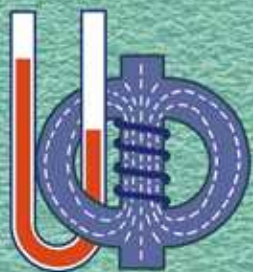


ISSN 2307-5457



# УЧЕБНАЯ ФИЗИКА

**3**  
**2020**



УДК 372.853

В. В. Майер, И. А. Васильев  
ЭЛЕКТРОННО–МЕХАНИЧЕСКАЯ  
АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Рассмотрены конструкция и технология изготовления автоколебательной системы типа электронно–механических часов. Изложена методика использования разработанного прибора на школьных уроках физики.

*Ключевые слова:* автоколебания, электронно–механические часы, конструкция, технология изготовления, демонстрации на школьных уроках.

Критика школьного учебника имеет смысл, если дано решение обнаруженной в учебнике проблемы. В статье [1], опубликованной в этом номере журнала, показано, что главный недостаток принятой в школьном учебнике [2] методики изучения автоколебаний состоит в отсутствии убедительного экспериментального обоснования теоретических сведений, сообщаемых на умозрительном уровне. В настоящей работе предлагается возможный вариант решения этой проблемы.

## 1. Введение

В учебном физическом эксперименте автоколебательная система типа электронно–механических часов впервые была использована, насколько нам известно, в качестве движителя сканирующего индикатора для демонстраций сантиметровых звуковых и электромагнитных волн еще в 1974 году [3]. Спустя два десятка лет в работе [4] было опубликовано описание электронно–механической автоколебательной системы осцилляторного типа, специально предназначенной для школьных опытов. Этот прибор состоит из трех основных элементов: источника энергии (батареи гальванических элементов), собственно колебательной системы (осциллятора) и устройства, регулирующего поступление энергии из источника в колебательную систему (клапана). Некоторое время частным предприятием «Аргон» выпускался для учебных заведений набор деталей, обеспечивающий самостоятельную сборку и разборку указанного прибора, а также постановку с ним по крайней мере 12 учебных экспериментов.

С точки зрения методики обсуждаемый прибор обладает существенными недостатками: 1) устройство его электронного клапана скрыто от учителя и обучающихся в залитом эпоксидной смолой корпусе; 2) клапан позволяет продемонстрировать только положительную обратную связь.

В настоящей работе рассмотрены принцип действия электроно-механической автоколебательной системы, технология изготовления современного варианта прибора, доступная для реализации во внеурочной проектной деятельности обучающихся, и методика использования этого прибора при изучении в школе автоколебаний.

## 2. Схема электронного клапана

Функциональная схема электронного клапана для возбуждения механических автоколебаний приведена на рис. 1. На ферромагнитный сердечник в одну сторону намотаны одинаковые обмотки или катушки  $L1$  и  $L2$ , начала которых обозначены точками. Первая из этих обмоток включена в коллекторную, а вторая — в базовую цепь транзистора  $VT1$ .

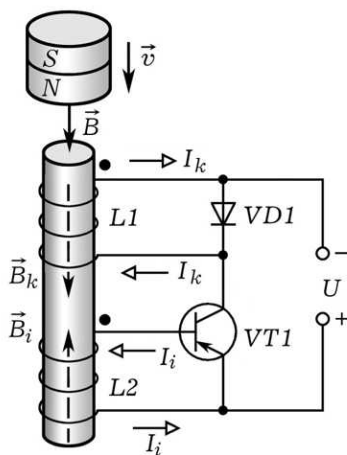


Рис. 1. Функциональная схема электронного клапана

Катушка  $L1$  зашунтирована диодом  $VD1$ . Если вместо диода  $VD1$  ввести конденсатор, то получится обычный транзисторный автогенератор с индуктивной обратной связью: катушка  $L1$  с конденсатором вместо диода образуют колебательный контур, катушка  $L2$  выполняет роль положительной обратной связи, транзистор  $VT1$  является усилительным элементом или клапаном, регулирующим поступление энергии из источника в

колебательный контур. Даже если не включать конденсатор, а просто убрать диод  $VD1$ , то схема будет генерировать, так как роль конденсатора выполняют междувитковая емкость катушки  $L1$  и другие паразитные емкости схемы.

Диод  $VD1$  необходим для предотвращения электрических автоколебаний устройства: он накоротко замыкает катушку  $L1$  в те полупериоды, когда через него течет ток в прямом направлении.

Таким образом, при включении источника питания электрические автоколебания в электронном клапане возникнуть не могут. Поэтому можно считать, что в исходном состоянии транзистор  $VT1$  закрыт, так как его база соединена с эмиттером через катушку  $L2$ . Закрытое состояние транзистора означает, что сила его коллекторного тока  $I_k$  равна нулю, то есть через катушку  $L1$  ток не идет.

### 3. Принцип действия электронного клапана

Рассмотрим теперь процессы, происходящие при изменении внешнего магнитного поля. Для определенности будем считать, что к верхнему концу сердечника катушек  $L1$  и  $L2$  северным полюсом приближается магнит (рис. 1). Тогда индукция магнитного поля  $\vec{B}$  направлена вниз и растет. В катушках  $L1$  и  $L2$  при этом возникают ЭДС индукции.

Если выводы этих катушек замкнуть, то по каждой из них пойдет индукционный ток, порождающий согласно правилу Ленца такое магнитное поле, которое противодействует изменению внешнего поля. Но катушка  $L1$  нагружена на диод  $VD1$ , который для ЭДС индукции включен в обратном направлении, поэтому по катушке  $L1$  ток не идет.

Катушка  $L2$  включена на переход эмиттер–база транзистора  $VT1$ . Для возникающей в катушке  $L2$  ЭДС индукции этот переход включен в прямом направлении, поэтому через катушку  $L2$  идет ток индукции  $I_i$ , создающий магнитное поле индукцией  $\vec{B}_i$ .

На базе транзистора  $VT1$  появляется отрицательный потенциал относительно эмиттера (рис. 1). При этом транзистор  $p$ – $n$ – $p$ -типа открывается, через его коллекторный переход и катушку  $L1$  идет ток коллектора  $I_k$ , создающий магнитное поле индукцией  $\vec{B}_k$ . Это поле направлено в ту же сторону и изменяется так же, что и магнитное поле  $\vec{B}$  приближающегося к сердечнику магнита. Поэтому оно передает магниту добавочный импульс, способствующий его движению.

Таким образом, ток, идущий по катушке  $L2$ , препятствует, а ток, идущий по катушке  $L1$ , способствует приближению магнита к сердечнику. Но коллекторный ток транзистора существенно

больше базового, поэтому в целом катушки  $L1$  и  $L2$  дополнительно притягивают приближающийся к ним магнит.

Если магнит удаляется от сердечника, будучи по-прежнему обращенным к нему северным полюсом, то полярность ЭДС индукции, возникающей на выводах катушки  $L2$ , меняется на противоположную, транзистор  $VT1$  закрывается, ток  $I_k$  по катушке  $L1$  не идет, и устройство не сообщает магниту никакого импульса.

Повернем магнит так, чтобы теперь к сердечнику был обращен его южный полюс. В этом случае, как нетрудно сообразить, при приближении магнита к сердечнику устройство не реагирует на это движение, а при удалении — подталкивает удаляющийся магнит, сообщая ему дополнительный импульс.

Поскольку ЭДС индукции определяется скоростью изменения магнитного потока, схема начинает работать описанным способом лишь при достаточно быстром движении магнита. Если скорость движения магнита сравнительно невелика, то устройство сообщает движущемуся магниту несколько импульсов. Объясняется это тем, что при отрывании транзистора  $VT1$  за счет положительной обратной связи схема стремится превратиться в генератор. В катушке  $L1$  возникает автоколебательный процесс, но он срывается диодом  $VD1$  после первого же полупериода. Поскольку магнит продолжает двигаться, возникает новый полупериод колебаний и т. д. В результате устройство передает движущемуся магниту несколько импульсов, способствующих его движению. Наконец, при очень маленькой скорости движения магнита ЭДС индукции, возникающая на концах катушки  $L2$ , оказывается недостаточной для открывания транзистора, и схема перестает работать.

#### 4. Конструкция и технология изготовления электронного клапана

Физический прибор, предназначенный для учебных опытов, должен удовлетворять трем основным требованиям: 1) обеспечить достаточно полное экспериментальное изучение тех физических явлений, для воспроизведения которых он создан; 2) обладать достаточной для учебных целей надежностью; 3) позволять обучающимся ознакомиться с устройством и принципом действия прибора. Конструкция учебной электронно-механической автоколебательной системы разработана с учетом перечисленных требований.

Осциллятором этой системы служит маятник, состоящий из держателя, шарикового или иного подшипника и дюралевого

стержня, на нижнем конце которого расположен керамический или неодимовый магнит. Держатель маятника закрепляют в муфте штатива. Длина стержня маятника может быть произвольной в пределах от примерно 10 до 50 см. Стержень маятника можно просто подвесить на оси, расположенной в держателе. Мы опускаем более подробное описание маятника, так как конструкцию этого осциллятора учащиеся под руководством учителя вполне в состоянии продумать и реализовать самостоятельно.

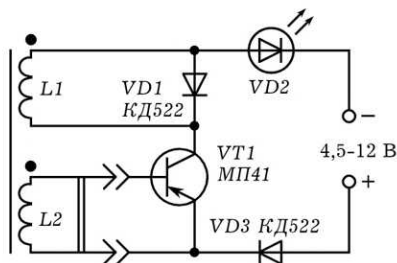


Рис. 2. Принципиальная схема электронного клапана

Основным элементом электронного клапана (рис. 2) является катушка, содержащая две одинаковые обмотки  $L1$  и  $L2$ , одновременно намотанные на ферромагнитном сердечнике в одну сторону проводами диаметром 0,12–0,14 мм в эмалевой лаковой изоляции. Точками на схеме обозначаются начала или концы обмоток. В качестве сердечника мы рекомендуем использовать отрезок ферритового стержня диаметром 8 мм и длиной 40–60 мм. На стержень надевают и приклеивают картонные щечки диаметром примерно 20 мм так, чтобы из образовавшейся катушки выставлялся конец сердечника длиной примерно 5 мм. За этот конец катушку закрепляют в патроне ручной дрели и, не спеша, наматывают на нее провода обмоток.

Клапан лучше всего собрать методом поверхностного монтажа на печатной плате, изготовленной из фольгированного гетинакса толщиной 1,5–2 мм (рис. 3). В приборе можно использовать маломощные транзисторы как  $p-n-p$ , так и  $n-p-n$ -типа. Однако германиевые транзисторы предпочтительнее кремниевых, так как открываются при меньшем токе базы. Важным элементом прибора является разъем, предназначенный для выводов одной из катушек (на рис. 2 это катушка  $L2$ ). Разъем должен иметь достаточно большие размеры, чтобы было удобно им пользоваться. Можно обе катушки снабдить разъемами, предотвращает паразитную генерацию устройства. Светодиод  $VD2$  индика-

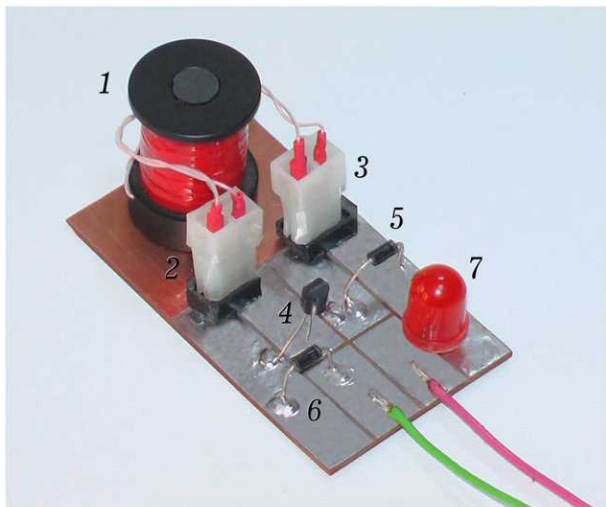


Рис. 3. Конструкция электронного клапана: 1 — катушка с двумя одинаковыми обмотками  $L1$  и  $L2$ ; 2 и 3 — разъемы для обмоток; 4 — транзистор типа КТ503; 5 и 6 — диоды типа 1N4002; 7 — светодиод любого типа

торный, своим свечением он показывает, что клапан потребляет энергию из источника. Диод  $VD3$  выполняет вспомогательную, но очень важную роль: он предотвращает выход электронного клапана из строя при неправильном включении источника питания. Все диоды маломощные и могут быть практически любых типов.

### 5. Методика использования электронно–механической автоколебательной системы на школьном уроке

Внешний вид электронно–механической автоколебательной системы, подготовленной для учебного эксперимента, показан на рис. 4. Кратко опишем серию демонстрационных опытов с этим прибором, убедительно подтверждающих качественную теорию автоколебаний в системах осцилляторного типа.

**Опыт 1. Свободные колебания маятника.** Выполняют серию опытов, напоминая школьникам уже известные им закономерности колебательного движения простого маятника.

1) На штатив подвешивают маятник с расположенными или неодимовыми магнитами (рис. 4). Маятник выводят из положения равновесия и отпускают. Учащиеся наблюдают, что маятник совершает свободные колебания, которые постепенно затухают.

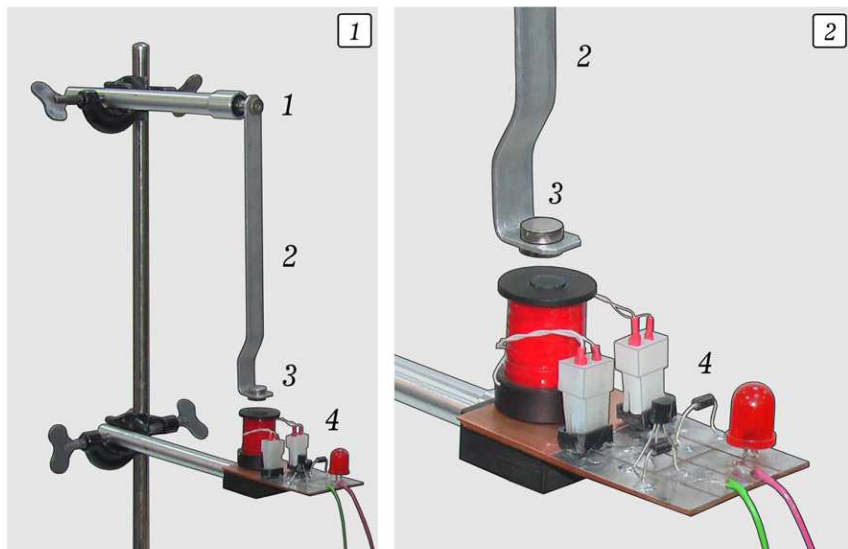


Рис. 4. Электронно–механическая автоколебательная система: 1 — небольшой шарикоподшипник; 2 — дюралевый стержень маятника; 3 — два небольших неодимовых магнита; 4 — электронный клапан

2) Показывают, что период свободных колебаний маятника определяется параметрами колебательной системы:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

где  $l$  — длина маятника,  $g$  — ускорение свободного падения. Зависимость периода колебаний от длины маятника подтверждают, сравнивая колебания маятников разной длины. Зависимость периода от ускорения свободного падения показывают, поднося к магнитному грузу маятника снизу постоянный магнит. В заключение демонстрируют независимость периода колебаний от массы груза маятника.

3) Выясняют, что затухание колебаний обусловлено потерями энергии, сообщенной маятнику при отклонении от положения равновесия. Для этого на стержень маятника канцелярской скрепкой подвешивают флажок с двумя крыльями, изготовленный из плотной бумаги.

4) Формулируют проблему: что нужно сделать, чтобы колебания стали незатухающими? Показывают, что проблема будет



решена, если маятник в нужные моменты времени периодически слегка подталкивать в направлении его движения. Выясняют, что лучше всего это делать, когда маятник проходит положение равновесия.

**Опыт 2. Действие клапана.** На штативе закрепляют клапан так, чтобы сердечник его катушек оказался под магнитом маятника на расстоянии примерно 5 мм. Включают питание прибора. При этом светодиод на мгновение вспыхивает, показывая, что в начальный момент через клапан идет ток, и гаснет. Поскольку светодиод не горит, ток через него не идет, следовательно, система не потребляет энергию от источника питания.

Взяв рукой маятник за стержень, быстро выводят его из положения равновесия. Если при таком удалении магнита маятника от сердечника клапана светодиод вспыхивает — значит, система получает энергию из источника. Показывают, что в этом случае при быстром возвращении маятника обратно к клапану светодиод не вспыхивает, следовательно, энергия не поступает в систему.

Переворачивают магнит на маятнике и вновь повторяют опыт. Теперь светодиод вспыхивает наоборот, когда магнит маятника приближается к сердечнику катушек клапана, и не вспыхивает при удалении магнита от сердечника.

Делают вывод: клапан обеспечивает поступление энергии в колебательную систему один раз за период колебаний: когда магнит маятника либо приближается к сердечнику катушек клапана, либо — при перемене полярности магнита — удаляется от него. Электронный клапан практически не потребляет энергии от источника питания в отсутствие или при медленном изменении внешнего магнитного поля.

**Опыт 3. Автоколебания маятника.** Слегка отклоняют маятник из положения равновесия и отпускают его. Учащиеся наблюдают, что амплитуда колебаний маятника постепенно возрастает до тех пор, пока не достигает такой величины, при которой маятник совершает стационарные колебания (рис. 5.1 и 5.2).

Вводят понятие автоколебательной системы, рисуют ее общую функциональную систему (рис. 1 в статье [1]) и показывают учащимся на схеме и на приборе источник энергии, осциллятор и клапан. Отмечают, что обратная связь обеспечивается движениями магнита над клапаном: при приближении магнита к клапану система потребляет из источника энергию, которую расходует в основном на притяжение приближающегося магнита. Переворачивают магнит на отогнутой части маятника проти-

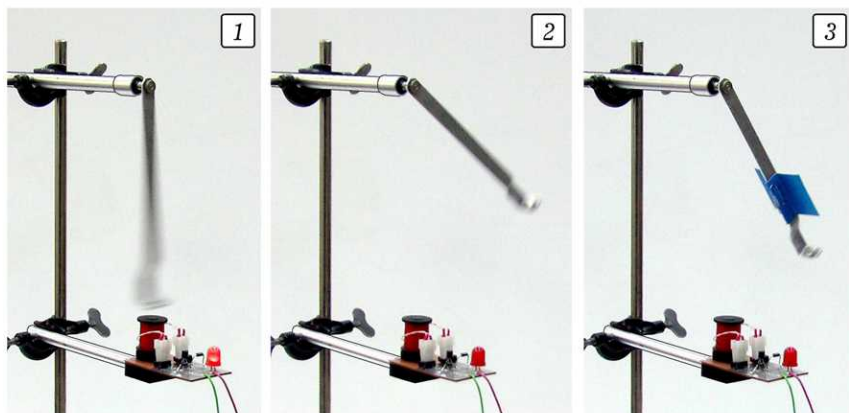


Рис. 5. Демонстрация автоколебаний электронно–механической системы: 1 — маятник движется слева направо и, проходя положение равновесия, получает импульс в направлении своего движения, при этом светодиод вспыхивает; 2 — максимальное отклонение маятника при автоколебаниях; 3 — при увеличении потерь энергии амплитуда автоколебаний уменьшается

воположным полюсом и показывают, что автоколебания имеют место и в этом случае. Теперь система потребляет энергию из источника при удалениях магнита от клапана и в эти моменты подталкивает его, способствуя поддержанию автоколебаний.

**Опыт 4. Обратная связь.** При введении и обосновании понятия обратной связи в автоколебательной системе выполняют серию простых опытов.

1) Запускают автоколебания маятника и замечают амплитуду его установившихся колебаний. Сообщают школьникам, что обратная связь, при которой поступления энергии в систему компенсируют ее потери, называется *положительной*.

2) Выключают источник питания, отклоняют маятник от положения равновесия на угол, соответствующий амплитуде автоколебаний в первой части опыта, и отпускают, замечая время, в течение которого колебания затухают.

3) С помощью разъема меняют местами концы одной из катушек клапана, включают питание, отклоняют маятник на отмеченный вначале опыта угол и отпускают. Обучающиеся наблюдают, что при каждом прохождении маятником положения равновесия светодиод вспыхивает, то есть система потребляет энергию из источника. Но колебания маятника при этом не только не нарастают, но и затухают быстрее, чем в случае свободных ко-

лебаний, когда источник вообще не включен. Делают вывод, что в последнем опыте обратная связь не способствует, а напротив, препятствует поддержанию колебаний системы. Такая обратная связь называется *отрицательной*.

**Опыт 5. Зависимость амплитуды автоколебаний от энергии, поступающей в систему.** Получают автоколебания маятника при одной включенной батарейке на 4,5 В и обращают внимание учащихся на амплитуду автоколебаний. Последовательно с первой включают вторую такую же батарейку. При этом амплитуда автоколебаний возрастает. Делают вывод, что чем больше поступления энергии в колебательную систему от источника, тем больше амплитуда автоколебаний.

**Опыт 6. Зависимость амплитуды автоколебаний от потерь энергии.** В системе возбуждают автоколебания. За маятником располагают подходящий предмет, отмечающий максимальное отклонение маятника из положения равновесия. На стержне маятника скрепкой закрепляют тормозящий флажок из плотной бумаги (опыт 1.3). Вновь возбуждают автоколебания и отмечают, что их амплитуда уменьшилась (рис. 5.3). Делают вывод, что чем больше потери энергии в колебательной системе, тем при прочих равных условиях меньше амплитуда автоколебаний.

Из опытов 3, 4 и 5 делают общее заключение, что при возбуждении автоколебательной системы амплитуда нарастает до тех пор, пока поступления энергии из источника не будут скомпенсированы потерями за счет трения в широком смысле этого слова.

**Опыт 7. Связь частоты автоколебаний с частотой свободных колебаний осциллятора.** Вместе с обучающимися выясняют, что частота автоколебаний определяется частотой свободных колебаний осциллятора. Доказывают это, заменяя использованный в опытах маятник на более длинный или более короткий.

## 6. Заключение

1. В статье показано, что для экспериментального обоснования справедливости элементарной теории автоколебаний, представленной в школьном учебнике, целесообразно использовать электронно-механическую автоколебательную систему типа электронных маятниковых часов. В этой системе обучающиеся невооруженным глазом непосредственно видят источник энергии, собственно колебательную систему и звено обратной связи. На опыте они убеждаются в существовании положительной и

отрицательной обратной связи. Вся совокупность демонстрационных экспериментов позволяет школьникам выяснить условия существования автоколебаний и осознать общие закономерности автоколебательных процессов.

2. Пункты 1–4 статьи имеют своей целью сообщение информации, необходимой и достаточной для организации проектной деятельности обучающихся по созданию и исследованию автоколебательной системы типа электронных часов. Такая работа интересна и доступна школьникам, а ее результат находит непосредственное практическое применение на уроках физики, способствуя активизации познавательной деятельности класса.

3. На уроке по изучению автоколебаний достаточно показать и объяснить три демонстрационных эксперимента: *Опыт 2. Действие клапана*; *Опыт 3. Автоколебания маятника*; *Опыт 4. Обратная связь*. Впрочем, демонстрация всех описанных в статье экспериментов занимает на уроке не более 10 минут, которые всегда найдутся, если класс проявляет хотя бы минимальный интерес к физике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-013-00157. *Acknowledgments*: The reported study was funded by RFBR, project number 20-013-00157.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Майер В. В. Автоколебания в школьном учебнике физики // Учебная физика. — 2020. — № 3. — С. 12–16.
2. Мякишев Г. Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, В. М. Чаругин; под ред. Н. А. Парфентьевой. — М.: Просвещение, 2016. — 432 с. — (Классический курс).
3. Майер В. В. Сканирующий индикатор для демонстраций сантиметровых звуковых и электромагнитных волн // Успехи физических наук. — 1974. — Т. 114. — Вып. 1. — С. 151–152.
4. Майер В. В., Майер Р. В. Демонстрации при изучении автоколебаний // Сб. «Учебный эксперимент по колебательным и волновым процессам». Выпуск 8. — М.: Школа-Пресс, 1996. — С. 39–52.