

Демонстрации при изучении автоколебаний

Автоколебательная система осцилляторного типа состоит из источника энергии, собственно колебательной системы (или осциллятора) и устройства, регулирующего поступление энергии из источника в колебательную систему (клапана). Работа клапана управляется самой колебательной системой посредством звена обратной связи (рис. 1). В таком виде автоколебательные

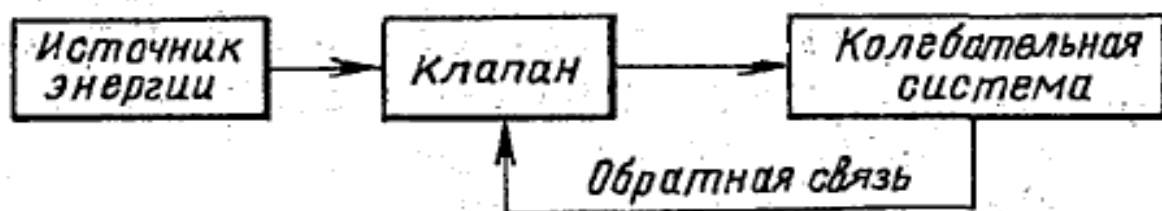


Рис. 1

системы изучают в базовом и факультативном курсах физики. Поэтому методически целесообразно применение в опытах оборудования, которое не только обеспечивает полное экспериментальное изучение автоколебаний, но и даже чисто внешне содержит три главных элемента любой автоколебательной системы: источник энергии, осциллятор и клапан.

Принцип действия электромагнитного клапана

Принципиальная схема электромагнитного клапана для возбуждения механических автоколебаний приведена на рис. 2. На ферромагнитном сердечнике в одну

сторону намотаны две одинаковые катушки $L1$ и $L2$. Первая включена в коллекторную, а вторая — в базовую цепь транзистора $VT1$. Катушка $L1$ зашунтирована диодом $VD1$. Диод $VD2$ выполняет вспомогательную роль, предотвращая выход прибора из строя при неправильном включении источника питания.

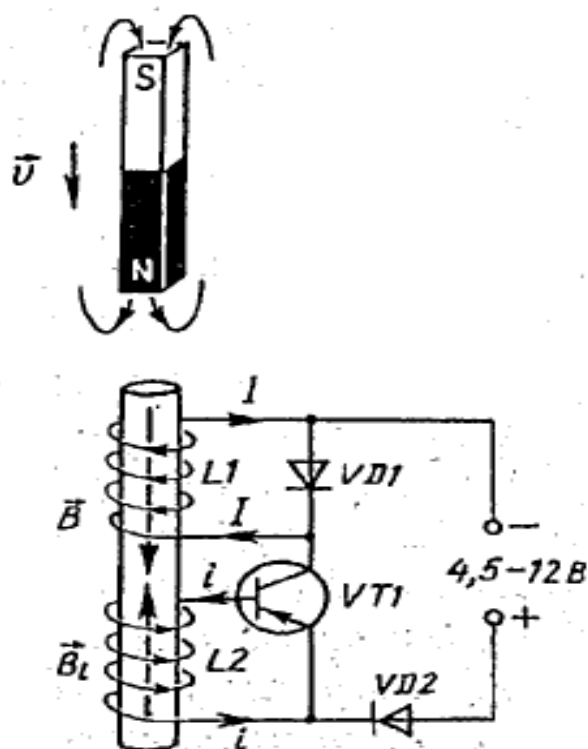


Рис. 2

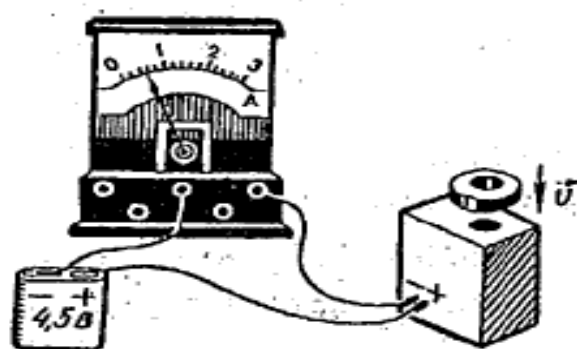


Рис. 3

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 загенерирует, так как роль конденсатора выполняют междувитковая емкость катушки $L1$ и другие паразитные емкости схемы.

Диод $VD1$ необходим для предотвращения электрических автоколебаний устройства: он накоротко замы-

кает катушку $L1$ в те полупериоды, когда через него течет ток в прямом направлении.

Таким образом, при включении источника питания электрические автоколебания 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 его коллекторный ток равен нулю, т. е. через катушку $L1$ ток не идет.

Рассмотрим теперь процессы, происходящие при изменении внешнего магнитного поля. Для определенности будем считать, что к верхнему концу сердечника северным полюсом приближается магнит. Тогда индукция магнитного поля направлена вниз и растет. В катушках $L1$ и $L2$ при этом возникает ЭДС индукции. Если выводы этих катушек замкнуть, то по каждой из них пойдет ток, порождающий, согласно правилу Ленца, такое магнитное поле, которое противодействует изменению внешнего поля. Но катушка $L1$ соединена с диодом $VD1$, который для ЭДС индукции включен в обратном направлении, поэтому по катушке $L1$ ток не идет. Катушка $L2$ соединена с переходом эмиттер — база транзистора. Для ЭДС индукции этот переход включен в прямом направлении, поэтому через катушку $L2$ течет ток индукции i , создающий поле индукцией \vec{B}_i . На базе транзистора появляется отрицательный потенциал относительно эмиттера. При этом транзистор $VT1$ открывается, через его коллекторный переход и катушку $L1$ течет ток коллектора I , создающий магнитное поле индукцией \vec{B} . Это поле направлено так же и изменяется в ту же сторону, что и магнитное поле приближающегося к сердечнику магнита. Поэтому оно передает магниту добавочный импульс, способствующий его движению.

Таким образом, ток i , текущий по катушке $L2$, препятствует, а ток I , 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, токи по катушкам не идут и устройство не сообщает магниту никакого импульса.

Повернем магнит так, чтобы теперь к сердечнику был обращен его южный полюс. В этом случае 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, электрическая цепь начнет 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 открывании транзистора $VT1$ за счет положительной обратной связи цепь 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 так далее, 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 цепь перестает работать.

Конструкция электромагнитного клапана

Принципиальная схема электромагнитного клапана весьма проста, а его конструкция такова, что изготовление этого прибора доступно любому старшекласснику и не отнимет много времени. В качестве сердечника

используют отрезок ферритового стержня диаметром 8 мм и длиной 40 мм. На нем из плотной бумаги клеим ПВА изготавливают каркас длиной 30 мм с щетками диаметром 20 мм. Зажав выступающий конец сердечника в патрон ручной дрели, одновременно двумя проводами ПЭВ-0,12 (или 0,14 мм) внавал наматывают две катушки по 2400 витков в каждой. Далее в любом пластмассовом корпусе собирают цепь, используя транзистор *VT1* типа МП39, МП41, МП42, диод *VD1* типа Д7Г, диод *VD2* типа КД522. Трансформатор закрепляют так, чтобы торец сердечника касался одной из стенок корпуса, и на ней делают круглую метку. Настройка электромагнитного клапана сводится к правильному подключению обмоток трансформатора, соответствующему рис. 2. Мы предпочитаем полностью заливать полученное устройство эпоксидной смолой так, чтобы получился монолитный блок размером 22 × 40 × 44 мм с двумя резьбовыми отверстиями для крепления держателей и выводами для питания. Электромагнитный клапан питается током постоянного напряжения 4,5 — 15 В и не боится ошибки в полярности включения источника.

В предлагаемых опытах используются трапециевидная стойка высотой не менее 200 мм с отверстиями, металлический кронштейн и маятник, изготовленный из полоски жести. Длина маятника не менее 140 мм, на его отогнутом конце удерживается постоянный керамический магнит. Возможны самые различные конструкции и размеры маятника. При достаточно низком трении описанный электромагнитный клапан обеспечивает его автоколебания.

Основная серия опытов

Предлагаемые эксперименты имеют своей целью доказательство существования автоколебаний и изучение главных особенностей автоколебательных процессов.

1. Демонстрация электромагнитного клапана. Собирают цепь из последовательно соединенных элек-

тромагнитного клапана, демонстрационного амперметра и батарейки (рис. 3). Обращают внимание учащихся на то, что в момент включения источника тока стрелка прибора слегка отклоняется и затем возвращается в близкое к нулевому положение. Берут керамический магнит и мелом или иным способом помечают один из его полюсов. К метке на поверхности электромагнитного клапана медленно приближают магнит отмеченным полюсом, а затем удаляют его. При этом стрелка прибора почти не отклоняется.

Повторяют те же действия, но быстро приближая и удаляя магнит. Теперь стрелка демонстрационного амперметра резко отклоняется, допустим, при приближении магнита к клапану, и остается на месте при удалении от него. Поворачивают магнит другим полюсом к метке на клапане и показывают, что в отличие от только что полученного результата при приближении магнита к клапану стрелка демонстрационного амперметра остается на месте, а при удалении — резко отклоняется.

Из этого опыта делают вывод, что электромагнитный клапан практически не потребляет энергию от источника в отсутствие или при медленном изменении внешнего магнитного поля. Он потребляет энергию только при быстром изменении магнитного поля, причем для определенного направления поля потребление энергии клапаном растет, если индукция поля увеличивается, а при противоположном — растет, если индукция поля уменьшается.

2. Автоколебания маятника. К клапану прикрепляют стойку, на стойке фиксируют кронштейн, на него надевают маятник, на отогнутую часть которого навешивают керамический магнит, и подключают клапан к батарейке (рис. 4). 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.

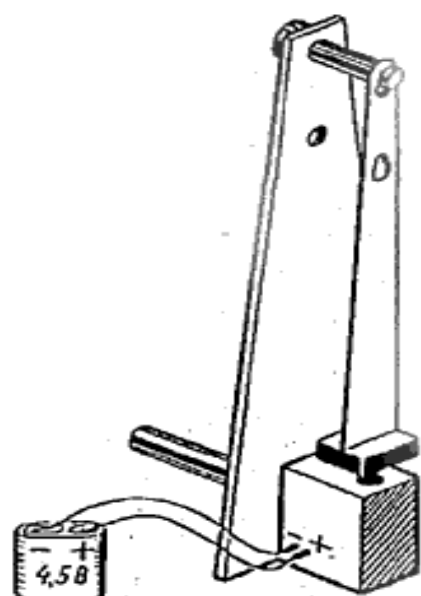


Рис. 4

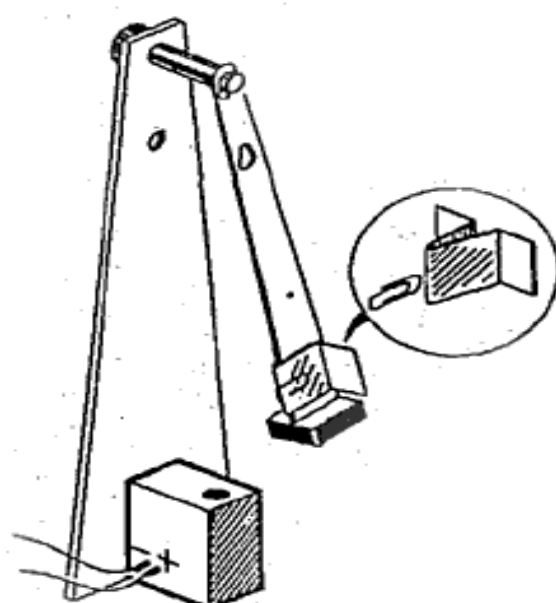


Рис. 5

Далее вводят понятие автоколебательной системы, рисуют ее общую функциональную схему (см. рис. 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 отмеченным в опыте 1 полюсом клапан потребляет из источника энергию, которую в основном расходует на притяжение приближающегося магнита. Переворачивают магнит на отогнутой части маятника противоположным полюсом и показывают, что автоколебания имеют место и в этом случае. Теперь уже клапан потребляет энергию из источника при удалениях магнита, и в эти моменты подталкивают его, способствуя поддержанию автоколебаний.

3. Зависимость амплитуды колебаний от энергии, поступающей в систему. Получают автоколебания маятника при одной включенной батарее и обращают внимание учащихся на амплитуду автоколебаний. Последовательно с первой включают вторую батарею. При этом амплитуда автоколебаний возрастает. Делают вывод, что, чем больше поступления энергии в

колебательную систему, тем больше амплитуда ее колебаний.

4. Зависимость амплитуды колебаний от потерь энергии. В системе возбуждают автоколебания. За маятником располагают подходящий предмет, отмечающий максимальное отклонение маятника от положения равновесия. Из плотной бумаги вырезают флажок и с помощью канцелярской скрепки закрепляют его внизу маятника (рис. 5). Вновь возбуждают автоколебания и отмечают, что их амплитуда уменьшилась.

Делают вывод, что, чем больше потери энергии в колебательной системе, тем меньше амплитуда автоколебаний. Из опытов 2—4 делают общее заключение, что при возбуждении автоколебательной системы амплитуда нарастает до тех пор, пока поступления энергии из источника не будут скомпенсированы ее потерями вследствие трения (в общем смысле этого слова).

5. Связь частоты автоколебательной системы с частотой собственных колебаний осциллятора. Кронштейн закрепляют на стойке в нижнем отверстии, навешивают на него маятник и возбуждают автоколебания в этой системе (рис. 6). Обращают внимание учащихся на то, что частота автоколебаний возросла по сравнению с их частотой в опыте 2. Выключают питание электромагнитного клапана и показывают собственные затухающие колебания маятника сначала той же длины, а затем более длинного. Из проделанной серии экспериментов делают вывод, что частота автоколебаний определяется собственной частотой осциллятора.

6. Электрические автоколебания. Наряду с механическими в рассматриваемой системе происходят электромагнитные автоколебания: незатухающие колебания совершают магнитное поле вокруг клапана, текущий через клапан электрический ток, напряжение на нем и т. д. Учащимся полезно продемонстрировать автоколебания электрического тока. В этой целью последовательно с клапаном включают демонстрационный амперметр, динамик или светодиод в прямом направ-

лении. Возбуждают автоколебания в системе и показывают, что в такт с колебаниями маятника отклоняется стрелка амперметра, издает щелчки динамик или происходят вспышки светодиода.

Дополнительные эксперименты по автоколебаниям

Вместо гравитационного физического маятника в опытах можно использовать другие осцилляторы. Особенно удобен упругий осциллятор, состоящий из плоской прямой пружины, один конец которой закреплен неподвижно, а на другом находится груз. На практике такой осциллятор проще всего изготовить из стального полотна ножовки по металлу и пары кольцевых керамических магнитов в качестве груза. Конструкция подобного осциллятора понятна из приведенных ниже рисунков к опытам, поэтому здесь дадим лишь некоторые рекомендации.

Целесообразно использовать ножовочное полотно размером 12×310 мм. Этим полотном в отрезке дюралевого трубки длиной 200 мм и диаметром 12 мм (от старой лыжной палки) делают прорезь на глубину, примерно равную трети диаметра трубки. В прорезь вставляют ножовочное полотно и закрепляют его тонкой бечевкой. Длинная часть полотна, используемая в качестве пружины, должна составлять не менее 220 мм. На конце этой части в отверстии можно расположить вырезанный из поролона цилиндр, за колебаниями которого удобно наблюдать учащимся. Для демонстрации связанных колебаний описанный прибор дополняют еще одним ножовочным полотном, расположенным параллельно первому на расстоянии 70—80 мм от него.

7. Автоколебания упругого осциллятора. Собирают демонстрационную установку в соответствии с рис. 7. На пружину навешивают два кольцевых керамических магнита диаметром 35 мм. Регулируют относительное положение клапана и магнита так, чтобы расстояние от метки на клапане до боковой поверхности покоящихся магнитов не превышало 3—5 мм. Включают питание

электромагнитного клапана и выводят осциллятор из состояния покоя. При этом учащиеся наблюдают колебания с нарастающей амплитудой. Через некоторое время рост амплитуды прекращается и система входит в установившийся автоколебательный режим.

8. Основные свойства автоколебательных систем. Используя упругий осциллятор (см. рис. 7), мож-

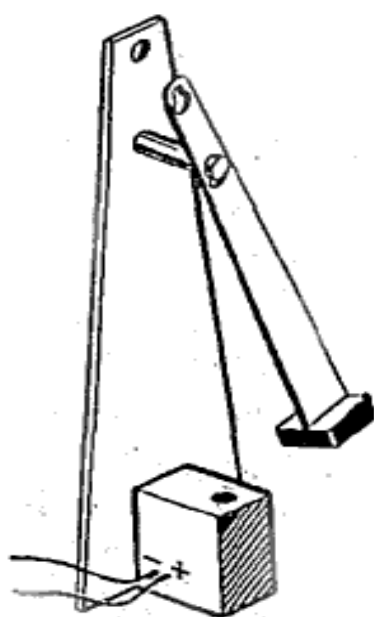


Рис. 6

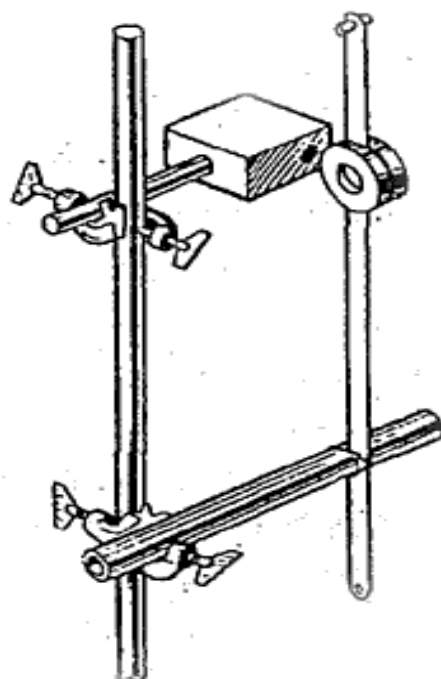


Рис. 7

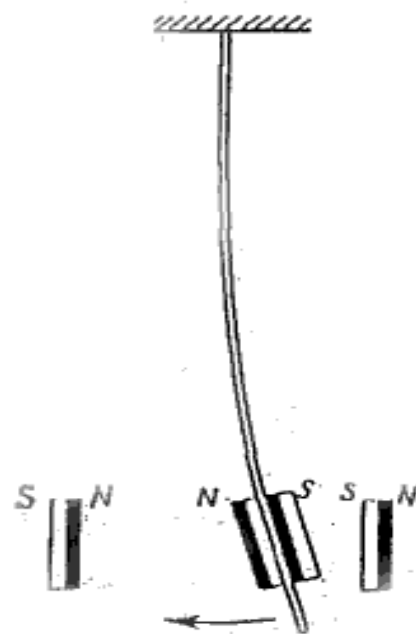


Рис. 8

но повторить всю серию описанных выше опытов, в которых роль осциллятора выполнял гравитационный физический маятник. Кратко перечислим их.

8.1. Увеличивая напряжение питания электромагнитного клапана показывают зависимость амплитуды автоколебаний от энергии, поступающей в систему от источника тока.

8.2. Тем или иным способом притормаживая упругий маятник, показывают зависимость амплитуды автоколебаний от потерь энергии в системе.

8.3. Перемещая магниты по пружине (и соответственно смещая электромагнитный клапан), показывают зависимость частоты автоколебаний от частоты собственных колебаний осциллятора.

8.4. Этот же опыт можно показать, не меняя длину

упругого осциллятора, но изменяя массу его груза: для этого достаточно навесить на пружину еще одну пару керамических магнитов.

8.5. Электрические автоколебания в установке с упругим осциллятором показывают так же, как в опыте 6.

9. Изменение частоты колебаний упругого осциллятора постоянными магнитами. Собирают установку, используемую для демонстрации автоколебаний упругого осциллятора (см. рис. 7), и возбуждают автоколебания. С обеих сторон колеблющегося магнита и на равных расстояниях от него располагают два других керамических магнита, обращенных разноименными полюсами друг к другу (рис. 8). Частота автоколебаний изменяется, причем тем больше, чем ближе придвинуты магниты к колеблющемуся маятнику.

В случае, когда со стороны южного (северного) полюса колеблющегося магнита находится южный (северный) полюс соответствующего неподвижного магнита, вследствие их отталкивания сила, возвращающая маятник к положению равновесия, растет и частота автоколебаний возрастает. Если со стороны южного (северного) полюса колеблющегося магнита расположен северный (южный) полюс соответствующего неподвижного магнита, то возвращающая сила становится меньше и частота автоколебаний уменьшается. (Надо отметить, что это удобный способ плавного регулирования частоты автоколебаний, который целесообразно использовать в различных экспериментах.)

10. Связанные автоколебания. В школьном курсе физики связанные колебания не изучают, однако их демонстрация представляет большой интерес не только в классах повышенного уровня, но и в обычных классах. Дело в том, что это красивое физическое явление, которое позволит неравнодушному учителю о многом рассказать учащимся.

Собирают демонстрационную установку так, как показано на рис. 9. На стальные пружины навешивают по два кольцевых керамических магнита диаметром 35 мм и толщиной 8—9 мм так, чтобы расположенные на

получившихся маятниках магнитные грузы были обращены друг к другу одноименными полюсами и, следовательно, отталкивались. Электромагнитный клапан закрепляют в таком положении, чтобы его метка находилась на расстоянии 3—5 мм от одного из магнитных грузов, висящих на маятнике.

10.1. Для демонстрации синфазных колебаний маятников рукой отклоняют маятники в одну сторону на равные углы и одновременно отпускают. Обращают внимание учащихся на то, что фазы колебаний маятников в любой момент времени совпадают.

10.2. Отклоняют маятники на равные углы в разные стороны и одновременно отпускают. Колебания маятников происходят в противофазе. В этом и описанном выше случаях говорят, что система совершает нормальные колебания.

10.3. Оставляют один маятник неподвижным, а второй выводят из положения равновесия и отпускают. При этом амплитуда колебаний второго маятника сначала возрастает, а затем начинает уменьшаться; причем по мере ее снижения увеличивается амплитуда колебаний первого маятника. Когда она достигнет максимума, амплитуда колебаний второго маятника станет равна нулю, и далее процесс повторится. Таким образом, первый колеблющийся маятник раскачивает второй, отдает ему свою энергию и полностью прекращает колебания, а затем второй маятник раскачивает первый и т. д. Учащиеся видят, как в системе из двух связанных посредством магнитного поля осцилляторов происходит перекачка энергии от одного осциллятора к другому. Значит, делают заключение учащиеся, если связанных осцилляторов много, то в такой среде энергия от возбужденного осциллятора будет переходить к другим, т. е. возникнет волна.

Наличие электромагнитного клапана и источника энергии позволяет наблюдать связанные колебания неограниченно долго (можно сказать, что в системе имеют место связанные автоколебания). Без электромагнитного клапана это явление тоже наблюдается, но в

течение небольшого времени, пока не затухнут собственные колебания осциллятора.

11. Крутильные автоколебания. На нити длиной 2—5 см подвешивают круглый керамический магнит диаметром 35 мм, рядом устанавливают электромагнитный клапан так, чтобы его рабочая поверхность была повернута к магниту (рис. 10). Во избежание раскачи-

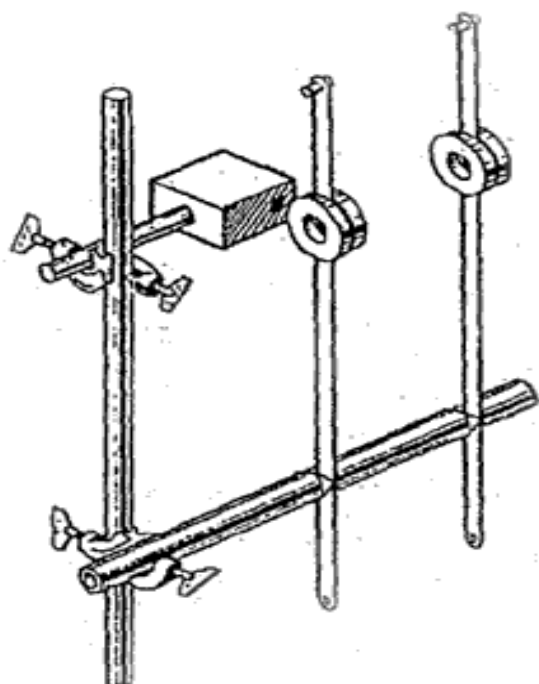


Рис. 9

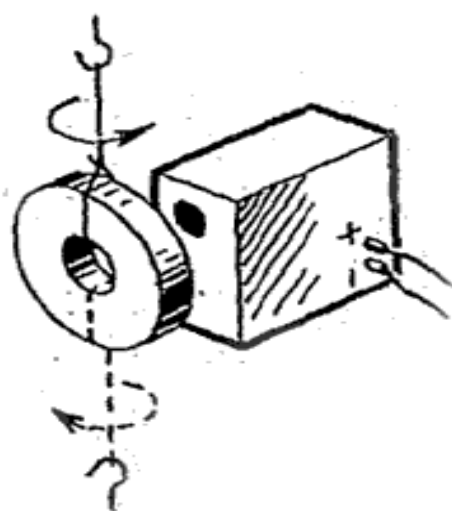


Рис. 10

вания магнита к его нижней части можно привязать вторую нить и закрепить ее внизу. Аккуратно закручивают нить и отпускают магнит. При этом учащиеся наблюдают затухающие крутильные колебания: магнит делает несколько оборотов в одну сторону, останавливается, закручивается обратно и так далее с уменьшающейся до нуля амплитудой угла поворота. Подключают электромагнитный клапан к батарее карманного фонаря и снова возбуждают крутильные колебания. Учащиеся видят, что теперь движение системы носит автоколебательный характер: крутильные колебания спустя небольшой промежуток времени становятся установившимися и не затухают.

12. Магнитная вертушка. Магнитная вертушка представляет собой вырезанную из жести пластинку, в

центре которой керном сделано небольшое углубление. Концы пластины отогнуты вниз под прямым углом, и на них навешены керамические магниты так, что расстояние между магнитами составляет 50—70 мм. Углубление пластины помещают на острие вертикально стоящей иглы и возле одного из магнитов устанавливают электромагнитный клапан (рис. 11). На него по-

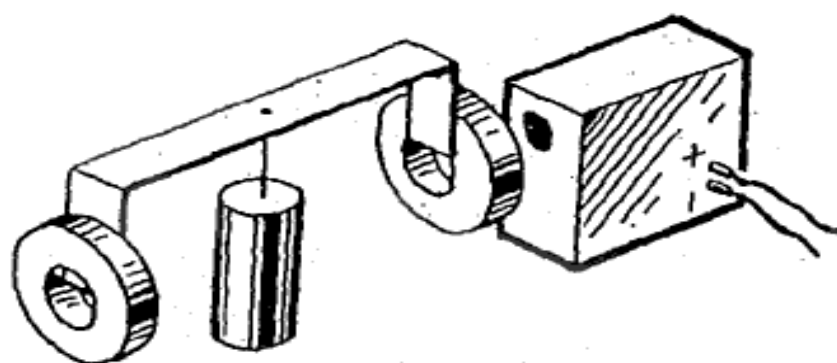


Рис. 11

дают напряжение 12 В. Получившуюся вертушку подталкивают и демонстрируют учащимся ее вращение с постоянной угловой скоростью. Результат опыта объясняют тем, что электромагнитный клапан увеличивает импульс движущегося мимо него магнита.

З а к л ю ч е н и е

Электромагнитный клапан может быть использован во многих физических опытах в качестве движителя. Например, его можно применить для демонстрации резонанса, колебаний струны, движения центра масс замкнутой системы, иллюстрации принципа эквивалентности и т. д. Даже описанные здесь опыты допускают различные варианты. Зачастую изменение всего лишь положения электромагнитного клапана относительно осциллятора позволяет значительно повысить выразительность опыта.

*В. В. Майер,
Р. В. Майер
(Глазов)*