которая необходима для работы с датчиком, выбирают с помощью *энкодера*. Для удобства работы названия функций, которые обеспечивают работу подключенных устройств, распечатываются на экране дисплея при вращении энкодера. Если планируется использование электронной таблицы *Excel*, то необходимо запустить среду разработки *Arduino-IDE* и зайти в монитор последовательного порта (*Serial Monitor*). На рис. 1 изображен общий вид описываемого устройства, а на рис. 2 изображена общая схема шлейфов и подключенных модулей к микроконтроллерной плате *Arduino MEGA 2560*.

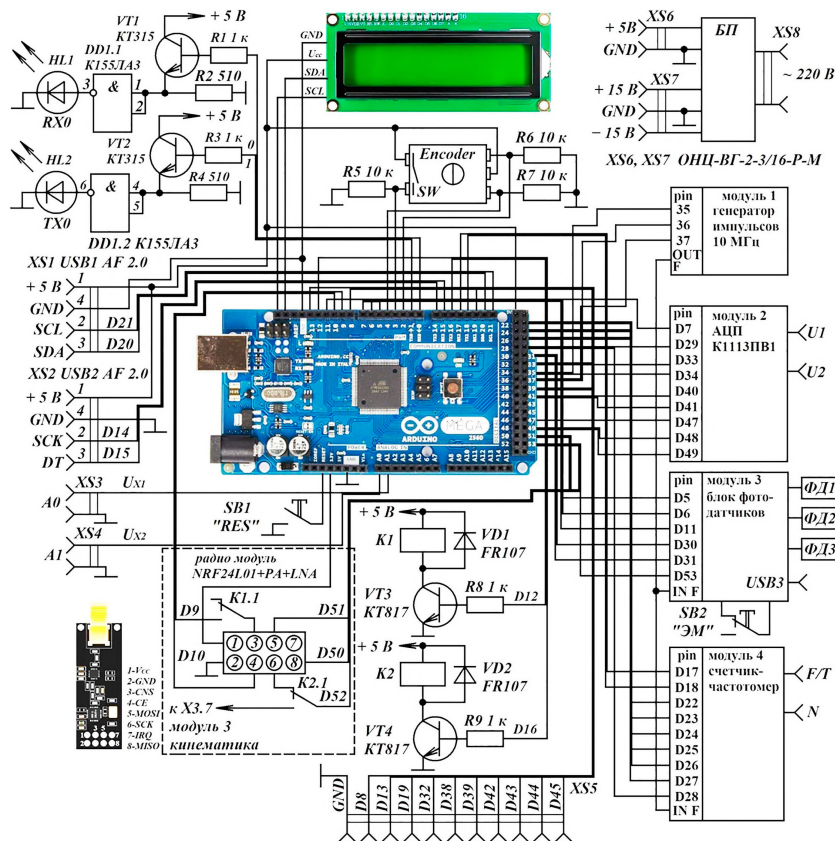


Рис. 2. Общая схема шлейфов и подключенных модулей к микроконтроллерной плате *Arduino MEGA 2560* [6]

В конструкцию прибора включены пять модулей — генератор импульсов стабильной частоты, вольтметр на базе АЦП *K1113ПВ1*, блок фотодатчиков, счетчик–частотомер и радиомодуль *NRF24L01+*. Управление всеми модулями производится микроконтроллерной платой *Arduino MEGA 2560*.

Генератор предназначен для получения прямоугольных импульсов стабильной частоты, позволяющих методом их счета измерять с достаточно высокой точностью длительность промежутков времени, период и частоту электрических импульсов. Выбор нужной частоты производится автоматически по программе с помощью встроенного мультиплексора *K155КП7*.

Применение АЦП *K1113ПВ1* позволяет без резистивных делителей напряжения измерять однополярное напряжение до 10 В и двухполярное напряжение до  $\pm 5$  В. Вольтметр позволяет измерять напряжение по двум каналам.

Блок фотодатчиков служит для определения скорости, ускорения, получения графиков движения, периода и частоты вращения диска. Первичными преобразователями механических видов движения в электрические являются встроенные фотодатчики.

Счетчик–частотомер предназначен для измерения частоты, периода и длительности электрических импульсов прямоугольной формы. Программой также заложен режим подсчета электрических импульсов, например, для измерения коротких интервалов времени затенения фотодатчиков. Счетчик–частотомер построен на базе двоично–десятичных счетчиков *K155ИЕ5* [8].

Радиомодуль *NRF24L01+* предназначен для приема и передачи данных по радиоканалу, что обеспечивает беспроводную связь между контроллером, различными датчиками и приборами физических величин. Радиомодуль работает на частоте 2,4 ГГц. В модуль связи *NRF24L01+* встроены сразу приемник и передатчик. Радиомодуль можно заменить на WiFi–модуль *ESP8266* или блютуз–модуль *HC-06*.

Разработанный и изготовленный прибор применяется в демонстрационном и лабораторном эксперименте при обучении физике. Весь перечень функций, имеющихся в настоящее время, представлен в табл. 1, использование которой обеспечивает более быстрый способ выбора нужной функции.

Таблица 1  
Перечень функций к датчикам

№	Название программы	Краткое пояснение измеряемой величины	Программа <i>PascalABC.NET</i>
1	mayatnik	Колебания маятника, построение графиков координаты и скорости колеблющегося тела в электронных таблицах <i>Excel</i>	монитор последовательного порта, электронная таблица <i>Excel</i>
2	dynamometer 50	Электронный динамометр с пределом 50 Н	dynamometer_50H_MEGA
3	dynamometer 10	Электронный динамометр с пределом 10 Н	dynamometer_10H_MEGA

4	diskspeed	Измерение скорости вращения точки на диске	время_MEGA
5	kinematika_2	Измерение времени движения тела от первого до второго фотодатчиков (метод двух фотодатчиков)	кинематика_2_MEGA
6	kinematika_1	Измерение времени пересечения фотодатчиков в двух различных точках (метод одного фотодатчика)	кинематика_1_MEGA
7	kinematika_3	Построение графика координаты и перемещения в электронных таблицах <i>Excel</i>	монитор последовательного порта, электронная таблица <i>Excel</i>
8	manometr	Измерение давления в сосудах, содержащих газы, с применением датчиков давления <i>MPX2010GP</i> , <i>MPX2100AP</i> , <i>MPX5700</i> , <i>MPX4115</i>	манометр <i>MPX5700</i> , манометр <i>MPX5700</i> <i>MPX4115</i> , гидродавление <i>HK12</i> , гидродавление <i>MPX2010GP</i> , манометр <i>MPX2100AP</i>
9	ultrasoung HC	Измерение скорости распространения звуковых волн в газообразных средах ультразвуковым преобразователем <i>HC-SR04</i>	ultrasoung HC
10	vesy 300 gr	Измерение массы тела на электронных весах до 300 г	весы_300г_MEGA
11	magnetometer	Измерение индукции магнитного поля датчиком Холла <i>SS495</i> , принцип суперпозиции индукции магнитного поля	магнитометр
12	VI_25V	Измерение напряжения и силы тока цифровым датчиком <i>ADS1115</i>	ампер_вольт_2К_MEGA
13	chastota1	Измерение частоты электрических импульсов. Предел измерения 1–65535 Гц	частота_MEGA
14	ultrasoung	Измерение скорости распространения звуковых волн в жидкостях и твердых телах	ultrasoung
15	Temperature	Измерение температуры по двум каналам с применением диодного датчика. Предел измерений от 0 °С до 120 °С	Температура_MEGA
16	BMP280	Измерение атмосферного давления и температуры цифровым датчиком BMP280	барограф BMP280
17	HH4000	Измерение относительной влажности воздуха аналоговым датчиком <i>HH4000</i> , измерение температуры цифровым датчиком <i>LM75</i>	гигрометр_HH4000_1
18	receiver250000	Прибор с радиомодулем <i>NRF24L01+</i> для проведения лабораторной работы «Изучение движения тела по окружности»	вращение диска
19	chastota2	Измерение частоты электрических импульсов. Предел измерения 10–655350 Гц	частота_MEGA
20	K1113PV1-1k	Одноканальный вольтметр постоянного тока на АЦП <i>K1113PB1</i> с пределом 10 В	ВОЛЬТ_2К_MEGA
21	PERIOD 1,0	Измерение периода электрических импульсов. Предел измерения 1 – $1,5 \cdot 10^{-5}$ с	период
22	PERIOD 0,1	Измерение периода колебаний электрических импульсов. Предел измерения 0,1 – $1,5 \cdot 10^{-6}$ с	период
23	K1113PV1~1k	Одноканальный вольтметр переменного тока на АЦП <i>K1113PB1</i> с пределом $\pm 5$ В	ВОЛЬТ_2К_MEGA
24	diskperiod	Измерение периода вращения диска	время_MEGA
25	kondensator	Измерение емкости конденсаторов по измеряемой частоте или периоду прямоугольных импульсов генератора на <i>NE555</i>	Condensator_pF_2_MEGA
26	K1113PV1-2k	Двухканальный вольтметр постоянного тока на АЦП <i>K1113PB1</i> с пределом 10 В	ВОЛЬТ_2К_MEGA
27	K1113PV1~2k	Двухканальный вольтметр переменного тока на АЦП <i>K1113PB1</i> с пределом $\pm 5$ В	ВОЛЬТ_2К_MEGA

28	IU_1kU2kI_10B	Двухканальный ампер-вольтметр постоянного тока на АЦП <i>K1113PB1</i> с пределом 10 В	ампер_вольт_2K_MEGA
29	IU_1kU2kI+/-5B	Двухканальный ампер-вольтметр постоянного тока на АЦП <i>K1113PB1</i> с пределом $\pm 5$ В	ампер_вольт_2K_MEGA
30	BME280	Измерение атмосферного давления, относительной влажности и температуры цифровым датчиком <i>BME280</i>	барограф <i>BME280</i>
31	uminduction	Исследование закона Фарадея для электромагнитной индукции	монитор последовательного порта, электронная таблица <i>Excel</i>
32	voltmeter_5B	Двухканальный вольтметр постоянного тока на базе АЦП микроконтроллера <i>ATmega2560</i> с пределом 5 В	ВОЛЬТ_2K_MEGA
33	rosa	Измерение точки росы и определение относительной влажности воздуха	ROSA_MEGA
34	wattmeter	Измерение активной мощности и затраченной электроэнергии в цепи переменного тока	Ваттметр <i>ADE7757_2_MEGA</i>
35	VAKH	Построение вольтамперных характеристик элементов электрической цепи	монитор последовательного порта, электронная таблица <i>Excel</i>

В качестве примера рассмотрим некоторые эксперименты с применением описываемого прибора.

**Демонстрационный эксперимент с получением графиков координат и скорости движения тела на уроках физики в 9 и 10 классах при изучении темы «Равноускоренное прямолинейное движение».** Получение графиков механических движений на экране монитора компьютера можно осуществить методами, описанными в [9, 10]. В демонстрационном эксперименте находят применения оба метода. В настоящее время метод, описанный в [10], усовершенствован и содержит небольшое количество деталей. Конструкция оптико-механической части осталась прежней. Электрические импульсы, формируемые фотодатчиками при движении тележки относительно *решета*, обрабатываются по разработанной программе для *Arduino MEGA 2560*. В основе данной программы заложен метод обработки сигналов, формируемых энкодером (табл. 2).

Для получения графиков движения тележки вдоль наклонной плоскости запускают среду разработки *Arduino-IDE* и заходят в монитор последовательного порта (*Serial Monitor*). Энкодером выбирают программу «кинематика 3», нажимают кнопку для ее запуска. Тележку приводят в движение вдоль наклонной плоскости нажатием кнопки электромагнита *SB2 «ЭМ»*. После пуска тележки на дисплей компьютера выводятся численные результаты количества подсчитанных импульсов счетчиком-частотомером, пропорциональные координате. Далее полученные результаты переводят в электронные таблицы *Excel* и в этой среде производят их обработку. На рис. 3 представлены графики движения тележки, к которой прикреплен резиновый шнур.



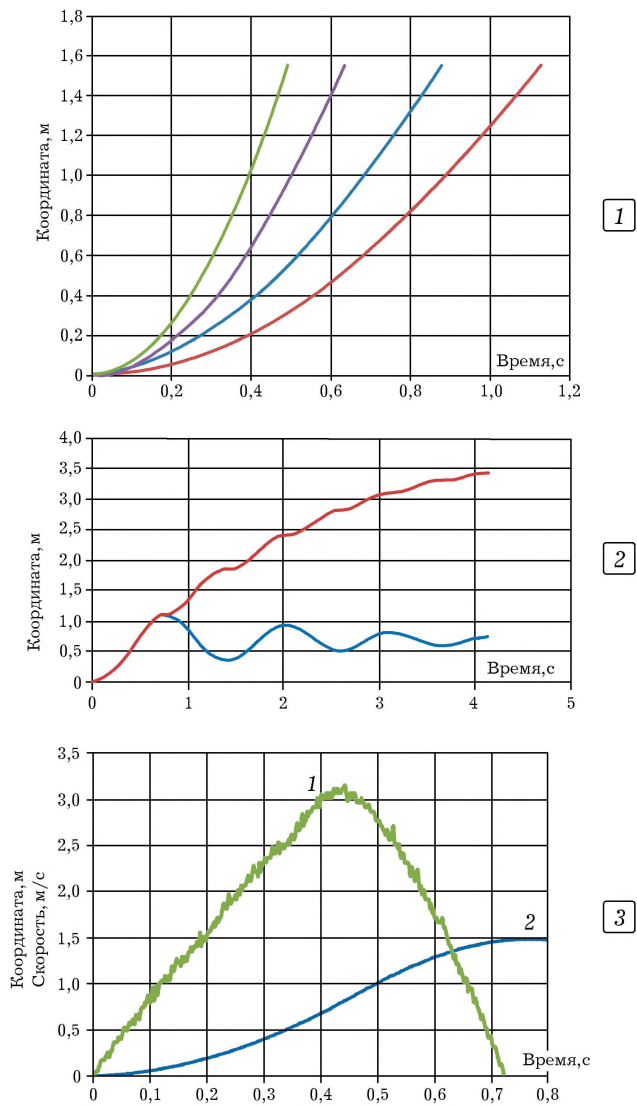


Рис. 3. Изучение механического движения: 1 – график изменения координаты скатывающейся тележки; 2 – график изменения координаты и пройденного пути колеблющейся тележки вдоль наклонной плоскости; 3 – график зависимости скорости (зеленая линия) и координаты (синяя линия) скатывающейся тележки при действии силы упругости



мате, с применением более современного оборудования по сравнению с уже рассмотренным [3]. Эксперимент проводится с применением микроконтроллерной платы *Arduino UNO*, мостового тензорезистивного датчика на 1 кг *YZC-133-1kG* (датчик силы) совместно с модулем *HX711* [12], датчика ускорения *ADXL345* [13] и радиомодуля *NRF24L01+* [14]. На рис. 4 представлена общая схема лабораторного оборудования.

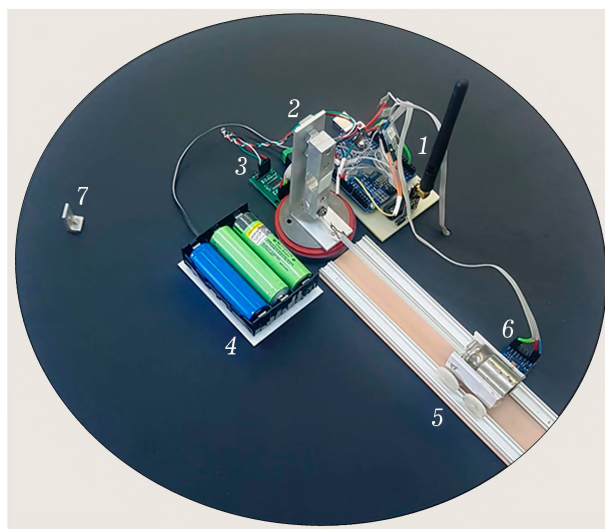


Рис. 4. Общая схема установки: 1 — микроконтроллерная плата *Arduino UNO* с радиомодулем *NRF24L01+*; 2 — мостовой тензорезистивный датчик на 1 кг; 3 — усилитель *HX711*; 4 — батарея питания; 5 — гирька на тележке; 6 — датчик ускорения *ADXL345*; 7 — ручка для вращения

В предлагаемой лабораторной работе школьники измеряют возникающее центростремительное ускорение вращающейся гирьки с помощью датчика ускорения *ADXL345*, рассчитывают по величине возникающей силы натяжения  $a = F/m$ , определяют через период  $T$  вращения  $a = 4\pi^2 R/T^2$ . На нижнюю сторону диска с помощью магнита устанавливают *оптические ворота*. К основанию прибора закреплены флажки, которые при вращении диска перекрывают излучение лазера оптических ворот, что приводит к формированию электрических импульсов. Каждый раз, когда лазерное излучение заблокировано, производится чтение датчика силы, датчика ускорения и фиксируется время. Электрические импульсы, формируемые блокировкой оптических ворот, позволяют определять период вращения диска. Анализ полученных результатов центростремительного ускорения предлагается провести по графикам, построенным в

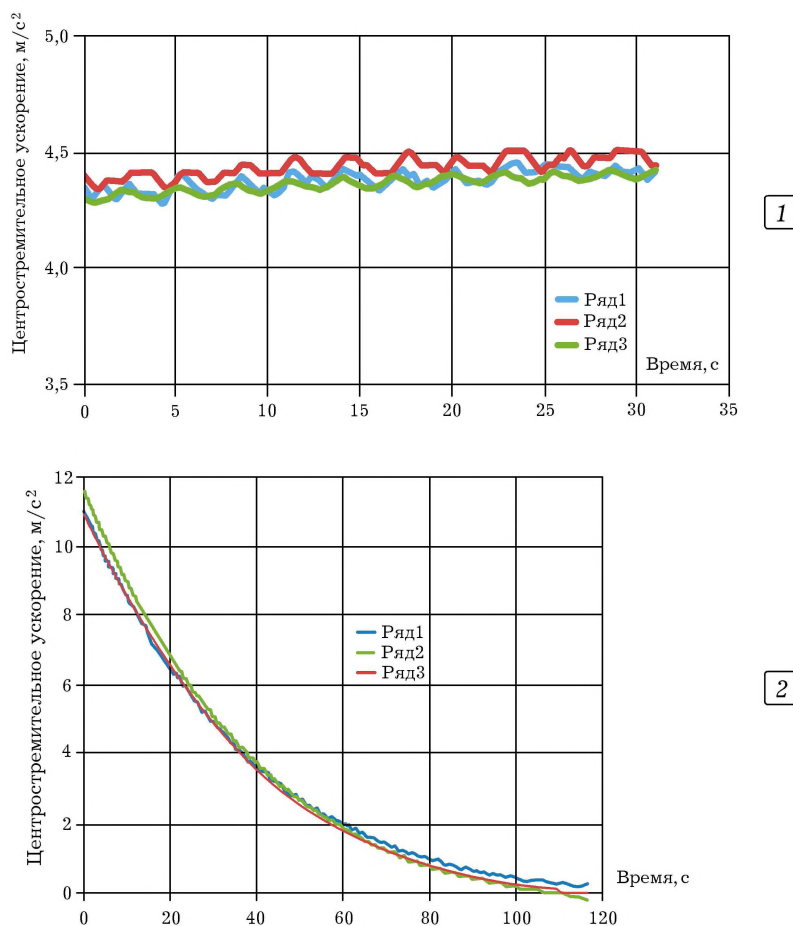


Рис. 5. Графики центростремительного ускорения при вращении диска: 1 — равномерное вращение; 2 — неравномерное вращение. Ряд 1 — данные датчика ускорения *ADXL345*; ряд 2 — результат, полученный по измерению силы; ряд 3 — результат, полученный по измерению периода вращения

электронных таблицах *Excel*. Для этого запускают среду разработки *Arduino-IDE* и заходят в монитор последовательного порта (*Serial Monitor*). Энкодером выбирают программу «*receiver250000*», нажимают кнопку для ее запуска. На рис. 5.1 и рис. 5.2 представлены графики измеренных и рассчитанных центростремительных ускорений равномерно вращающегося диска и предварительно раскрученного диска. По всем построенным графикам учащиеся проводят анализ и делают выводы.

Лабораторный эксперимент «Изучение явления электромагнитной индукции. Экспериментальное обоснование закона Фарадея для электромагнитной индукции» [15], проводимый учащимися 11 класса, выполняется с большим интересом. На рис. 6 показан общий вид экспериментальной установки. Для проведения эксперимента запускают среду разработки *Arduino-IDE*, заходят в монитор последовательного порта (*Serial Monitor*), энкодером выбирают программу «*uinduction*», нажимают кнопку для ее запуска. Учащиеся, ссылаясь на статью [16], получают данные эксперимента, обрабатывают данные в электронных таблицах *Excel* с последующим построением графиков (рис. 7). Полученные графики позволяют учащимся делать правильные выводы: 1) существует явление электромагнитной индукции, которое подчиняется закону Фарадея; 2) полярность ЭДС индукции и направление индукционного тока определяется правилом Ленца.

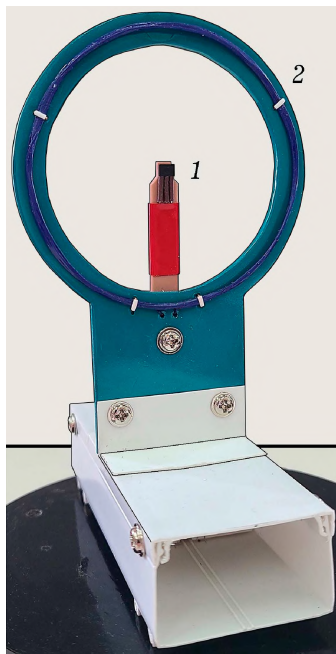


Рис. 6. Прибор для исследования закона Фарадея для электромагнитной индукции: 1 — датчик Холла *SS495A*; 2 — проволочный контур

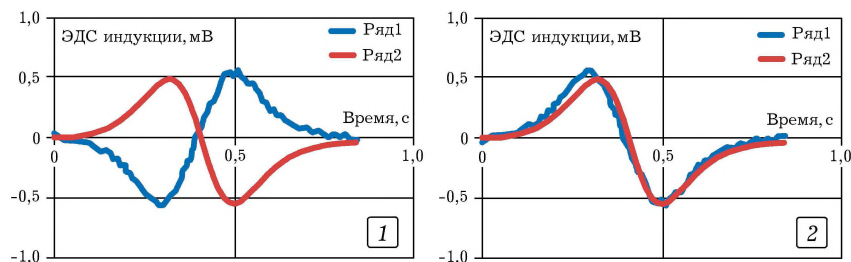


Рис. 7. Графики зависимости ЭДС индукции в катушке от времени: ряд 1 — рассчитанное значение ЭДС индукции по формуле  $\mathcal{E} = -\Delta\Phi/\Delta t$ ; ряд 2 — полученная экспериментальная кривая ЭДС в катушке

Электронный динамометр и весы с тензодатчиком и усилителем *HX711*. Тензодатчик (датчик, преобразующий величину деформации в электрический сигнал) и микросхема *HX711* позволяют

создавать устройства для измерения веса или давления, оказываемого на поверхность датчика, а затем передавать эти показания на плату *Arduino* [12] (рис. 8). Микросхема *HX711* позволяет с высокой точностью получать показания веса или давления, оказываемого на тензодатчик. В сети Интернет можно найти подробную информацию об использовании этих компонентов совместно с платой *Arduino* [17, 18, 19]. В наших конструкциях электронных динамометров используются мостовые тензодатчики с пределами измерений 1 кг и 5 кг (рис. 9).

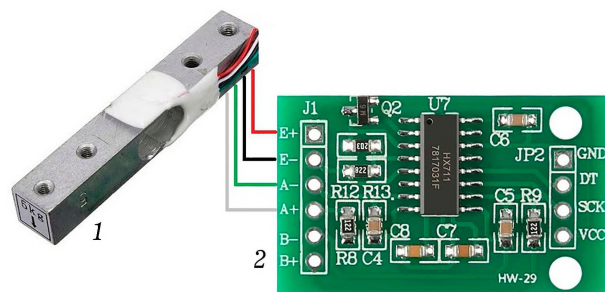


Рис. 8. Мостовой тензодатчик (1) с усилителем *HX711* (2)

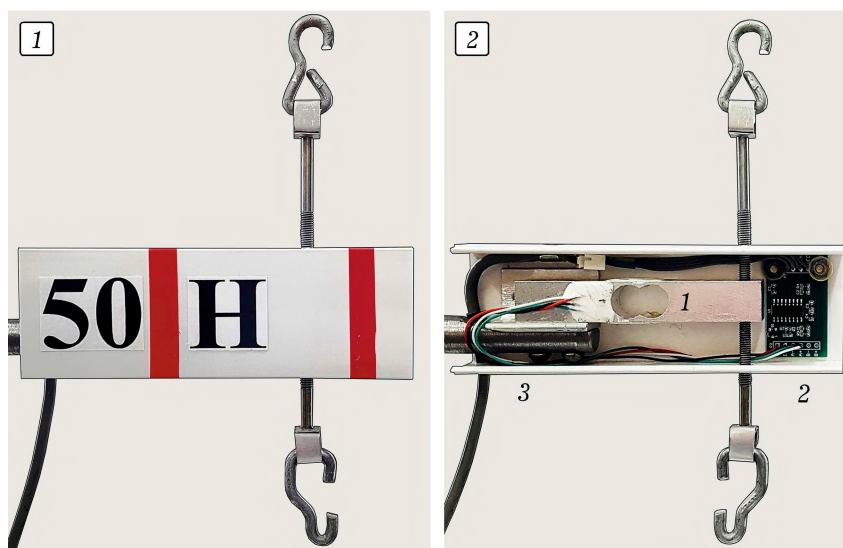


Рис. 9. Электронный динамометр: 1 — тензодатчик; 2 — модуль усилителя *HX711*; 3 — крепежный элемент

Электронные весы можно изготовить на основе электронных фабричных весов, в которых мостовой тензодатчик подключается к микросхеме *HX711*. Для этого необходимо разобрать весы, выпаять соединительные провода тензодатчика с платы весов и соединить их соответственно с контактами усилителя *HX711*. Усилитель размещают внутри корпуса весов.

Подключение электронного динамометра и весов производится посредством кабеля с *USB*-штекером.

Порядок работы с весами и динамометром заключается в следующем. В гнездо *XS1* вставляют *USB*-штекер. В среде программирования *PascalABC.NET* запускают нужную программу, например, программу «*dynamometer\_10H\_MEGA*», энкодером выбирают программу «*dynamometer 10H*» и нажимают кнопку для ее запуска.

Если получаемые показания динамометра или весов в отсутствии нагрузки отличны от нуля, то необходимо внести поправочный коэффициент в программы распечатки результатов измерения в среде *PascalABC.NET*, например, *dynamometer\_10H\_MEGA*.

Электронный динамометр успешно применяется в демонстрационном эксперименте, например, при изучении закона Архимеда, измерении силы Ампера, действующей на прямолинейный проводник и кольцевой ток.

**Исследование вольтамперных характеристик элементов электрической цепи** применяется на уроках физики в 10 классе при изучении темы «Постоянный электрический ток. Сопротивление», где учащиеся получают вольтамперные характеристики резисторов, а при изучении темы «Зависимость сопротивления металлов от температуры» получают вольтамперную характеристику лампы накаливания. Для получения вольтамперных характеристик запускают среду разработки *Arduino-IDE*, заходят в монитор последовательного порта (*Serial Monitor*), энкодером выбирают программу «*VAKH*», нажимают кнопку для ее запуска. Полученные результаты переводят в электронные таблицы *Excel* с последующим построением графиков (рис. 10) и их анализом. Обращают внимание учащихся на следующие факты: нелинейность по сравнению с вольтамперной характеристикой резистора; имеющийся выброс тока на начальном участке при увеличении напряжения и его отсутствие при уменьшении напряжения.

### Заключение

В статье рассмотрена небольшая часть экспериментальных работ, которые были разработаны и созданы совместно с учащимися 10 и 11 классов на занятиях элективного курса «Микроконтроллерные устройства». Программа разработана таким образом, что имеется возможность подключения новых датчиков. За счет

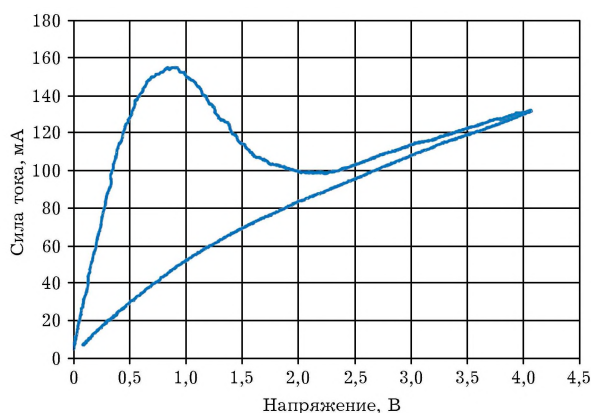


Рис. 10. Вольтамперная характеристика лампы накаливания

добавления новых модулей–датчиков число различных приборов может быть в дальнейшем расширено. Количество подключаемых датчиков зависит от оперативной памяти применяемого микроконтроллера, которую при необходимости можно увеличить. Примеры различных скетчей для *Arduino*, размещенные в открытых источниках, общедоступность данной среды, дают широкие перспективы для технического творчества учащихся и учителей. Интернет предлагает информацию по различным датчикам физических величин и программного кода к ним с подробным изложением на понятном для учащихся языке, что позволяет самостоятельно разобраться, каким образом происходит взаимодействие программы, микроконтроллера и подключаемых к нему устройств. Учащимся будет понятен алгоритм, как соединить подписанные разъемы устройства с соответствующим модулем, по возможности модернизировать его программный код и внести в общую программу. В сочетании с другими компонентами и датчиками, прибор позволяет проводить множество экспериментов в области конструирования электронных устройств, прикладного программирования, робототехники.

Рассмотренная в статье учебная цифровая лаборатория позволяет формировать познавательные интересы учащихся, так как она вызывает положительные эмоции учащихся в процессе познания ими нового при обучении, и поэтому обуславливает глубокую мотивацию учебной деятельности. Знания о физических явлениях, полученные школьниками в результате их собственной деятельности, служат для них доказательством объективности окружающего мира и истинности физических знаний. При этом формируются важные познавательные умения: наблюдать, анализировать, строить умозаключения и делать выводы, а в целом формируется экспериментальное мышление [20].

## ЛИТЕРАТУРА

1. ФГОС ООО утвержден приказом Министерства просвещения Российской Федерации от 31 мая 2021 г. № 287.
2. Разумовский В. Г., Майер В. В. Физика в школе. Научный метод познания и обучение. — М.: Владос, 2004. — 463 с.
3. Марков С. В., Марьин А. Н. Применение микроконтроллерной платы *Arduino UNO* в лабораторном практикуме по физике общеобразовательной школы // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Выпуск 30. — М.: ИСПО РАО, 2019. — С. 86–88.
4. Пигалицын Л. В. Школьная компьютерная физическая лаборатория для *USB*-порта ПК // Учебная физика. — 2010. — № 2. — С. 56–63.
5. Горчаков Л. В., Заседатель В. А. Компьютеризация трубки Кундта с переменной длиной // Учебная физика. — 2020. — № 4. — С. 43–49.
6. Марков С. В. Учебная цифровая лаборатория на базе микроконтроллерной платы *Arduino MEGA 2560* // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Выпуск 40. — М.: ИСПО РАО, 2024. — С. 102–104.
7. Марков С. В. Проектирование цифровой физической лаборатории на базе микроконтроллерной платы *Arduino UNO* // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Выпуск 38. — М.: ИСПО РАО, 2023. — С. 105–107.
8. Марков С. В. Учебный электронный счетчик-частотомер с компьютерной поддержкой // Учебная физика. — 2012. — № 5. — С. 41–50.
9. Майер В. В., Рудин А. С., Уваров А. А. Получение графиков движения на дисплее персонального компьютера // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Выпуск 24. — М.: ИСМО РАО, 2006. — С. 49–51.
10. Марков С. В. Применение натурального компьютерного эксперимента в исследовании движения тел // Учебная физика. — 2012. — № 5. — С. 35–40.
11. Мякишев Г. Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый и углубл. уровни / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский. — М.: Просвещение, 2020. — 432 с.
12. Тензодатчики и *HX711*. Руководство пользователя. — URL: [https://wiki.iarduino.ru/page/hx\\_711\\_with\\_tenzo/](https://wiki.iarduino.ru/page/hx_711_with_tenzo/) (Дата обращения: 18.10.2023).
13. Определение ориентации с помощью акселерометра *ADXL345* и *Arduino*. — URL: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/opredelenie-orientaczii-s-pomoshhyu-akselerometra-adxl345-i-arduino/> (Дата обращения: 26.11.2023).
14. Урок 26.4 Соединяем две *arduino* по радиоканалу через *nRF24L01+*. — URL: <https://lesson.iarduino.ru/page/urok-26-4-soedinyuem-dve-arduino-po-radiokanalu-cherez-nrf24l01/> (Дата обращения: 09.11.2023).
15. Мякишев Г. Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений: базовый и профил. уровни / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, В. М. Чаругин; под ред. В. И. Николаева, Н. А. Парфентьевой. — М.: Просвещение, 2010. — 399 с.
16. Марков С. В., Маркова О. Н. Демонстратор индукционного тока на основе адресной светодиодной ленты // Учебная физика. — 2020. — № 2. — С. 40–56.
17. АЦП для аналоговых весов *HX711* // <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/acp-dlya-analogovykh-vesov-hx711/>
18. Весы на *Arduino*, *HX711* и тензодатчике. — URL: <https://robotchip.ru/vesy-na-arduino-hx711-i-tenzodatchika/>
19. Подключение тензодатчика *HX711* к *Arduino*. — URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/tenzodatchiki-i-vesy-na-arduino-i-nh711/>
20. Майер В. В., Сауров Ю. А. Экспериментальное мышление: смыслы–ценности, черты, технология формирования // Учебная физика. — 2018. — № 4. — С. 45–65.

МКОУ «Гыинская СОШ»  
Кезского района  
Удмуртской Республики

Поступила в редакцию 06.05.24.