

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

---

Учебно-методическое управление  
по высшим учебным заведениям

Б. Ш. ПЕРКАЛЬСКИС

ДЕМОНСТРАЦИИ  
С ЭЛЕКТРОННЫМ  
ОСЦИЛЛОСКОПОМ  
В КУРСЕ ФИЗИКИ

---

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА»  
Москва—1960

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Демонстрация отклонения электронного луча в электрическом и магнитном полях	5
2. Развертка напряжения переменного тока в зависимости от частоты	5
3. Сложение одинаково направленных гармонических колебаний	6
4. Демонстрация фигур Лиссажу	7
5. Релаксационные колебания и наблюдение их формы	7
6. Использование электронного переключателя для демонстрации сдвига фаз между током и напряжением	8
7. Наблюдение сдвига фаз между током и напряжением в цепи с помощью фигур Лиссажу	11
8. Наблюдение формы звуковых колебаний с помощью электронного осциллоскопа	13
9. Измерение длины звуковой волны с помощью электронного осциллоскопа	13
10. Демонстрация стоячих звуковых волн	14
11. Демонстрация затухающих электромагнитных колебаний	15
12. Демонстрация связанных колебаний в контурах	18
13. Демонстрация резонансной кривой колебательного контура	20
14. Демонстрация одно- и двухполупериодного выпрямления	23
15. Снятие характеристики выпрямителя	24
16. Снятие динамической характеристики дуги Петрова	25
17. Снятие характеристики электронной лампы	26
18. Демонстрация характеристики самостоятельного разряда в газе	28
19. Демонстрация петли гистерезиса ферромагнетика	29
20. Наблюдение прямого пьезоэффекта с помощью электронного осциллоскопа	31
21. Демонстрация гистерезиса сегнетоэлектрика	32
22. Усиление переменных напряжений электронной лампой и полупроводниковым триодом	34
23. Демонстрация работы лампового генератора	36
24. Демонстрация работы лампового генератора в фазовой плоскости	36
25. Амплитудная модуляция	38
26. Частотная модуляция	39
27. Демонстрация распределения электронов по энергиям при термоэлектронной эмиссии	40
28. Счетчик Гейгера—Мюллера и наблюдение импульсов от ионизирующих частиц	43
29. Демонстрация опытов Франка—Герца	43
Литература	48

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Решения партии и правительства об укреплении связи школы с жизнью и о дальнейшем развитии системы народного образования в стране ставят ряд важных задач перед преподавателями физики высших и средних специальных учебных заведений.

Большую роль в их решении должна сыграть максимальная конкретность и наглядность обучения, требующая, в частности, широкого использования лекционных демонстраций с новыми техническими средствами. Только выполнение последнего условия позволяет показать учащимся важные явления из различных областей современной физики.

Чрезвычайно богатые возможности в этом отношении представляет электронный осциллоскоп. Являясь одним из распространенных приборов в научно-исследовательской работе, он в ряде случаев слишком мало используется в физических демонстрациях. Основной причиной этого является распространенное мнение, что, помимо осциллоскопа для демонстраций, приходится использовать много сложной вспомогательной аппаратуры. Выпуском этой работы, предназначенной для преподавателей высшей и средней школы, сталкивающихся с физическими демонстрациями, мы хотим опровергнуть это мнение. В подавляющем большинстве из описанных здесь демонстраций по различным областям физики, включая и атомную, используется только звуковой генератор и наиболее распространенные радиодетали. Предлагаемые схемы, благодаря их простоте, можно быстро собрать; они не требуют никакой наладки, обычно затрудняю-

щей использование радиосхем неспециалистами. Полученные приставки, оформленные на щитах, позволяют показать ряд важных и сложных физических явлений, облегчая усвоение учебного материала, углубляя его.

В демонстрациях используется в основном распространенный электронный осциллоскоп ЭО-7. Благодаря значительным размерам экрана и большому коэффициенту усиления усилителя, он весьма удобен для демонстраций. Его можно заменить осциллоскопом ЭО-4, имеющим близкие соответствующие данные. Другие осциллоскопы для наших целей менее удобны; впрочем, ряд демонстраций можно показать с любым осциллоскопом.

Среди описанных 29 демонстраций, наряду с известными, схемы которых часто упрощены, имеются новые, поставленные в физическом кабинете Томского государственного университета в 1956—1957 гг.

Выражаю искреннюю благодарность профессору М. А. Большаниной, поддержка которой дала возможность поставить эти демонстрации, и всем товарищам, оказавшим нам содействие в работе.

*Б. Ш. Перкальскис*

## 1. ДЕМОНСТРАЦИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

### В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Несмотря на то, что изображение на экране электронного осциллоскопа получается в результате отклонения электронного луча в электрическом поле, нередко встречается необходимость показать непосредственно именно это влияние поля на луч. Эффектна следующая демонстрация: при включенном генераторе развертки на диапазоне 2—7 или 10—20 *гц* получают на экране осциллоскопа ЭО-7 (или любого другого) горизонтальный след луча. Если поднести к экрану наэлектризованный предмет, например, эбонитовую палочку или расческу, то луч, отклонившись, выписывает линию, близкую к  $\Omega$ . Отклонение настолько велико, что верхняя часть  $\Omega$  уходит за пределы экрана. Если же к экрану осциллоскопа с горизонтальным следом электронного луча поднести прямой магнит, то ясно виден изогнутый след луча, отклоненного магнитным полем.

## 2. РАЗВЕРТКА НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ

Звуковой генератор подключают к электронному осциллоскопу, как показано на рис. 1. На осциллокопе устанавливают подходящую частоту развертки, напри-

мер, в диапазоне от 15 до 100 гц. Изменяя частоту колебаний звукового генератора, наблюдают получающиеся синусоиды. Когда картина становится мало разборчивой, увеличивают частоту развертки, добиваясь опять четкой картины. Этот опыт служит для демонстрации значения подбора подходящего масштаба времени при изучении колебаний.

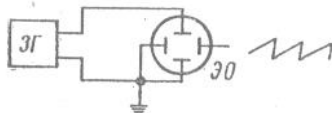


Рис. 1

### 3. СЛОЖЕНИЕ ОДИНАКОВО НАПРАВЛЕННЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Рассматривая сложение колебаний, можно показать на опыте форму результирующего колебания, представляющего сумму двух гармонических колебаний с различным соотношением частот и амплитуд. Для этого берется звуковой генератор (рис. 2), например, ГЗ-1, выходные клеммы которого подключаются к многовитковой обмотке трансформатора  $Tr_1$  с коэффициентом трансформации порядка 10\*. Последовательно с его обмоткой с меньшим числом витков соединяют низковольтную обмотку второго понижающего трансформатора  $Tr_2$ , первичная обмотка которого включается в цепь переменного тока. Трансформаторы применяются для ослабления влияния двух источников тока друг на друга (для их «развязывания»). Концы получившейся цепи соединяют с вертикальным входом осциллографа. Частота его развертки подбирается так, чтобы картина на экране была достаточно «емкой», т. е. содержала несколько полных групп колебаний.

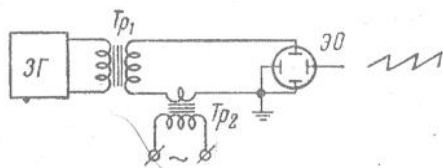


Рис. 2

Затем, изменяя частоту колебаний звукового генератора, показывают изменение формы получающихся слож-

\* Удобно воспользоваться выходным трансформатором от приемника.

ных колебаний. Особо следует остановиться на частоте 50 гц и близких к ней частотах, при которых получается наглядная картина биений. При подготовке демонстрации регулировкой амплитуды выхода звукового генератора добиваются наиболее выразительной картины (целесообразно амплитуды обоих колебаний взять равными или близкими, особенно при показе биений).

### 4. ДЕМОНСТРАЦИЯ ФИГУР ЛИССАЖУ

Для демонстрации фигур Лиссажу достаточно одного звукового генератора, например, ГЗ-1. В качестве второго источника гармонических колебаний можно использовать обычную электрическую сеть, понизив в случае необходимости, напряжение с помощью автотрансформатора ЛАТР-1 или ЛАТР-2. Цепь собирается согласно рис. 3. Прежде всего регулятором амплитуды выхода звукового генератора подбирают такое выходное напряжение, при котором вертикальный размер получающегося изображения равнялся приблизительно 2/3 диаметра экрана осциллографа. Добиваются того же для горизонтального размера посредством ЛАТР. Показ фигур начинают с частоты 50 гц на выходе звукового генератора. При этом получают медленно изменяющийся эллипс, переходящий то в окружность, то в прямую. Добиться полной стабильности обычно не удастся, ибо разность фаз колебаний звукового генератора и сети непостоянна — источники колебаний некогерентны. Затем увеличивают частоту на выходе звукового генератора, останавливаясь на отношениях частот: 4 : 3, 3 : 2, 2 : 1, 3 : 1 и т. д. Если идти от частоты 50 гц в сторону меньших частот, то получают те же фигуры, но повернутые на 90°.

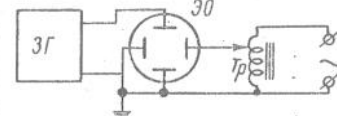


Рис. 3

### 5. РЕЛАКСАЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ И НАБЛЮДЕНИЕ ИХ ФОРМЫ

Для получения релаксационных колебаний можно использовать простейшую схему с неоновой лампой (рис. 4), где  $R$  — 5 Мом,  $C$  — 5100 пф,  $R_1$  — 10 Мом,

НЛ — неоновая лампа СН-2-127, D — кенотронный выпрямитель на 220 в.

Схема работает следующим образом. Через большое сопротивление R медленно заряжается конденсатор C. Напряжение на его зажимах увеличивается приближенно

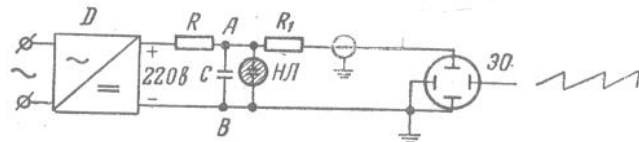


Рис. 4

линейно. В тот момент, когда это напряжение достигает потенциала зажигания неоновой лампы НЛ, последняя вспыхивает, конденсатор быстро разряжается через лампу, и процесс повторяется.

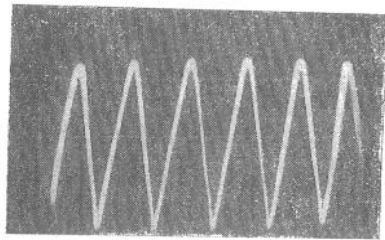


Рис. 5

Для показа самих колебаний подключают к клеммам А и В добавочный конденсатор емкостью в 1—2 мкф. При этом наблюдаются медленные релаксационные колебания. Лампа вспыхивает через промежутки времени порядка 1—2 сек (в аудитории следует устроить затемнение). Затем убирают

добавочный конденсатор, включают осциллоскоп и подбирают частоту развертки до получения наиболее выразительной картины (рис. 5). Заменяв R переменным сопротивлением, можно изменять период получающихся колебаний.

Примечание. Провод, ведущий к осциллоскопу, экранировать обязательно, иначе наведенные напряжения исказят картину.

## 6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ

Для демонстрации можно использовать электронный переключатель, схема которого описана в статье М. Жук

«Приставка к осциллографу»\* [8] и изображена на рис. 6. Принцип работы переключателя следующий: симметричный мультивибратор, работающий на лампе Л<sub>1</sub> (6Н8), генерирует прямоугольные положительные импульсы, поступающие попеременно на правый и левый катоды двойного триода Л<sub>2</sub> — лампы 6Н8С. Последняя работает как обычный усилитель двух подаваемых на

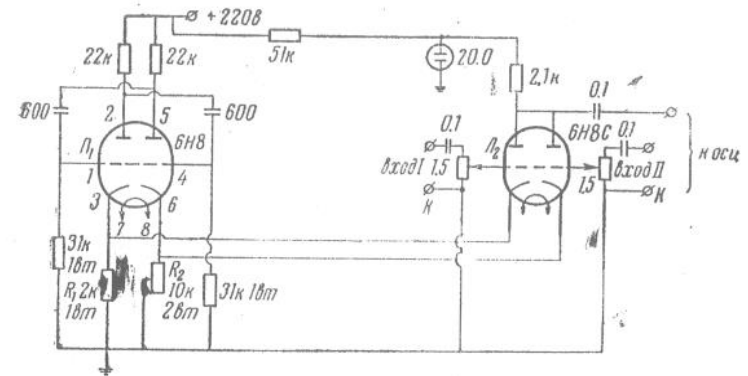


Рис. 6

нее переменных напряжений. Импульсы от Л<sub>1</sub> запирают то одну, то другую половину этой усилительной лампы и на осциллоскоп поступают попеременно (с частотой в несколько десятков килогерц) оба изучаемых напряжения. Частота появления осциллограмм настолько велика, что эти графики видны одновременно.

Установка для демонстрации собирается по схеме рис. 7\*\*, где R — реостат на 100—200 ом, L — катушка с несколькими сотнями витков и железным сердечником, C — батарея конденсаторов на 10—20 мкф, подобранная так, чтобы ее емкостное сопротивление равнялось индуктивному сопротивлению катушки при некотором среднем положении сердечника ( $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ ), в этом положении наблюдается резонанс; K — общая клемма; ЭП — электронный переключатель.

\* В эту схему внесены некоторые изменения для улучшения работы прибора.

\*\* Все заземленные точки соединены между собой и выведены на одну клемму.

Как видно из схемы (рис. 7), одна из входных клемм  $K$  является одновременно выходной (к осциллографу) и именно к ней необходимо подключить общую точку тех участков цепи, с которых снимаются исследуемые напряжения. На исследуемую цепь удобно подать напряжение от сети через ЛАТР. Величина напряжения берется в пределах от 10 до 20 в. Работа электронного переключателя регулируется так: прежде всего, не подав

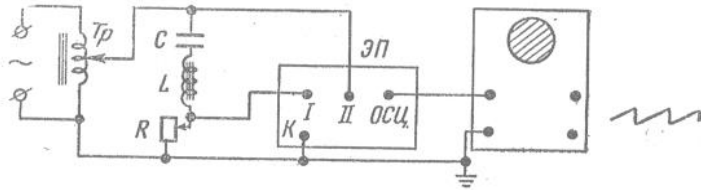


Рис. 7

напряжения на цепь  $RLC$  (полностью выведя ЛАТР), включают электронный переключатель и осциллоскоп (рис. 7). При этом на экране должны появиться две прямые. Меняя величину сопротивления  $R_2$  (рис. 6), устанавливают между ними необходимое расстояние. Затем ЛАТРом подают такое напряжение на исследуемую цепь, при котором амплитуды обоих графиков были бы достаточно велики. График, получившийся за счет напряжения, поступающего на вход  $I$ , изображает зависимость силы тока от времени (рис. 8), так как данное напряжение снято с омического сопротивления  $R$  (рис. 7) и равно

$$U_1 = IR.$$

Второй график (рис. 9) показывает зависимость от времени напряжения, приложенного ко всей цепи  $RLC$ . Далее, потенциометрами обоих входов электронного переключателя устанавливают необходимый размер амплитуд того и другого графика. После окончания этой подготовительной работы приступают к демонстрации. По положению графиков на экране замечают наличие некоторого сдвига фаз между током и напряжением в цепи. Затем, вдвигая ферромагнитный стержень в катушку индуктивности, наблюдают смещение графика тока относительно графика напряжения, т. е. изменение сдвига фаз

10

между ними при изменении реактивного сопротивления. Одновременно замечают, что амплитуда силы тока увеличивается (при постоянной величине напряжения), достигает максимума при резонансе, когда сдвиг фаз равен нулю, а затем снова уменьшается.

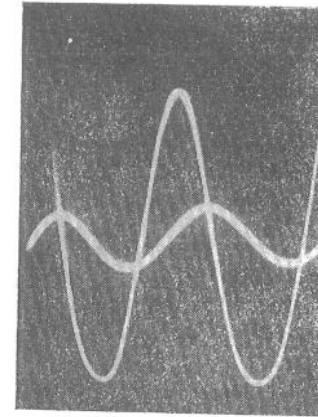


Рис. 8

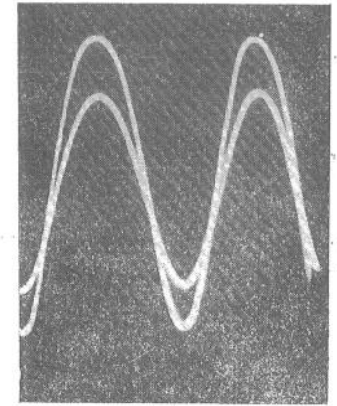


Рис. 9

Если имеются два осциллоскопа, то электронный переключатель можно применить также при демонстрации фигур Лиссажу. В этом случае на одном осциллокопе получают фигуры Лиссажу, а на другом демонстрируют порознь оба гармонических колебания. При этом наглядно видно влияние на фигуры Лиссажу как разности фаз, так и различия частот.

## 7. НАБЛЮДЕНИЕ СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ В ЦЕПИ С ПОМОЩЬЮ ФИГУР ЛИССАЖУ

Наиболее наглядно сдвиг фаз между током и напряжением в цепи можно продемонстрировать с помощью электронного переключателя. При отсутствии последнего целесообразно использовать предлагаемую демонстрацию.

Собрав цепь, согласно рис. 10, подают на горизонтальный вход осциллоскопа напряжение  $U_x$ , на верти-

11

кальный —  $U_y$ . На экране получают эллипс, как-то ориентированный относительно осей. Если выдвигать или выдвигать железный сердечник катушки  $L$ , то эллипс изменит свою форму и ориентацию. Для опыта следует изготовить катушку, обладающую индуктивным сопротивлением, немного меньшим

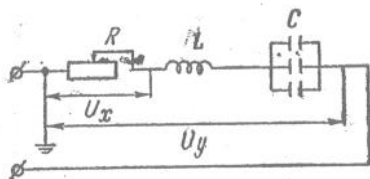


Рис. 10

сердечника в катушке получают на экране прямую, что свидетельствует о разности фаз, равной нулю, т. е. о наличии резонанса напряжений. Необходимо, однако, учитывать, что усилители вертикальный и горизонтальный вносят не всегда одинаковые изменения фазы в подаваемые на них напряжения. Это приводит, например, к тому, что прямая появится не точно в момент достижения резонанса. Убедиться в наличии или отсутствии фазовых

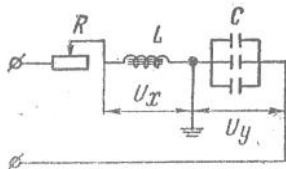


Рис. 11

искажений проще всего так: будем одновременно подавать одно напряжение на оба входа осциллооскопа. При отсутствии фазовых искажений должна получиться прямая. Если получается эллипс, то необходимо произвести коррекцию усилителей. Обычно фазовые искажения невелики, и в демонстрации это не очень существенно. Если желательно наблюдать сдвиг фаз напряжений на разных участках цепи  $U_x$  и  $U_y$ , например, на емкостном и индуктивном или емкостном и активном сопротивлениях, то цепь собирается по-прежнему, но подача напряжений на осциллооскоп должна производиться, во избежание коротких замыканий, как показано на рис. 11 и 12, т. е. об-

12

сопротивления батареи конденсаторов. Введение сердечника позволит добиться резонанса. При правильно подобранных катушке и батарее конденсаторов, а также при определенном положении

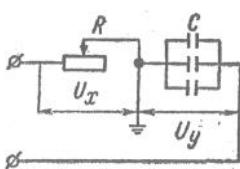


Рис. 12

щая точка двух участков должна подключаться к заземленной клемме осциллооскопа. На рис. 10, 11 и 12  $R$  — реостат примерно на 100 ом,  $L$  — катушка с несколькими сотнями витков и железным сердечником,  $C$  — батарея конденсаторов емкостью от 10 до 20 мкф.

Примечание. При изменении параметров цепи угол сдвига фаз изменяется в пределах  $\pm 90^\circ$ , что видно из векторной диаграммы рис. 13. Вследствие этого большая ось эллипса сохраняет свое положение во 2 и 4 или в 1 и 3 квадрантах при изменении сопротивления  $R$ .

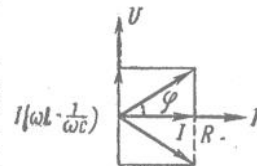


Рис. 13

## 8. НАБЛЮДЕНИЕ ФОРМЫ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОСКОПА

Для показа формы звуковых колебаний к вертикальному входу осциллооскопа подключают микрофон, например СДМ. Если перед микрофоном произносить гласные или согласные звуки, то на экране при частоте развертки порядка сотни герц видна наглядная картина соответствующих колебаний. Затем, используя камертоны, можно продемонстрировать осциллограммы звуков, соответствующих октаве, квинте и т. д. Наконец, взяв два одинаковых камертона на резонаторах и наклеив на один из камертонов кусочек пластилина, можно заставить их одновременно слышны биения и видно их изображение на экране.

Наиболее удобным для демонстрации является осциллооскоп ЭО-7, так как напряжение на выходе микрофона мало и необходимо большое усиление.

Примечание. При подключении микрофона необходимо проследить за тем, чтобы выходящий из него проводник, играющий роль экранирующего (спиральный), подключался к заземленной клемме осциллооскопа, иначе наведенные напряжения исказят картину.

## 9. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОСКОПА

При подаче на вертикальный и горизонтальный входы осциллооскопа напряжений одинаковой частоты, но отличающихся по фазе на постоянную величину, элек-

13

тронный луч описывает эллипс определенной формы. Используя это обстоятельство, можно определить длину звуковой волны. Для этой цели собирают установку, согласно рис. 14, где *ЗГ* — звуковой генератор ГЗ-1, *Гр* — громкоговоритель, *М* — микрофон СДМ, *ЭО* — электронный осциллоскоп ЭО-7.

Как видно из рис. 14, на горизонтальный вход осциллоскопа подается напряжение непосредственно с выходных клемм звукового генератора; на вертикальный вход — с микрофона, воспринимающего звуковые волны,

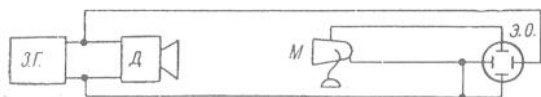


Рис. 14

испускаемые громкоговорителем. При этом на экране осциллоскопа наблюдается эллипс, который в частном случае может превратиться в прямую или окружность.

Если удалять микрофон от громкоговорителя, то разность фаз колебаний, поступающих на входы осциллоскопа, меняется. Очевидно, когда удаление достигнет длины волны, изменение разности фаз составит  $2\pi$ , что повлечет за собой появление на экране осциллоскопа той же фигуры Лиссажу, которая наблюдалась в начале опыта. Измерив расстояние, на которое перемещали микрофон, находят искомую длину волны. Необходимо учесть, что вертикальный размер фигуры при удалении микрофона уменьшается. Впрочем, при использовании спаренного динамика от киноаппарата «Украина» звуковое поле вблизи него довольно однородно, и уменьшение размера выражено слабо.

## 10. ДЕМОНСТРАЦИЯ СТОЯЧИХ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

В курсе общей физики стоячие волны обычно показываются с помощью шнура, возбуждаемого рукой или электромотором. Целесообразно продемонстрировать и стоячие звуковые волны [13], которые можно получить при использовании весьма скромных средств — звукового генератора ГЗ-1 и громкоговорителя узкоплеченчно-

го киноаппарата «Украина». Этот громкоговоритель содержит два динамика, что позволяет получить в пределах центрального пучка почти плоскую звуковую волну. Громкоговоритель следует установить в конце аудитории в проходе между партами и подключить к звуковому генератору. Целесообразно подбирать частоту (близкую к 250 гц), изменяя ее в некоторых пределах так, чтобы достигался максимальный эффект демонстрации. Амплитуда напряжения на выходе генератора не должна быть очень большой. Распространяющиеся по проходу аудитории звуковые волны отражаются от классных досок, и в помещении устанавливаются стоячие волны, явственно ощущаемые на слух. В узлах громкость весьма мала, что особенно эффектно, когда подходят к ближайшим от громкоговорителя узлам, причем с приближением к источнику звука громкость резко падает. Если перемещаться не вдоль, а поперек аудитории, то заметно наличие зон громкого звучания и зон тишины, обусловленных интерференцией двух источников — динамиков.

Эту же демонстрацию можно провести с меньшей затратой времени при использовании электронного осциллоскопа [14]. Для этого перед громкоговорителем, который подключают к звуковому генератору, ставят лист металла, играющего роль отражателя. Тогда в пространстве между громкоговорителем и отражателем устанавливаются стоячие волны. Их обнаруживают посредством микрофона, подключенного к вертикальному входу осциллоскопа ЭО-7. Опыт проводится при частоте звукового генератора от 1000 до 1500 гц и частоте развертки от 100 до 150 гц. При этом амплитуда синусоидальных кривых, наблюдаемых на экране осциллоскопа, изменяется по мере перемещения микрофона. Определяя расстояние между любыми двумя ближайшими друг к другу точками (узлами), в которых амплитуда равна нулю, находим длину стоячей волны.

## 11. ДЕМОНСТРАЦИЯ ЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

При изучении вопроса о возникновении электромагнитных колебаний в контуре полезно дать учащимся возможность наглядно убедиться во временном ходе явления, пронаблюдать влияние сопротивления контура на



затухание колебаний и индуктивности или емкости на период.

В то время как создание колебаний не составляет труда, получить их устойчивое изображение довольно сложно. Дело в том, что необходим регулярно повторяющийся процесс, который дал бы возможность непрерывно наблюдать график колебаний на экране электронного осциллоскопа. Для получения этого повторяющегося процесса можно использовать цепь, дифференцирующую напряжение релаксационного типа, что на практике оказывается весьма простым и удобным методом.

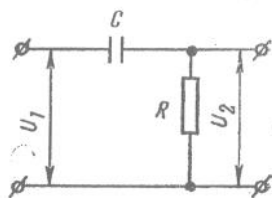


Рис. 15

В его основе лежит следующая идея. Берется цепь (рис. 15). На основании закона Кирхгофа можно составить уравнение

$$U_1 = IR + \frac{1}{C} \int I dt. \quad (1)$$

Если  $R$  и  $C$  достаточно малы, то членом  $IR$  можно пренебречь. Тогда

$$U_1 = \frac{1}{C} \int I dt, \quad (2)$$

$$I = C \frac{dU_1}{dt}. \quad (3)$$

Напряжение на выходе

$$U_2 = IR = RC \frac{dU_1}{dt}. \quad (4)$$

Отсюда видно, что схема (рис. 15) работает как дифференцирующая.

Затем собирается простейшая цепь с неоновой лампой  $НЛ$  для получения релаксационных колебаний (рис. 16). Известно, что при этом напряжение  $U_1$  на лампе меняется с течением времени приблизительно так, как указано на рис. 17. Если напряжение  $U_1$  подать на дифференцирующую цепь, то напряжение  $U_2$  на ее выходе будет характеризоваться графиком, изображенным на рис. 18: получается ряд больших кратковремен-

ных импульсов, вполне пригодных для регулярного возбуждения контура\*.

Окончательная рабочая схема приведена на рис. 19 (здесь отсутствует сопротивление дифференцирующей

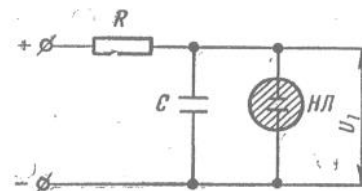


Рис. 16

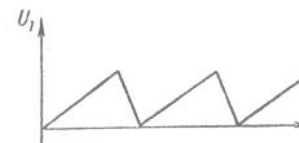


Рис. 17

цепи, так как его роль выполняет активное сопротивление контура  $LCR$ ), где  $R_1 — 5 \text{ Мом}$ ,  $C_1 — 5100 \text{ пф}$ ,  $НЛ —$  неоновая лампа  $СН-2-127$ ,  $C_2 — 0,03 \text{ мкф}$ ,  $C — 1 \text{ мкф}$ ,  $R —$  реостат на  $150—200 \text{ ом}$ ,  $L —$  катушка с несколькими сотнями витков,  $D —$  кенотронный выпрямитель на  $220 \text{ в}$ . Постоянное напряжение  $220 \text{ в}$  подается от кенотронного выпрямителя. В качестве осциллоскопа удобно использовать ЭО-7, обладающий значительным усилением.

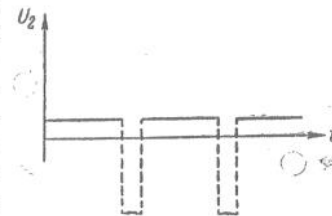


Рис. 18

В колебательном контуре  $LCR$  получаются затухающие электромагнитные колебания. Если напряжение  $U_y$

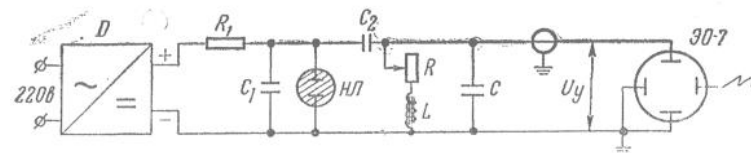


Рис. 19

подать на вертикальный вход осциллоскопа, то при надлежащей частоте развертки получается вполне стабильная крупная картина затухающих колебаний (рис. 20).

\* Можно убедиться в приближенной справедливости графиков рис. 17 и 18, если подать на осциллоскоп напряжения  $U_2$  и  $U_1$  соответственно с входа дифференцирующей цепи и с ее выхода.

Изменяя  $R$ , можно увеличивать или уменьшать затухание. При вводе в катушку  $L$  железного сердечника (сборного из изолированных прутьев для ослабления токов Фуко) период колебаний заметно увеличится, что иллюстрирует формулу Томсона. Если  $R$  увеличить до

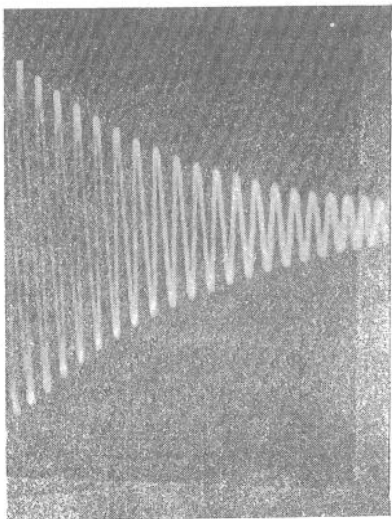


Рис. 20

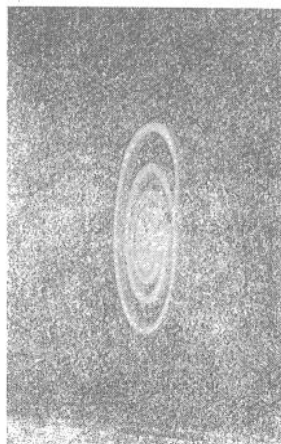


Рис. 21

150—200  $\text{ом}$ , то при указанных ниже параметрах цепи получается четко выраженный аperiodический разряд.

Наконец, можно получить изображение рассмотренного затухающего процесса на фазовой плоскости в виде свертывающейся спирали, если подать на горизонтальный вход осциллографа напряжение, снятое с активного сопротивления  $R$  (рис. 21).

## 12. ДЕМОНСТРАЦИЯ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОНТУРАХ

Роль связанных колебаний в самых различных областях физики общеизвестна. Между тем для их демонстрации обычно используются только связанные маятники. Для более подробного рассмотрения этого важного яв-

ления можно использовать связанные колебательные контуры, настроенные в резонанс. В одном из этих контуров способом, описанным в работе «Демонстрация затухающих электромагнитных колебаний», возбуждаются затухающие колебания. Напряжение с этого контура подается на электронный осциллоскоп. Если второй кон-

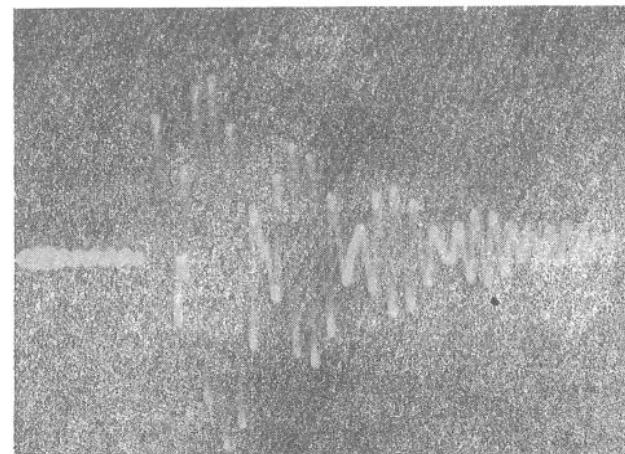


Рис. 22

тур при этом разомкнут, то на экране наблюдается обычная картина затухающих колебаний. Если замкнуть цепь второго контура, то получаются затухающие колебания, сопровождающиеся биениями, так как из-за перехода энергии от первого контура ко второму и обратно амплитуда колебаний в первом контуре падает до нуля, затем снова нарастает и т. д. (рис. 22). Если, наконец, подать на вертикальный вход осциллографа напряжение, снятое со второго контура, то получается снова картина затухающих колебаний с биениями; она отличается от предыдущей тем, что там начальная амплитуда была наибольшей, здесь же она равна нулю.

Цепь, необходимая для демонстрации, собирается следующим образом: во-первых, следует иметь два контура, настроенные в резонанс. Их проще всего получить, имея две одинаковые катушки и два одинаковых конденсатора. Если же таковых нет, можно взять две произволь-

ные катушки и подобрать емкости конденсаторов, согласно формуле Томсона, так, чтобы  $L_1 C_1 = L_2 C_2$ . Связь между контурами очень удобно осуществить, надев обе катушки на замыкающий стержень разборного трансформатора. Помещая их на разной глубине, можно изменять коэффициент связи. Его следует так подобрать, чтобы картина была наиболее эффектной. Окончательная рабочая схема изображена на рис. 23, где  $R$  — 5 Мом,  $C$  — 0,02 мкф,  $C_3$  — 0,03 мкф,  $C_1 = C_2$  — 0,1 мкф, ЭО — осциллоскоп ЭО-7,  $D$  — кенотронный выпрямитель на 220 в, НЛ — неоновая лампа.

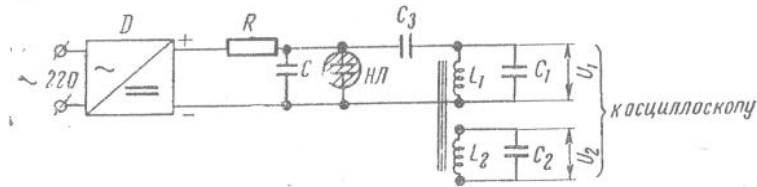


Рис. 23

### 13. ДЕМОНСТРАЦИЯ РЕЗОНАНСНОЙ КРИВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

Резонансная кривая — один из основных вопросов учения о колебаниях. Между тем на лекциях по физике эта кривая демонстрируется довольно редко. Объясняется это тем, что для демонстрации резонансной кривой необходим генератор качающейся частоты, редко встречающийся в физических кабинетах. Подобные генераторы (ИЧХ) выпускаются промышленностью, но отличаются либо высокой стоимостью и громоздкостью, либо известной сложностью принципов конструкции (РК-1)\*. В литературе [15—18] описаны схемы более простых генераторов качающейся частоты, действие которых основано на различных принципах. Таковы генераторы, работающие на RC, генераторы, использующие в качестве переменных реактивностей вариконды или полупроводниковые диоды. Для генераторов на RC характерны те же

\* В РК-1 в качестве переменной реактивности колебательного контура используется реактивная лампа. Кратко изложить принцип действия этой лампы студентам младших курсов затруднительно.

затруднения методического характера, о которых шла речь выше; генераторы на варикондах и полупроводниковых диодах отличаются некоторой неустойчивостью в работе и, кроме того, детали к ним трудно приобрести. Поэтому можно использовать с некоторыми необходимыми изменениями схему из статьи В. Павлова «Схемы генераторов качающейся частоты» [17]. Принцип ее

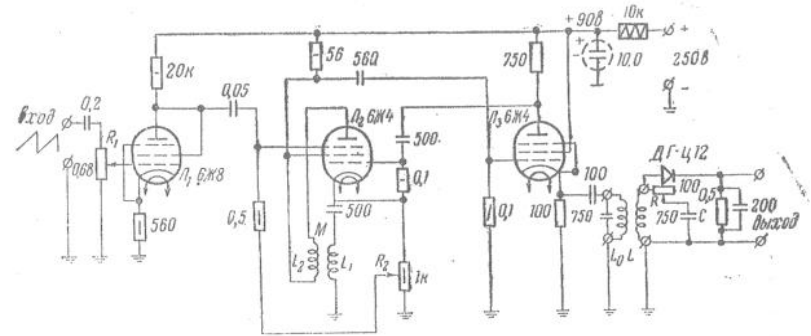


Рис. 24

действия довольно прост: согласно формулам переноса для связанных систем [2], эффективная индуктивность катушки может изменяться под влиянием расположенной рядом с ней второй катушки с током. Если обозначить взаимную индуктивность катушек через  $M$ , отношение сил токов в них —  $K$ , а индуктивность удвоенной первой катушки —  $L_1$ , то

$$L_{эф} = L_1 + \frac{M}{K}$$

$L_{эф}$  изменяют, варьируя отношение сил токов в катушках, для чего удобно воспользоваться пентодом. При изменении потенциала антиднатронной сетки пентода, как известно, изменяется соотношение электронных потоков, попадающих на анод и экранную сетку. Включив катушку  $L_1$  в цепь катода лампы  $L_2$  (рис. 24), вторую катушку  $L_2$  — в цепь анода, подают на антиднатронную сетку напряжение с генератора развертки осциллоскопа. Тогда, в соответствии с изменением пилообразного напряжения развертки, будет изменяться эффективная индуктивность катушки  $L_1$ , а следовательно,

и собственная частота колебательного контура, образованного ею и конденсатором емкостью 500 пф. Пентод  $L_3$  обеспечивает обратную связь в получающемся генераторе качающейся частоты. Лампа  $L_1$  обеспечивает большое входное сопротивление, необходимое для того, чтобы

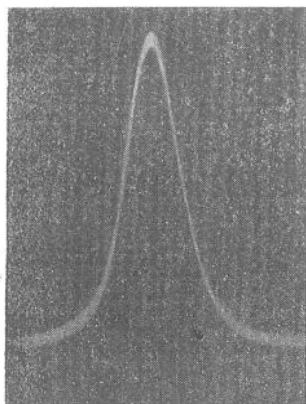


Рис. 25

при снятии пилообразного напряжения с X-пластин осциллографа не перегружать генератор развертки. В противном случае будет искажаться форма пилообразного напряжения. Для питания схемы требуется напряжение 90 в. Можно подавать напряжение от обычного кенотронного выпрямителя на 250 в, применяя проволочное сопротивление на 10 ком.  $L_1$  и  $L_2$  — катушки средневолнового диапазона приемника «Чайка». Катушки  $L_0$  и  $L$  имеют по 100 витков и намотаны на каркасы диаметром 4 см; первая из них помещена внутри второй и может перемещаться для подбора степени связи. Напряжение качающейся частоты ( $\nu = 500$  кГц,  $\Delta\nu = \pm 25$  кГц) подается на катушку  $L_0$  первичного колебательного контура. В испытываемом вторичном контуре  $RLC$  наводится э. д. с. взаимной индукции, и в нем имеет место резонанс напряжений. Возникающие в контуре  $RLC$  колебания детектируются и подаются с нагрузки детектора на вертикальный вход осциллографа ЭО-7, на экране которого получается обычная резонансная кривая (рис. 25)\*.

Практически демонстрация проводится так: на генератор качающейся частоты подается анодное напряжение и напряжение накала ламп. Затем к его входу подводится пилообразное напряжение от выхода X-пластин осциллографа ЭО-7, который расположен на задней стенке осциллографа. Частота генератора развертки устанавливается в диапазоне 7 гц. Выход генератора под-

\* Демонстрационный генератор был изготовлен по нашему заказу в Сибирском физико-техническом институте.

ключается к вертикальному входу осциллографа. Действуя ручками потенциометров  $R_1$  и  $R_2$ , получают на экране резонансную кривую. Подходящие размеры кривой устанавливают с помощью регуляторов усиления вертикального и горизонтального входов. Затем вводят сопротивление  $R$  в колебательный контур и показывают, что при этом резонансная кривая становится более низкой, а резонанс более тупым.

#### 14. ДЕМОНСТРАЦИЯ ОДНО- И ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Для демонстрации одно- и двухполупериодного выпрямления можно использовать купроксный выпрямитель ВАК-8. Его схема изображена на рис. 26.

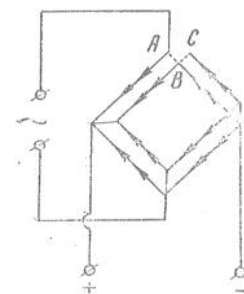


Рис. 26

Из схемы видно, что выпрямитель работает как двухполупериодный, но если разъединить точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ \*, то ток может протекать лишь в одном направлении (когда потен-

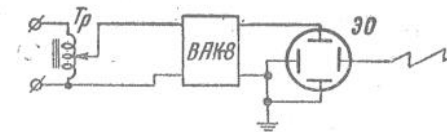


Рис. 27

циал точки  $A$  положителен), т. е. выпрямление получается однополупериодным. Поэтому в схеме выпрямителя следует разъединить между собой указанные точки и поставить выключатели между  $A$  и  $B$ ,  $B$  и  $C$ \*\*.

При замкнутых выключателях получается двухполупериодное выпрямление, при разомкнутых — однополупериодное. Для демонстрации работы выпрямителя в том и другом режиме собирают цепь, согласно рис. 27, и подбирают необходимую частоту развертки в интервале от 15 до 100 гц так, чтобы получить устойчивую картину на экране осциллографа. Для этого пригоден любой осцил-

\* Для этого отпаиваются концы проводника, соединяющего среднюю и две крайних шайбы селенового столбика.

\*\* Можно поставить один трехполюсный переключатель.

лоскоп, но удобно взять ЭО-7, как имеющий крупный экран и большое усиление.

**Примечание.** Для удобства можно поставить только один выключатель между точками *A* и *B*, оставив *B* и *C* разомкнутыми. При его замыкании снова получается двухполупериодное выпрямление, но амплитуды соседних полувольт будут не вполне одинаковыми из-за некоторого различия сопротивления для противоположных направлений тока.

### 15. СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Характеристика выпрямителя представляет собой график зависимости тока, текущего через выпрямитель,

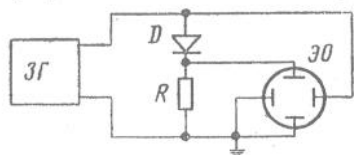


Рис. 28

от напряжения, наложенного на него. Следовательно, для получения на экране осциллоскопа характеристики выпрямителя необходимо на вертикальный вход осциллоскопа подать напряжение, снятое с активного сопротив-

ления, включенного последовательно с выпрямителем и, стало быть, пропорциональное току через него, а на горизонтальный — переменное напряжение, подаваемое на выпрямитель. Используемая при этом схема\* изображена на рис. 28, где *R* — 3 ком; *D* — выпрямитель, например, купроксный ВАК-8, селеновый столбик или германиевый диод ДГ-Ц2; *ЗГ* — любой звуковой генератор, например, ГЗ-1.

Использование звукового генератора для подачи переменного напряжения в данную цепь целесообразно по следующим соображениям: вертикальный и горизонтальный усилители осциллоскопа вносят в подаваемые на них напряжения определенные фазовые сдвиги, обычно неравные. Из-за этого фигура, получающаяся на экране, будет искаженной, «раздвоенной»\*\*. Но величина фазовых сдвигов зависит от частоты переменного тока, поэтому, используя звуковой генератор, можно подобрать ее так, чтобы оба сдвига были равны. При этом харак-

\* См. «Демонстрация характеристики самостоятельного разряда в газе».

\*\* Аналогично обычной фигуре Лиссажу, которая будет прямой лишь при разности фаз обоих напряжений, равной 0 или 180°. Во всех остальных случаях имеем эллипс — «раздвоение».

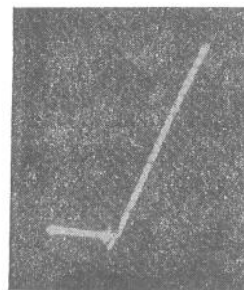


Рис. 29

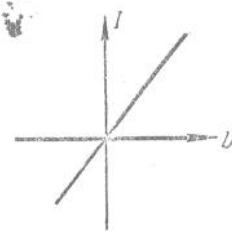


Рис. 30

теристика получит нормальный вид\*, изображенный на рис. 29. Целесообразно повторить опыт, включив вместо выпрямителя обычное сопротивление. Характеристика последнего будет линейной (рис. 30).

### 16. СНЯТИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГИ ПЕТРОВА

При изучении дугового разряда большое значение имеет ознакомление с характеристикой дуги. Динамиче-

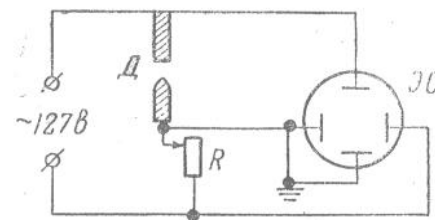


Рис. 31

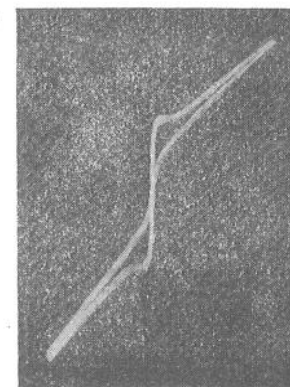


Рис. 32

\* Если характеристика получается повернутой на 180° относительно горизонтальной оси, следует переключить клеммы выпрямителя.

скую характеристику дуги можно получить непосредственно на электронном осциллокопе, если дуга питается переменным током. При этом на горизонтальный вход подается напряжение, снятое с сопротивления, включенного последовательно с дугой и пропорциональное току, а на вертикальный вход — напряжение, снятое непосредственно с дуги (см. рис. 31)\*. На рис. 32 хорошо заметны «падающие» участки характеристики, гистерезисные явления и др.

### 17. СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПЫ

Сеточной характеристикой триода является график зависимости силы анодного тока от напряжения на сетке. Если подать на сетку и горизонтальный вход электронного осциллокопа переменное напряжение, а на вертикальный вход последнего — напряжение, пропорциональное силе соответствующего анодного тока, то электронный луч выпишет характеристику (аналогично можно получить анодные и сеточные характеристики более сложных ламп).

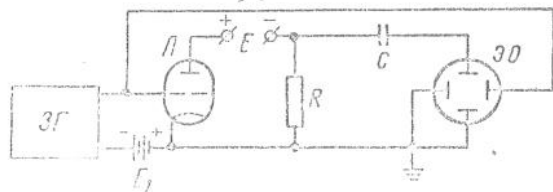


Рис. 33

Схема, которая используется для этой цели, изображена на рис. 33, где ЗГ — звуковой генератор ГЗ-1, R — сопротивление 4 ком, C — емкость 2 мкф, E — кенотронный выпрямитель на 220 в, E<sub>1</sub> — батарея на 2—4 в, ЭО — электронный осциллоскоп, Л — триод 6Ф5. Как видно из этого рисунка, напряжение, подаваемое на горизонтальный вход осциллокопа, совпадает с напряжением, пода-

\* То, что по вертикальной оси откладывается напряжение, а по горизонтальной — сила тока, соответствует обычному методу построения характеристик дуги.

ваемым на сетку. Напряжение, подаваемое на вертикальный вход, снимается с активного сопротивления R. Оно, следовательно, пропорционально анодному току. Назначение других деталей цепи следующее: батарея E<sub>1</sub> служит для подачи сеточного смещения. Конденсатор C не пропускает постоянное напряжение E кенотронного выпрямителя на осциллоскоп. Таким образом, получаем сеточную характеристику триода. Поскольку при увеличении анодного тока растет отрицательный потенциал верхнего конца сопротивления R, характеристика оказывается повернутой на 180° относительно горизонтали. Если желательно получить нормальное расположение характеристики, то к усилителю вертикального входа осциллокопа следует добавить один каскад, сделав общее число каскадов усиления нечетным. Переменное напряжение подается на сетку от звукового генератора. Использовать сеть переменного тока для этой цели не всегда возможно. Дело в том, что вертикальный и горизонтальный усилители вносят обычно неодинаковые фазовые сдвиги в подаваемые на них напряжения. За счет этого характеристика получается «раздвоенной». Избавиться от этого можно или применяя вспомогательные фазо-корректирующие схемы [5], или используя переменное напряжение определенной частоты. Последний способ основан на том, что фазовый сдвиг зависит от частоты. Частоту подбирают так, чтобы фазовые сдвиги в усилителях совпадали. Тогда получается нормальная характеристика, изображенная на рис. 34.

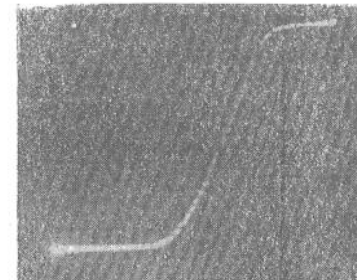


Рис. 34

Можно привести еще один способ получения нормального расположения характеристики электронной лампы. Он очень прост: достаточно снять кожух осциллокопа и переключить проводники контактов панели электронно-лучевой трубки, ведущих к пластинам вертикального отклонения. Целесообразно поставить переключатель, позволяющий использовать оба способа подключения пластин.

## 18. ДЕМОНСТРАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В ГАЗЕ

При изучении разряда в газе и ознакомлении с работой газонаполненных приборов целесообразно продемонстрировать их вольтамперную характеристику. Для этого используется цепь, собранная согласно схеме

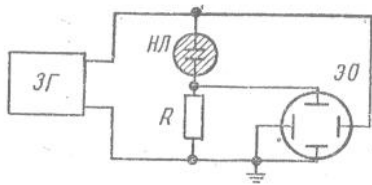


Рис. 35

рис. 35, где ЗГ — звуковой генератор ГЗ-1, НЛ — неоновая лампа МН-3 или МН-5,  $R$  — сопротивление на 24 ком, ЭО — осциллоскоп ЭО-7.

Как видно из схемы, на вертикальный вход осциллоскопа подается напряжение, снятое с активного сопротивления  $R$ . Следовательно, отклонение электронного луча по вертикали пропорционально току, проходящему через газоразрядный прибор.

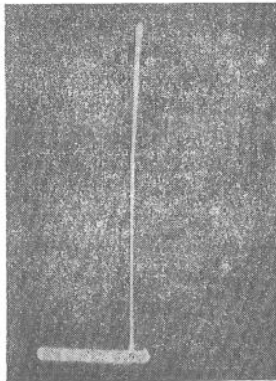


Рис. 36

Отклонение по горизонтальной оси соответствует полному напряжению на последовательно включенных неоновой лампе и сопротивлении. Такое включение дает возможность соединить заземленные клеммы звукового генератора и осциллоскопа. При другом включении изображение будет искажаться посторонними наведенными напряжениями.

Сравнительно небольшая величина сопротивления  $R$  обеспечивает малое отличие напряжения горизонтального входа от напряжения на неоновой лампе. Подобрать на звуковом генераторе частоту в 100—150 гц и соответствующее напряжение на выходе, наблюдают свечение неоновой лампы и получают вольтамперную характеристику (рис. 36).

Несмотря на использование переменного напряжения, вследствие неодинаковости электродов лампы, разряд в газе возникает лишь при одной полярности напряжения.

рис. 35, где ЗГ — звуковой генератор ГЗ-1, НЛ — неоновая лампа МН-3 или МН-5,  $R$  — сопротивление на 24 ком, ЭО — осциллоскоп ЭО-7.

Как видно из схемы, на вертикальный вход осциллоскопа подается напряжение, снятое с активного сопротивления  $R$ . Следовательно, отклонение электронного луча по вертикали пропорционально току, проходящему через газоразрядный прибор.

Отклонение по горизонтальной оси соответствует полному напряжению на последовательно включенных неоновой лампе и сопротивлении. Такое включение дает возможность соединить заземленные клеммы звукового генератора и осциллоскопа. При другом включении изображение будет искажаться посторонними наведенными напряжениями.

Сравнительно небольшая величина сопротивления  $R$  обеспечивает малое отличие напряжения горизонтального входа от напряжения на неоновой лампе. Подобрать на звуковом генераторе частоту в 100—150 гц и соответствующее напряжение на выходе, наблюдают свечение неоновой лампы и получают вольтамперную характеристику (рис. 36).

Несмотря на использование переменного напряжения, вследствие неодинаковости электродов лампы, разряд в газе возникает лишь при одной полярности напряжения.

Поэтому характеристика содержит, помимо горизонтального участка, обусловленного непроводящим газом, лишь один стремительно поднимающийся вверх участок. Его начало соответствует напряжению зажигания газа. После возникновения разряда напряжение на лампе практически постоянно, что дает возможность использовать ее в качестве газового стабилизатора. Дальнейшее увеличение напряжения приводит только к резкому росту тока и росту падения напряжения на сопротивлении  $R$ . Если увеличить частоту до 10—15 кГц и взять достаточную амплитуду напряжения, то может возникнуть разряд при обеих полярностях напряжения.

Одновременно становятся заметными гистерезисные эффекты на характеристике, обусловленные конечностью времени рекомбинации.

Примечание. В демонстрации может использоваться любая неоновая лампа, не имеющая встроенного сопротивления. По этой причине не подходит лампа СН-2-127.

## 19. ДЕМОНСТРАЦИЯ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКА

Петля гистерезиса является графиком зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля. Чтобы получить этот график на экране осциллоскопа, собирают цепь (рис. 37), в которой  $R_1$  — 50 ом, 5 а,  $R_2$  — 10 ом, 5 а,  $R$  — 36 ком,  $C$  — 2 мкф. ( $R_1$  указано для напряжения сети 127 в; при напряжении 220 в желательно  $R_1$  взять порядка 80—90 ом).

Напряженность  $H$  магнитного поля, создаваемого переменным током  $I$ , текущим по первичной обмотке, равна

$$H = 0,4\pi \frac{N_1}{L} I, \quad (1)$$

где  $N_1$  — число витков первичной обмотки,  $L$  — длина магнитопровода трансформатора.

Напряжение  $U_x$ , снимаемое с активного сопротивления, включаемого в цепь первичной обмотки трансформатора, равно

$$U_x = IR_2. \quad (2)$$

Поэтому, если на горизонтальный вход осциллографа подать это напряжение, то отклонение луча по оси абсцисс будет пропорционально силе тока, а следовательно, и напряженности магнитного поля  $H$  трансформатора. Электродвижущая сила индукции, возникающая во вторичной обмотке, равна

$$E = -k \frac{d\Phi}{dt} = -kS \frac{dB}{dt} N_2, \quad (3)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения витка вторичной обмотки трансформатора,  $B$  — магнитная индукция,  $N_2$  — число витков вторичной обмотки.

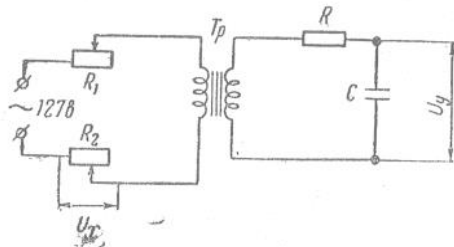


Рис. 37

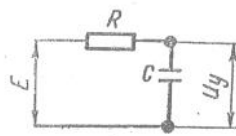


Рис. 38

Подать  $E$  на вертикальный вход нельзя, так как оно пропорционально не  $B$ , а  $\frac{dB}{dt}$ . Напряжение  $E$  подают на вход интегрирующей схемы (рис. 38), в которой емкость и сопротивление подобраны так, чтобы  $Z_c \ll R$  (т. е. реактивное сопротивление конденсатора должно быть во много раз меньше сопротивления  $R$ ). Тогда

$$I = \frac{E - U_y}{R} \approx \frac{E}{R},$$

$$U_y = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int I dt = \frac{1}{RC} \int E dt = -\frac{1}{RC} \int kS \frac{dB}{dt} N_2 dt = -\frac{kSN_2}{RC} B. \quad (4)$$

На вертикальный вход осциллографа подают напряжение  $U_y$  и получают смещение луча, пропорциональное магнитной индукции  $B$ . Вследствие того, что  $H$  периодически меняется, благодаря использованию сети пе-

ременного тока, на экране получается полная петля гистерезиса (рис. 39). При достаточной силе тока в первичной цепи трансформатора на петле ярко выражены области насыщения. Целесообразно во время демонстрации показать петлю при нескольких значениях силы тока. Для демонстрации можно использовать осциллограф Orion EMG-1541 или ЭО-7. Применяя осциллограф Orion, получают лучшую картину за счет меньшего различия фазовых сдвигов, вносимых его усилителями. В этом случае питанием от звукового генератора воспользоваться нельзя, ибо необходим достаточно сильный ток. Впрочем, изображение, получаемое с помощью ЭО-7, также удовлетворительно.

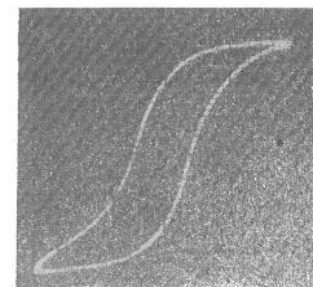


Рис. 39

## 20. НАБЛЮДЕНИЕ ПРЯМОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Простая общедоступная демонстрация осуществляется следующим образом: пьезоэлементы от звукоснимателя закрепляют на каком-либо колеблющемся теле, например, на электрокамертоне, с наклеенной на нем полоской тонкой бумаги. На ней закрепляются четыре последовательно соединенных пьезоэлемента. Крайние фольговые контакты подводятся к вертикальному входу осциллографа с помощью тонких мягких проводничков. На экране осциллографа при колеблющемся электрокамертоне и надлежащей частоте развертки наблюдают импульсы, обусловленные прямым пьезоэффектом при деформациях пьезоэлемента. Если используется осциллограф с большим коэффициентом усиления, например, ЭО-7, то достаточно взять один пьезоэлемент. При отсутствии электрокамертона пьезоэлемент можно укрепить на электровозонке (чашке или молоточке). При наклеивании следует брать немного клея, ибо пластины сегнетовой соли весьма гигроскопичны и непрочны.

В качестве колеблющегося тела можно использовать



и обычный камертон, который должен периодически возбуждаться ударами молоточка.

## 21. ДЕМОНСТРАЦИЯ ГИСТЕРЕЗИСА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА

Для демонстрации гистерезиса сегнетоэлектрика можно использовать цепь, изображенную на рис. 40, где

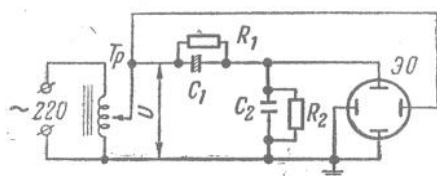


Рис. 40

$Tr$  — автотрансформатор,  $C_1$  — конденсатор с прокладкой из испытуемого сегнетоэлектрика,  $R_1$  — его эквивалентное омическое сопротивление,  $C_2$  — бумажный конденсатор на 4 мкф,

$R_2$  — переменное сопротивление 1 Мом, ЭО — электронный осциллоп ЭО-7.

В качестве конденсатора с сегнетоэлектриком используется пластинка сегнетовой соли размером  $2 \times 2$  см, толщиной 3 мм, заключенная между фольговыми прокладками и зажатая в деревянном зажиме. Удобно воспользоваться пьезоэлементами от звукоснимателей из сегнетовой соли ( $1 \times 3,5$  см), имеющимися в продаже.

Работа схемы основана на следующих соображениях: гистерезисная кривая сегнетоэлектрика представляет график зависимости поляризации  $P$  от напряженности электрического поля  $E$ . В данной цепи последовательно соединены конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ , причем  $C_2 \gg C_1$ . Поскольку емкостное сопротивление  $\frac{1}{\omega C_2}$  значительно меньше  $\frac{1}{\omega C_1}$ , можно считать, что все напряжение от автотрансформатора падает на конденсаторе с сегнетоэлектриком. Это же напряжение подают на горизонтальный вход осциллопа. Так как  $E = \frac{U}{d}$ , где  $d$  — толщина сегнетоэлектрика, то отклонение электронного луча по горизонтали пропорционально напряженности электрического поля. Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  весьма велики, и, поскольку конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  соединены последовательно, заряды на их пластинах практически равны по

величине. Подавая на вертикальный вход осциллопа напряжение  $U_y$ , снятое с  $C_2$ , равное

$$U_y = \frac{Q}{C_2}, \quad (1)$$

создают отклонение луча по вертикали, пропорциональное заряду конденсатора  $C_1$  и, следовательно, поляризации  $P$ . В итоге луч выписывает петлю гистерезиса сегне-

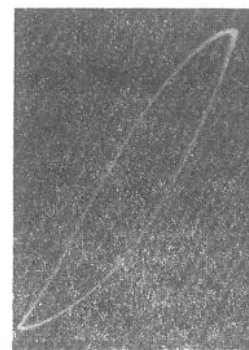


Рис. 41

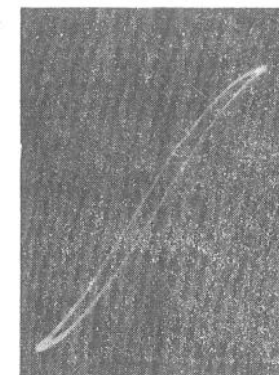


Рис. 42

тоэлектрика. Выведем условие, которому должны удовлетворять величины  $C_2$  и  $R_2$ , чтобы форма петли была минимально искажена. Взяв в качестве  $C_2$  конденсатор с «обычным» линейным диэлектриком, мы должны добиться того, чтобы график зависимости  $P = P(E)$  изображался прямой. Поскольку график является обобщенной фигурой Лиссажу, не должно быть сдвига фаз между напряжениями  $U_x$  и  $U_y$

$$U_y = I \frac{1}{R_2 + i\omega C_2} = \frac{U}{\frac{R_2}{1 + i\omega R_2 C_2} + \frac{R_1}{1 + i\omega C_1 R_1}} \times \frac{R_2}{1 + i\omega C_2 R_2} = \frac{U}{1 + \frac{R_1(1 + i\omega C_2 R_2)}{R_2(1 + i\omega C_1 R_1)}} \quad (2)$$

Но  $U_x$  и  $U$  совпадают по фазе, поэтому, как видно из формулы (2), для совпадения фаз  $U_x$  и  $U_y$  необходимо, чтобы  $C_1 R_1 = C_2 R_2$  или

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

Активное сопротивление сегнетоэлектрика очень велико, вследствие чего приходится увеличивать  $C_2$ . Это увеличение ограничивается коэффициентом усиления осциллоскопа. Поэтому следует ограничиться емкостью  $C_2$ , равной 4—5 мкф. Фотографии гистерезисных петель приведены на рис. 41 (пластина сегнетовой соли) и рис. 42 (пьезоэлемент). В конце демонстрации целесообразно в качестве  $C_1$  включить слюдяной конденсатор, у которого отсутствует гистерезис и зависимость  $P = P(E)$  линейна.

## 22. УСИЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПОЙ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ТРИОДОМ

Действие электронной лампы как усилителя можно показать с помощью схемы рис. 43, где  $ЗГ$  — звуковой

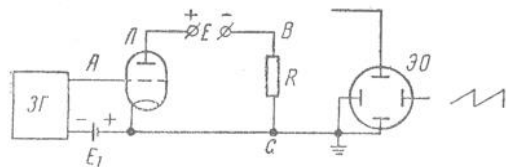


Рис. 43

генератор ГЗ-1,  $E_1$  — батарея сеточного смещения на 2—4 в,  $L$  — триод 6Ф5 или 6С5,  $E$  — кенотронный выпрямитель на 220 в,  $R$  — сопротивление 1—2 Мом,  $ЭО$  — электронный осциллоскоп.

Демонстрация проводится так: заземленную клемму входа осциллоскопа подключают к точке  $C$  схемы и включают генератор развертки. Провод, ведущий ко второй клемме вертикального входа осциллоскопа, подключают сначала к точке  $A$ . На экране электронно-лучевой трубки получают осциллограмму усиленного напряжения. Затем, не меняя усиления осциллоскопа, переключают этот провод на точку  $B$  и наблюдают осциллограмму усиленного напряжения. Усиление осциллоскопа следует

подобрать заранее так, чтобы обе осциллограммы были достаточно видными и помещались на экране.

Для демонстрации работы полупроводникового триода в качестве усилителя используется схема с заземленным эмиттером. Ее преимуществом является то, что она наиболее близка к схеме усиления электронной лампой\* и чаще всего встречается в практике использования плоскостных полупроводниковых триодов.

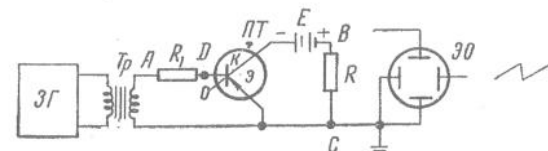


Рис. 44

Усилитель собирается по схеме рис. 44, где  $ЗГ$  — звуковой генератор ГЗ-1,  $Tr$  — понижающий трансформатор 127/24 в,  $R_1$  — сопротивление 1 ком,  $ПТ$  — плоскостной полупроводниковый триод серии П1 [П1Б, П1Е и т. д.] ( $Э$  — эмиттер,  $O$  — основание,  $K$  — коллектор),  $R$  — сопротивление 30 ком,  $E$  — батарея на 10—12 в,  $ЭО$  — электронный осциллоскоп.

Данная схема, не требуя батареи смещения в цепи эмиттер—основание, обеспечивает достаточное усиление и не дает существенных искажений. Демонстрация проводится аналогично предыдущей. Точку  $C$  соединяют с заземленной клеммой осциллоскопа и включают генератор развертки. Затем провод, присоединенный ко второй клемме вертикального входа осциллоскопа, поочередно присоединяют к точкам  $A$  и  $B$ , показывая, что во втором случае напряжение значительно больше. Здесь целесообразно обратить внимание на следующее. Так как сопротивление промежутка эмиттер—основание значительно меньше сопротивления катод—сетка электронной лампы, то, в отличие от условий работы последней, здесь заметная часть усиленного напряжения падает на сопротивление  $R_1$ . Поэтому, чтобы показать фактически усиленное напряжение, следует провод подключить к точке  $D$ .

\* Как известно, эмиттер во многом аналогичен катоду, основание — сетке, а коллектор — аноду электронной лампы.

Трансформатор используется для того, чтобы можно было на полупроводниковый триод подать достаточно малое напряжение, не приводящее к его перегрузке и, как следствие, к искажениям. Регулятор выхода ГЗ-1 сам по себе не обеспечивает достаточно плавной регулировки напряжения в начале шкалы.

### 23. ДЕМОСТРАЦИЯ РАБОТЫ ЛАМПОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Наиболее простой конструкцией лампового генератора является трехточечная, изображенная на рис. 45. В

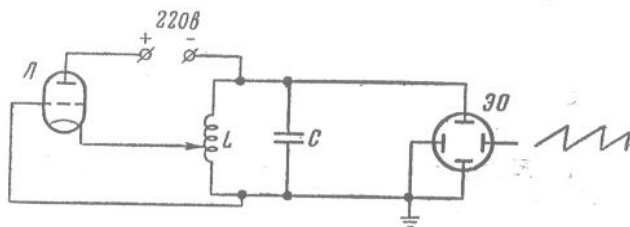


Рис. 45

качестве индуктивности берется катушка  $L$  с 120—150 витками; отвод идет от  $1/3$  или  $1/4$  витков;  $L$  — триод 6С5;  $C$  — конденсатор на 5100 пф.

От конденсатора напряжение подводят к вертикально отклоняющим пластинам осциллографа и при частоте развертки в несколько десятков килогерц получают график возникающих колебаний.

### 24. ДЕМОСТРАЦИЯ РАБОТЫ ЛАМПОВОГО ГЕНЕРАТОРА В ФАЗОВОЙ ПЛОСКОСТИ

Демонстрация работы лампового генератора в фазовой плоскости разработана и описана в статье Волковой А. Я., Малова Н. Н. и Яшкина А. Я. «Некоторые лекционные демонстрации по курсу экспериментальной физики» [6]. Описанный метод требует применения электронного коммутатора. Если последний отсутствует, то эту демонстрацию можно осуществить следующим образом\*.

\* Некоторые указания при постановке демонстрации даны Л. М. Красильниковой.

В случае электрического процесса фазовая плоскость является плоскостью  $I V$ . Поэтому для получения изображения работы лампового генератора на экране электронного осциллографа следует подать на его вертикальный вход напряжение, снятое с конденсатора, пропорциональное напряжению в контуре, а на горизонтальный — напряжение, снятое с омического сопротивления, пропорциональное току. Трудность задачи состоит в том, что для получения семейства фазовых траекторий при уста-

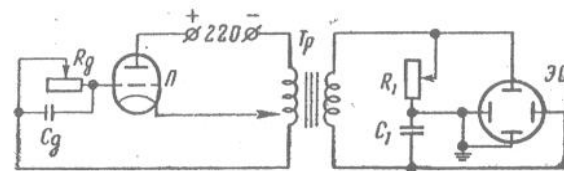


Рис. 46

новлении колебаний и предельного цикла необходимо, чтобы работа генератора с некоторой, не слишком малой, частотой прерывалась, возобновляясь затем снова. В вышеупомянутой работе это достигалось электронным коммутатором. Здесь же использована следующая идея: известно, что при большой постоянной времени гридлика  $\tau = R_g C_g$ , генерация становится прерывистой. Это и дает простой способ постановки данной демонстрации.

Рабочая схема изображена на рис. 46, где  $C_g$  — 0,1 мкф,  $R_g$  — 500 ком,  $R_1$  — 150 ком,  $C_1$  — 0,02 мкф,  $T_p$  — выходной трансформатор с первичной обмоткой из 2200 витков, с отводом от 200 и вторичной из 90 витков,  $L$  — триод, ЭО — электронный осциллограф.

Демонстрация осуществляется следующим образом: изменяя величину переменного сопротивления  $R_g$ , добиваются того, чтобы возникающие колебания звуковой частоты периодически прерывались. Это сразу заметно по слуху. Подбирают на осциллографе подходящую частоту развертки. Сначала демонстрируют график колебаний. На экране при этом виден ряд дугов колебаний. Затем отключают генератор развертки и наблюдают изображение процесса колебаний в фазовой плоскости  $I V$ . Сопротивлением  $R$  устанавливают необходимый размер картины. Получающуюся картину ряда фазовых траекторий, сходящихся к предельному циклу, с помощью переменного

го сопротивления  $R_g$  регулируют так, чтобы предельный цикл по яркости резко выделялся среди других траекто-

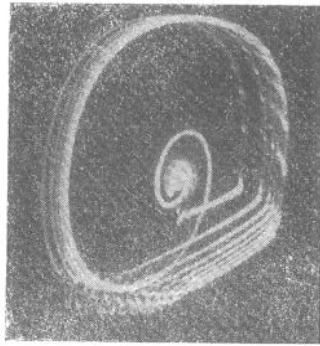


Рис. 47

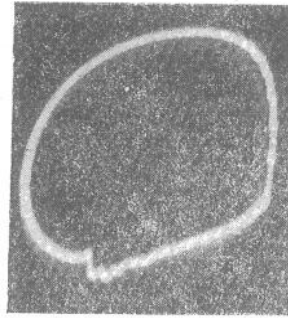


Рис. 48

рий (рис. 47). Затем, уменьшив  $R_g$ , получают колебания без срыва. Снова демонстрируют график колебаний постоянной амплитуды и затем один предельный цикл (рис. 48).

## 25. АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Весьма простая схема, дающая возможность продемонстрировать амплитудную модуляцию, изображена на рис. 49. Здесь  $Tr$  — разборный трансформатор с коэффи-

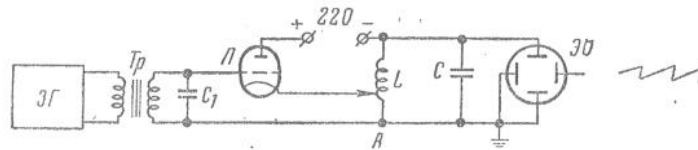


Рис. 49

циентом трансформации 4—5,  $L$  — триод 6С5,  $C_1$  и  $C$  — по 5100 нф,  $L$  — катушка из 100—150 витков.

Принцип работы схемы следующий.

Конденсатор  $C_1$  соединяет накоротко сетку триода с точкой  $A$  для токов высокой частоты, т. е. получается обычная трехточечная схема генератора. Но для напряжения звуковой частоты, поступающего от звукового ге-

нератора через трансформатор  $Tr$  на сетку триода, конденсатор  $C_1$  представляет большое сопротивление  $\left(\frac{1}{\omega C_1}\right)$ .

В результате это напряжение полностью подается на сетку; оно модулирует по амплитуде возникающие высокочастотные колебания. Демонстрация проводится так: при частоте развертки порядка 100 гц получают прежде всего график несущей высокой частоты. Затем увеличивают амплитуду выхода звукового генератора. Получают модулированные колебания. Увеличивая глубину модуляции, добавляются перемодулированных колебаний. Затем то же показывают при другой частоте модуляции.

## 26. ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Для получения наглядной картины частотной модуляции мало пригодны используемые на практике схемы получения частотно-модулированных колебаний, так как в них относительное изменение частоты невелико. Получающаяся на экране осциллографа картина невыразительна. Для получения четкого изображения частотной модуляции можно использовать ламповый генератор с частотой в несколько сотен герц, имеющий индуктивность, которая меняется с частотой 50 гц. Получающиеся колебания имеют «качающуюся» частоту, дающую очень четкую осциллограмму.

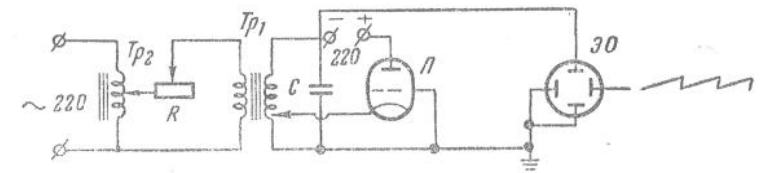


Рис. 50

Схема собирается согласно рис. 50. Здесь  $Tr_1$  — выходной трансформатор, имеющий первичную обмотку из 2200 витков, с отводом от 200 витков. Вторичная обмотка состоит из 90 витков.  $R$  — 200 ом,  $Tr_2$  — ЛАТР-2, от которого подается напряжение около 20 в,  $C$  — 68 нф,  $L$  — лампа 6С5.

Вследствие подмагничивания сердечника трансформатора переменным током от сети (через ЛАТР) периодически изменяется индуктивность контура, что обуслови-

вает периодически меняющуюся частоту колебаний. На вертикальный вход осциллографа подается напряжение, снятое с конденсатора  $C$ . Подбирают подходящую частоту развертки порядка 2—3 гц и получают картину частотно-модулированных колебаний.

## 27. ДЕМОНСТРАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ ПРИ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Распределение электронов по энергиям при термоэлектронной эмиссии можно продемонстрировать с помощью установки, собранной, как указано на рис. 51,

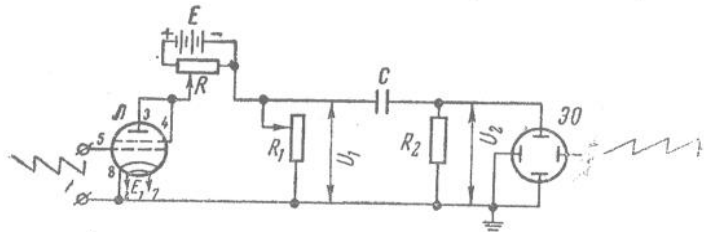


Рис. 51

где  $L$  — электронная лампа 6ПЗ (тетрод),  $E$  — анодная батарея на 70—80 в,  $E_1$  — батарея накала из четырех щелочных аккумуляторов,  $R$  — переменное сопротивление в несколько сотен килоом,  $R_1$  — переменное сопротивление на 1,5 Мом,  $C$  — конденсатор емкостью 620 нф,  $R_2$  — безындуктивное сопротивление на 62 ом,  $ZO$  — электронный осциллоскоп ЭО-7.

Принцип работы схемы заключается в следующем: на управляющую сетку лампы 6ПЗ подается пилообразное напряжение минусом на сетку. Оно задерживает испускаемые катодом электроны, летящие к аноду, который поддерживается под малым положительным потенциалом относительно катода. Если бы электроды были плоскими, то, при тормозящем потенциале  $-V$  на сетке, до анода долетали бы лишь те электроны, нормальная составляющая скорости которых удовлетворяет условию

$$eV \leq \frac{mv_n^2}{2} \leq \infty.$$

В случае цилиндрических электродов дело обстоит несколько иначе. Здесь анодный ток определяется как радиальной, так и тангенциальной составляющими скорости, поскольку обе они направлены к аноду. Соответствующий расчет выполнен В. Шоттки (19), показавшим, что в этом случае, при достаточно малом радиусе катода по сравнению с радиусом внешнего цилиндра, справедлива формула

$$I_A = I \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \sqrt{\frac{eV}{kT}} e^{-\frac{eV}{kT}} + \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx \right), \quad (1)$$

где  $I_A$  — сила анодного тока при тормозящем потенциале  $-V$ ,  $I$  — сила тока насыщения.

Второй член равенства (1) мал по сравнению с первым для всех значений  $V$ , за исключением весьма малых. Мгновенная сила анодного тока и в этом случае приближенно пропорциональна количеству испускаемых электронов с энергиями  $E$ , удовлетворяющими неравенству  $eV \leq E \leq \infty$ . При построении графика функции распределения по энергиям на оси ординат откладывается плотность функции распределения, т. е. в данном случае количество электронов с энергиями, близкими к  $E$ , приходящееся на единичный интервал энергии. Как легко видеть, плотность вероятности совпадает с производной анодного тока по энергии. Значение энергии, соответствующее задерживающему потенциалу  $-V$ , равно  $eV$ , а поскольку напряжение  $V$  линейно изменяется с течением времени, то с точностью до постоянного коэффициента можно находить производную от падения напряжения на сопротивлении  $R_1$  по времени. Эту производную можно получить с помощью дифференцирующей ячейки  $CR_2$ , так как напряжение  $U_2$  на выходе последней пропорционально производной  $\frac{dU_1}{dt}$  от напряжения  $U_1$ , подаваемого на ячейку\*. Если напряжение  $U_2$  подать на

\* Чтобы убедиться в этом, воспользуемся законом Кирхгофа, записанным для дифференцирующей ячейки. Имеем  $U_1 = I_1 R_2 + \frac{1}{C} \int I_1 dt$ , где  $I_1$  — ток, текущий в дифференцирующей ячейке.

Если  $\frac{1}{\omega C} \gg R_2$ , то  $I_1 = C \frac{dU_1}{dt}$ . Для напряжения  $U_2$  получим  $U_2 = I_1 R_2 = R_2 C \frac{dU_1}{dt}$ .

вертикальный вход осциллоскопа с включенным генератором развертки, то получается осциллограмма приближенного распределения электронов по энергиям.

Наблюдаемая зависимость близка к распределению Максвелла (рис. 52). Это соответствует результату, получаемому при определении производной по  $V$  от значения силы анодного тока по формуле Шоттки (1).

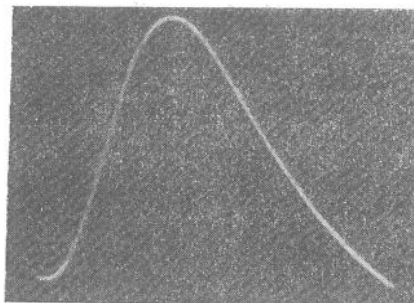


Рис. 52

Практически демонстрация проводится так: напряжение  $V$  подается от генератора развертки осциллоскопа Ogiou EMG-1541\*. Его проще всего снять с выводов горизонтальных пластин электронно-лучевой трубки, расположенных на задней стенке осциллоскопа. Для этой цели используются среднее и нижнее гнезда слева. В гнезда не следует вставлять штекеры, так как при этом автоматически отключается генератор развертки. Следует вводить в гнезда тонкие проводники.

Частота генератора развертки осциллоскопа Ogiou выбирается в диапазоне от 9 до 50 кГц, его амплитуда должна быть наименьшей. Частота генератора развертки осциллоскопа ЭО-7 лежит в диапазоне 25 кГц. Действуя плавными регуляторами частоты и регуляторами вертикального и горизонтального усилителей осциллоскопа ЭО-7, добиваются наиболее выразительной картины.

\* Можно было бы подать на сетку лампы пилообразное напряжение от генератора развертки осциллоскопа ЭО-7, но тогда, вследствие малости получающегося при этом напряжения, требуется добавочный усилитель.

## 28. СЧЕТЧИК ГЕЙГЕРА—МЮЛЛЕРА И НАБЛЮДЕНИЕ ИМПУЛЬСОВ ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ *из Луженица*

Для этой демонстрации можно использовать счетчики АММ-2 или АММ-4, так как необходимое напряжение можно получить от того же выпрямителя ВСС.

Схема опыта изображена на рис. 53, где  $C_1$  — 0,25 мкф, 2 кв,  $R$  — 3,9 Мом,  $C$  — 0,1 мкф, 2 кв, ГМ — счетчик АММ-2, ВСС — высоковольтный выпрямитель на 1000—1500 в.

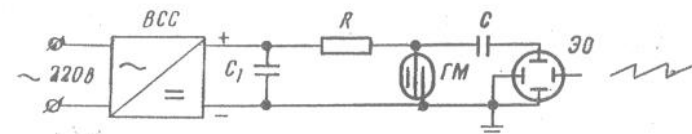


Рис. 53.

Чтобы демонстрация была успешной, необходим конденсатор  $C_1$ . Он не принимает непосредственного участия в работе схемы, а играет роль фильтра. Обязательно и наличие хорошего заземления, которое легко получить, поместив конец заземляющего провода в слегка приоткрытый водопроводный кран. При соблюдении этих условий удастся избавиться от всяких наводок, которые, в противном случае, искажают картину. Демонстрация проводится так: включают частоту развертки в интервале 50—100 гц и подают высокое напряжение на счетчик. Если радиоактивный препарат удален от счетчика, то на экране осциллоскопа наблюдают отдельные отрицательные импульсы, обусловленные фоном. Приближая постепенно препарат к счетчику, замечают, что частота импульсов резко увеличивается. Когда препарат находится почти рядом со счетчиком, наблюдается своеобразная «бахрома» — столь часты выбросы. Наиболее удачно проходит демонстрация с осциллоскопом ЭО-7.

## 29. ДЕМОНСТРАЦИЯ ОПЫТОВ ФРАНКА—ГЕРЦА

Простой способ, дающий возможность продемонстрировать опыты Франка—Герца, основан на том, что кривая с провалами фактически является вольтампер-

ной характеристикой зависимости электронного тока от напряжения, наложенного на сетку газонаполненного прибора, например, тиратрона. Схема, применяемая в демонстрации, приведена на рис. 54. Здесь  $T$  — тиратрон ТГ-1-0,1-1,3;  $R$  — переменное сопротивление в несколько сотен килоом;  $ЭО$  — осциллоскоп Orion EMG-1541 или ЭО-7. Переменное напряжение подается от генератора, дающего гармонические колебания с частотой до 20 кГц или нескольких Меггерц. Можно использовать ГЗ-1 или Orion EMG type 1131.

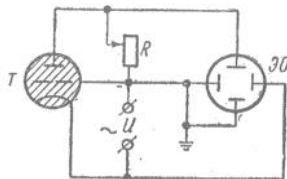


Рис. 54

Схема работает следующим образом: переменное напряжение  $U$  периодически меняет кинетическую энергию электронов, летящих к сетке. В промежутке сетка—анод они попадают в тормозящее поле, созданное отрицательным потенциалом на верхнем конце сопротивления  $R$ , возникшим за счет анодного тока.

Поскольку на горизонтально отклоняющие пластины осциллоскопа подано напряжение  $U$ , а на вертикальные — напряжение, снятое с активного сопротивления  $R$ , на экране осциллоскопа получается график зависимости потока электронов от энергии. При четном числе каскадов усиления у осциллоскопа график повернут на  $180^\circ$  относительно оси  $X$ . Если желательно получить нормальное расположение графика, следует добавить один каскад усиления перед вертикальным входом осциллоскопа. Увеличивая амплитуду, при частоте переменного напряжения около 5 кГц, получают характерную кривую с одним или несколькими минимумами (рис. 55, 56). В то же время по возникшему свечению заметно возбуждение атомов газа.

Используя частоту в несколько сотен килогерц, можно получить кратные возбуждения двух уровней энергии. Получить большее количество «провалов» (больше трех-четырех) этим путем затруднительно, ибо за счет фазовых искажений минимумы на кривой начинают образовывать петли. Борьба с искажениями изменением частоты звукового генератора нельзя, ибо здесь само явление обладает дисперсией — при определенной частоте оно наиболее выразительно. Поэтому данная

кривая демонстрируется на осциллокопе Orion EMG-154, дающем меньше искажения.

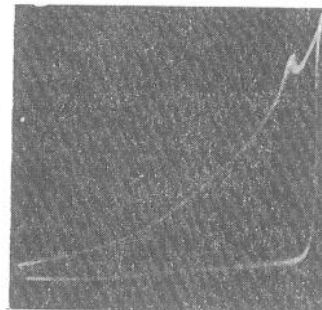


Рис. 55

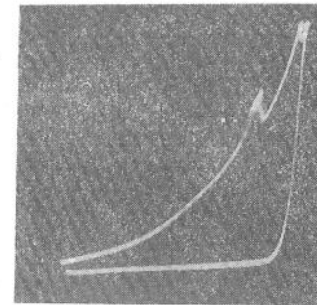


Рис. 56

Эффектную картину с большим числом минимумов можно получить на любом осциллокопе (например,

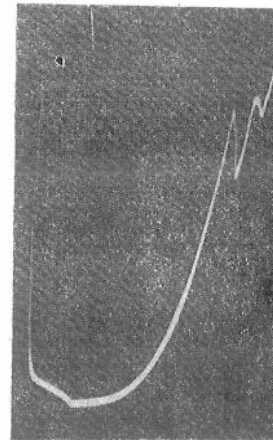


Рис. 57

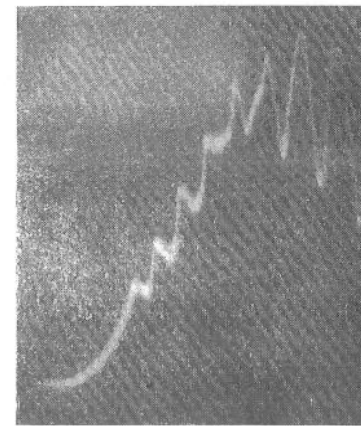


Рис. 58

ЭО-7), если включить генератор развертки\*. Здесь приводятся две фотографии, снятые при двух значениях напряжения на сетке тиратрона (рис. 57, 58). Первая по-

\* Это сводится к тому, что по оси абсцисс непосредственно отложена не энергия электронов, а  $\arcsin$  от величины, ей пропорциональной.

лучена при меньшем напряжении с экрана осциллоскопа Oгiоп\*, вторая — при большем напряжении с экрана осциллоскопа ЭО-7.

Легко осуществить еще один простой способ получения нормального расположения кривой Франка—Герца. Для этого следует снять кожух с осциллоскопа и переключить проводники контактов панели электронно-

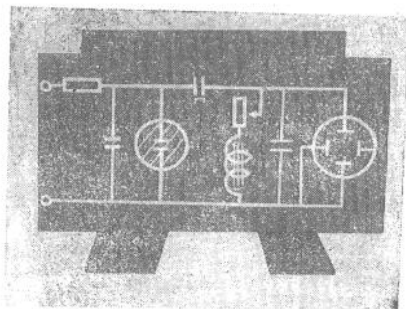


Рис. 59

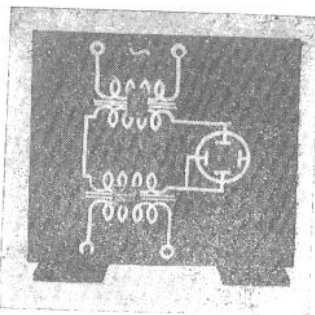


Рис. 60

лучевой трубки, ведущих к пластинам вертикального отклонения. Целесообразно поставить переключатель, позволяющий использовать оба способа подключения пластин\*\*.

**Примечание.** Если демонстрации проводятся в большой аудитории, то размеры экрана осциллоскопа ЭО-7 могут оказаться недостаточными, чтобы обеспечить хорошо видимую картину для далеко сидящих зрителей. В этом случае можно воспользоваться таким способом: осциллограмму проектируют на экран из матового стекла размером  $75 \times 75$  см. Проекция осуществляется так: вплотную у осциллоскопа помещается конденсорная линза диаметром 15 см и фокусным расстоянием 22 см, за ней объектив (Планар — 1:4) с фокусным расстоянием 20,5 см. Яркость осциллограммы берется максимальной. Изображение на матовом стекле получается достаточно большим при удовлетворительной яркости.

Осциллоскоп следует оборудовать двумя переключателями, позволяющими повернуть осциллограмму на  $180^\circ$  относительно горизонтальной и вертикальной осей. Тогда легко получить на матовом экране нормально расположенную осциллограмму.

\* Для устранения обратного хода луча, видимого на рис. 57; следует переключатель *M* модулятора яркости осциллоскопа ЭО-7, расположенный на задней стенке, перевести в положение гашения обратного хода.

\*\* Мысль о постановке этой демонстрации была подана М. В. Дьяченко, которому выражаем благодарность.

В заключение сборника приводим фотоснимки двух щитов, на которых смонтированы приставки для демонстрации затухающих электромагнитных колебаний (рис. 59) и сложения гармонических колебаний одинакового направления (рис. 60). Монтажная проводка находится на задней стороне щита, все детали\* и изображение схемы, изготовленное из полос бумаги, — на передней.

\* За исключением реостата и катушки индуктивности первой схемы, которые располагаются на столе и подключаются к соответствующим клеммам.



ЛИТЕРАТУРА

1. «Современный катодный осциллограф». Сб. статей под редакцией И. С. Абрамсона ч. I, II, III. Изд-во ИЛ, 1951.
2. Н. Н. Малов. Курс электротехники и радиотехники. Гостехиздат, 1955.
3. Г. С. Горелик. Колебания и волны. ГИТТЛ, 1950.
4. Р. В. Телеснин. Лекционные демонстрации по физике. «Электричество», ГИТТЛ, 1952.
5. Г. С. Векслер. Фазовые искажения в каналах  $B$  и  $H$  при осциллографировании гистерезисных петель ферромагнетиков. ЖТФ, 1953, т. XXIII, вып. 5, стр. 806.
6. А. Я. Волкова, Н. Н. Малов, А. Я. Яшин. Некоторые лекционные демонстрации по курсу экспериментальной физики. УФН, 1952, т. 48, вып. 1, стр. 123.
7. К. Н. Кармен. Лекционные демонстрации по сегнетоэлектричеству, УФН; 1957, т. 63, вып. 4.
8. М. Жук. Приставка к осциллографу. «Радио», 1949, № 11.
9. В. Сибрук. Роберт Вуд. Огиз-Гостехиздат, 1946.
10. В. А. Перкальский. Демонстрация затухающих электромагнитных колебаний. «Физика в школе», 1957, № 6.
11. В. А. Перкальский. Демонстрация затухающих и связанных электромагнитных колебаний. «Известия ВУЗов — Физика», 1958, № 3.
12. В. А. Перкальский. Демонстрация опытов Франка—Герца. «Известия ВУЗов — Физика», 1958, № 3.
13. В. А. Перкальский. Демонстрация стоячих звуковых волн. «Физика в школе», 1959, № 3.
14. А. Габович, И. Самусь. Установка для лабораторных занятий по акустике. «Вестник высшей школы», 1958, № 2.
15. Н. А. Моторичев, В. Н. Смирнов. Наглядные пособия по радиолокации. Воениздат, М., 1957.
16. М. А. Згут. Наглядные пособия по радиотехнике. Связьиздат, 1958.
17. В. Павлов. Схемы генераторов качающейся частоты. «Радио», 1955, № 5.
18. Т. Вербицкая, В. Кульцеп. Усилитель НЧ и частотный модулятор на варикондах. «Радио», 1955, № 11.
19. W. Schöttky. Ann. Physik, 1914, b. 44, s. 1011.
20. Ю. М. Каган, В. Л. Федоров, Г. М. Малышев, Л. А. Гаваллас. О методике исследования функции распределения электронов по скоростям в газовом разряде. ДАН СССР, 1951, т. 76, стр. 215.
21. А. Л. Рейман. Термоионная эмиссия. ГТТИ, 1940.
22. П. И. Карасов. Опыты с электронным осциллографом. «Физика в школе», 1956, № 5.
23. К. Дулепов. Широкоэкранный демонстрационный осциллограф. «Радио», 1960, № 3.

Бениамин Шепшелевич Перкальский

Демонстрации  
с электронным  
осциллоскопом  
в курсе физики

Редактор *Л. Б. Милковская*  
Редактор издательства *Н. И. Хрусталева*  
Технический редактор *Л. Л. Ежова*

Сдано в набор 18/III 1960 г. Подписано к печати 1/VI 1960 г.  
Бумага 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>=3 печ. л. 2,46 усл. печ. л. 2,11 уч.-изд. л.  
Тираж 2500 Цена 55 коп.

Государственное издательство «Высшая школа».  
Москва Б-62, Подсосенский пер., 20.

Типография изд-ва «Высшая школа», Неглинная, 29/14. Зак. 316