

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ»**

ФИЗИКА

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

**Учебно-методическое пособие к лабораторной работе № 3-И
для индивидуального лабораторного практикума**

**Санкт-Петербург
2014**

УДК 53(07)
ББК 22.343
Ф 503

Физика. Электромагнетизм: учебно-методическое пособие к лабораторной работе № 3-И для индивидуального лабораторного практикума/ составители: А.А.Абрамович, М.Н.Полянский; СПб ГТУ РП.- СПб.,2014, -18с.

Пособие содержит описание устройства электронного осциллографа и подробные методические рекомендации для работы с ним.

Предназначено для студентов всех направлений дневной формы обучения.

Рецензент: доц. кафедры физики твёрдого тела СПбГУ Борисов Б.Ф.

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой физики СПб ГТУ РП (протокол №8 от 30 июня 2014 г.)

Утверждено к изданию методической комиссией факультета АСУТП СПбГТУРП (протокол № 6 от 2 июля 2014 г.)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3-И

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Электронный осциллограф – это измерительный прибор, позволяющий наблюдать и фиксировать временные диаграммы переменных напряжений, то есть кривые зависимостей переменных напряжений от времени $U(t)$. Зафиксированная кривая $U(t)$ называется осциллограммой. Электронный осциллограф по существу является вольтметром, в котором применен особый индикатор - электронно-лучевая трубка. В электронно-лучевой трубке электронный луч (пучок) вычерчивает на специальном экране кривую $U(t)$. Применение в качестве пишущего устройства («карандаша») электронного луча является характерной особенностью прибора, что и отражается в его названии. Ничтожная инерция электронного пучка ($\sim 10^{-10}$ с) определяет главное достоинство прибора – исключительно высокую скорость вычерчивания (записи) временной диаграммы любого электрического процесса. Это свойство определяет основную область его применения: исследование быстропротекающих процессов.

Вычерченная на экране временная диаграмма (осциллограмма) через некоторое время исчезает. Продолжительность сохранения изображения зависит от свойств экрана. Специальные экраны позволяют сохранять след пучка в течение одной-двух минут, что определяет границу применения прибора для медленно меняющихся напряжений. Громадный диапазон длительностей процессов, анализируемых с помощью электронного осциллографа, обусловил широкое применение прибора во всех областях электротехники и радиотехники. Однако электронный осциллограф применяется не только для исследования электромагнитных процессов. В настоящее время известно множество физических явлений, в которых неэлектромагнитные явления создают электрические сигналы (термоэлектрический эффект, фотоэффект, пьезоэффект и т. д.). Это позволяет создавать датчики, преобразующие неэлектрические величины (температуру, давление, освещенность и др.) в пропорциональное им электрическое напряжение. Типичными датчиками, например, являются микрофон, фотоэлемент, термопара. Применение датчиков позволяет использовать электронный осциллограф для изучения динамики разнообразных процессов. Поскольку кратковременные процессы в современной науке и технике играют громадную роль, электронный осциллограф является универсальным прибором, которым пользуются физики, инженеры, химики, геологи, врачи.

УСТРОЙСТВО ОСЦИЛЛОГРАФА

Электронный осциллограф состоит из четырех основных узлов: электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), генератора развертки, усилителя и блока питания (рис.1).

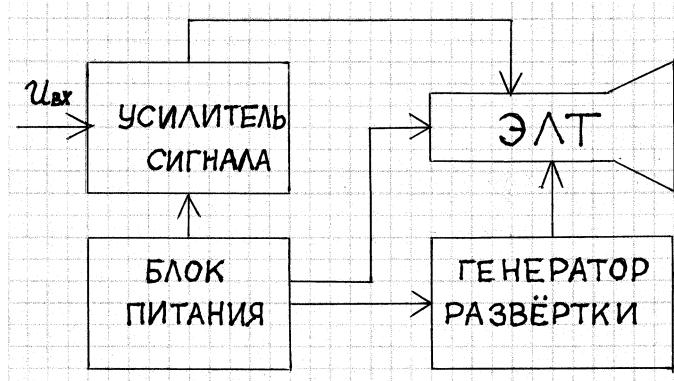


Рис. 1

1. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА (ЭЛТ)

В ЭЛТ требуется создать сфокусированный пучок достаточно быстрых электронов и, перемещая его, писать на экране временные диаграммы. Основными элементами ЭЛТ являются:

Электронная пушка. В электронной пушке электроны с эмиттера разгоняются до необходимой скорости и затем собираются в пучок, который должен быть сфокусирован на экран. Фокусирующее устройство может быть как составным элементом пушки, так и вынесено за его пределы.

Отклоняющая система. Она предназначена для перемещения пучка по экрану. Движение электронов удобно рассматривать в прямоугольной декартовой системе координат. Ее принято располагать так, чтобы не возмущенные полями отклоняющей системы электроны двигались вдоль оси **OZ**, горизонтальное направление на экране трубки совпадало с осью **OX**, а вертикальное - с **OY**. Отклоняющая система конструируется из двух независимых частей: одна из них отклоняет электроны в направлении, параллельном **OX**, а другая – параллельном **OY**.

Экран. Это тонкий слой вещества (люминофора), светящегося под электронной бомбардировкой. Слой нанесен на внутреннюю поверхность переднего торца колбы, при этом те места экрана, на которые попадает пучок, светятся, что и позволяет наблюдать изображение поперечного сечения пучка.

Все части трубки заключены в колбу, в которой создается высокий вакуум. Передний торец колбы, на который нанесен экран, всегда изготавливается из стекла, так как должен быть прозрачным. Он делается обычно значительно шире остальной части колбы для увеличения размера экрана. Рассмотрим теперь устройство ЭЛТ более подробно.

1.1. Электронная пушка

Электронная пушка состоит из катода косвенного подогрева и нескольких электродов-цилиндров и диафрагм. Разрез типовой пушки показан на рис. 2. Нагреватель **Н**, выполненный в виде металлической спирали, нагревает никелевый катод **К**. На торцевой поверхности катода нанесен слой оксида, из которого происходит эмиссия (выброс) электронов. Направления вылета электронов могут быть любыми в пределах полусферы.

Электроны, вылетевшие с катода под разными углами к его поверхности, попадают в электрическое поле цилиндра **М** (модулятора), окружающего катод, или, как его еще иначе называют, управляющего электрода, имеющего отрицательный потенциал относительно катода. Этим полем, поток электронов сжимается и направляется в отверстие модулятора. Так формируется электронный пучок. Интенсивность пучка и, следовательно, яркость светящегося на экране пятна можно регулировать с помощью потенциометра **R₁** (ручка «яркость» на передней панели), так как поле управляющего электрода, помимо сжимающего действия, оказывает еще и тормозящее действие на поток электронов. Следует заметить, что при достаточно большом отрицательном потенциале модулятора можно совсем «погасить» пучок.

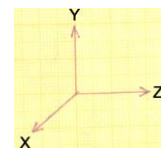
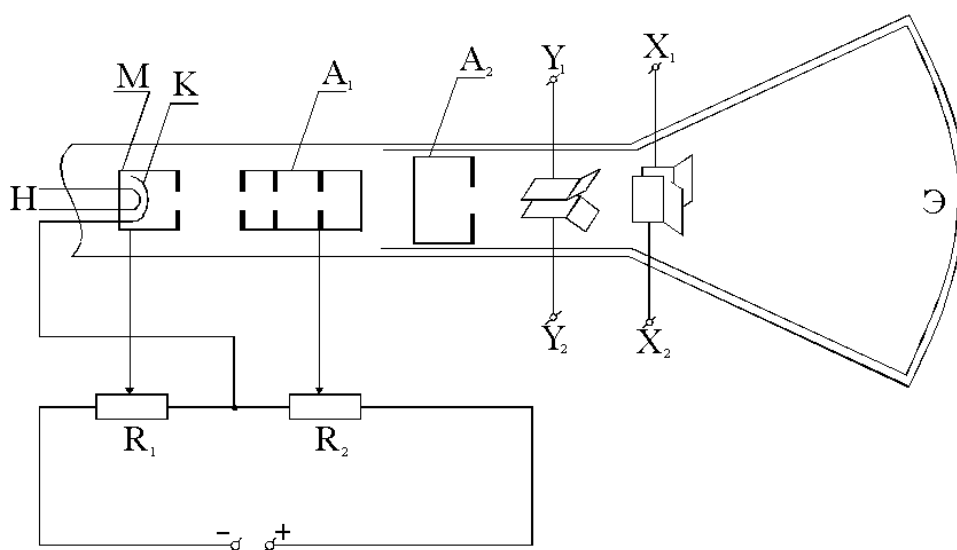


Рис. 2

После модулятора электронный пучок попадает в электрическое поле первого анода **A₁**, или, как его еще называют, фокусирующего цилиндра. На него подается положительное относительно катода напряжение порядка нескольких сот вольт. Это поле ускоряет электроны в пучке и, благодаря своей конфигурации, сжимает электронный пучок. Таким образом, фокусировка луча достигается изменением потенциала первого анода с помощью потенциометра

R₂ (ручка «фокусировка»). Второй анод представляет собой короткий цилиндр, который располагается непосредственно за первым анодом. На него подают более высокое положительное напряжение (1-5 кВ), поэтому этот анод называют ускоряющим. Таким образом, электронам сообщается достаточная скорость, чтобы при бомбардировке люминофора экрана вызвать его свечение, а благодаря фокусировке на экране возникает яркая светящаяся точка. Система электродов: катод – модулятор – первый анод – второй анод образуют так называемую электронную «пушку».

1.2. Отклоняющие системы

После выхода из пушки сформированный электронный пучок (луч) поступает в поле отклоняющей системы. Отклонение пучка можно производить как электрическим (см. приложение I), так и магнитным полем, однако в осциллографах, за редким исключением, применяются ЭЛТ, в которых отклонение луча производится электростатическими полями.

Отклонение пучка в этих трубках производится с помощью двух конденсаторов (рис.2), пластины которых располагаются перпендикулярно друг другу. Электроны проходят первый конденсатор, где отклоняются в вертикальном направлении, затем второй, отклоняющий их горизонтально. Соответственно, пластины первого конденсатора называют вертикально-отклоняющими или **Y**-пластинами, а второго – горизонтально-отклоняющими или **X**-пластинами. Отклонения не зависят друг от друга и в обоих конденсаторах, с принципиальной точки зрения, происходят одинаково. Общее смещение пучка на экране представляет собой просто геометрическую сумму **X** и **Y** смещений.

Если к пластинам **X** или **Y** приложить разность потенциалов, то электронный луч будет отклоняться в горизонтальном или вертикальном направлении. Таким образом, претерпев на своем пути два взаимно перпендикулярных отклонения, электронный луч может быть направлен в любую точку экрана. При отсутствии отклоняющих напряжений на пластинах электронный луч попадает в центр экрана. Если на вертикально отклоняющие пластины **Y** ЭЛТ подать переменное напряжение, то электронный луч начнет колебаться в вертикальном направлении и оставит на экране трубки светящуюся вертикальную линию. Если же переменное напряжение подать только на горизонтально отклоняющие пластины **X**, то на экране получится горизонтальная светящаяся линия. При одновременном воздействии переменных напряжений на обе пары пластин, в зависимости от соотношения их частот, амплитуд и фаз, на экране можно наблюдать различные осциллограммы.

1.3.Экран

Свойства экрана в значительной степени определяют возможности записи временной диаграммы. В современных ЭЛТ применяются различные экраны, которые отличаются друг от друга составом люминофора и способом его

нанесения. В простейших трубках применяется люминофор однородного состава, например, виллемит ($\text{ZnSO}+\text{Mn}$), который наносится одним слоем. В трубках с длительным послесвечением применяются различные люминофоры, наносимые в несколько слоев.

Яркость свечения возрастает как с увеличением плотности тока в пучке, так и с ростом энергии бомбардирующих электронов. Необходимо отметить, что свечение возникает не мгновенно после начала бомбардировки данного места экрана, а постепенно. Это не позволяет слишком быстро перемещать пучок по экрану, что ограничивает скорость вычерчивания кривой. После прекращения бомбардировки люминофора электронами свечение исчезает не сразу, а продолжается еще некоторое время, т.е. наблюдается «послесвечение». Время послесвечения зависит от состава люминофора и для разных материалов изменяется в очень широких пределах от 10^{-6} сек. до нескольких секунд. В трубках обычных осциллографов время послесвечения составляет миллисекунды. Наличие послесвечения при не слишком быстрой записи играет положительную роль при визуальном наблюдении временных диаграмм, так как уменьшает мелькание картины. Трубки, в которых люминофоры имеют время послесвечения выше двух секунд, считаются трубками с длительным послесвечением. Их применяют в осциллографах, предназначенных для изучения сравнительно медленно протекающих процессов, например, в системах автоматического регулирования, содержащих массивные узлы, в радиолокации и в медицине при снятии электрокардиограмм.

2. ГЕНЕРАТОР «ПИЛООБРАЗНОГО» НАПРЯЖЕНИЯ (РАЗВЁРТКИ) ОСЦИЛЛОГРАФА

Для получения осциллограммы, изображающей зависимость исследуемого напряжения от времени $U_y = f(t)$, вспомогательное напряжение U_x должно быть пропорционально времени. При этом электронный луч, отклоняясь в вертикальном направлении в соответствии с законом исследуемого напряжения, одновременно будет двигаться равномерно вдоль экрана. Значит, напряжение U_x развертки должно сравнительно медленно возрастать в течение некоторого времени, а затем мгновенно падать до нуля (рис.3а): график такого напряжения по форме напоминает зубцы пилы, поэтому это напряжение называется «пилообразным». Реальное пилообразное напряжение получают путем чередующихся между собой напряжений при зарядке (рис.3б) (время t_1) и разрядке (время t_2) конденсатора (см. Приложение 2). Очевидно, что при равенстве периодов исследуемого напряжения T и развертки T_p на экране получится один период исследуемого напряжения. При $T_p = nT$ (n – целое число) осциллограмма будет представлять собой кривую из n периодов исследуемого напряжения. При незначительном нарушении этого условия осциллограмма начнет двигаться либо вправо ($T > T_p$), либо влево ($T < T_p$) вдоль оси X , при этом картина на экране будет нестабильна и трудна для наблюдения. Это называется «рассинхронизацией» (ниже будет объяснено, как избавиться от этого). Таким

образом, для получения временной осциллограммы надо на вертикально отклоняющие пластины трубки подавать исследуемое напряжение U_y , а на горизонтально отклоняющие пластины – пилообразное

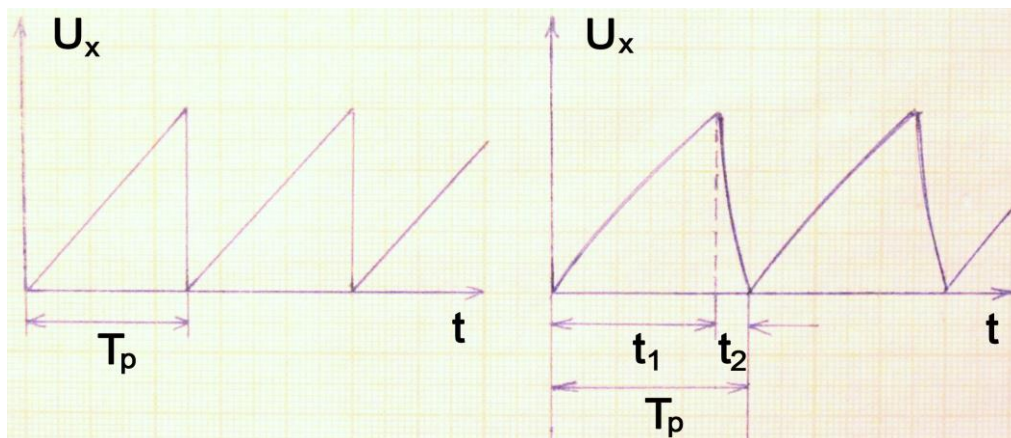


Рис.3а

Рис. 3б

напряжение U_x (рис. 3а,3б). Частоты этих напряжений между собой должны быть равными или отличаться друг от друга в целое число раз (на рис.4 показан случай, когда период развертки T_p в точности равен периоду синусоидального напряжения сигнала T).

Генератор развертки может работать в различных режимах. Следует заметить, что для наблюдения периодических синусоидальных напряжений, служит «непрерывная», или, как ее называют иначе, автоколебательная развертка. Процессы же переходные, повторяющиеся через неодинаковые промежутки времени или имеющие вид очень коротких периодических импульсов (или однократных импульсов), не удастся исследовать визуально при помощи повторяющейся пилообразной развертки.

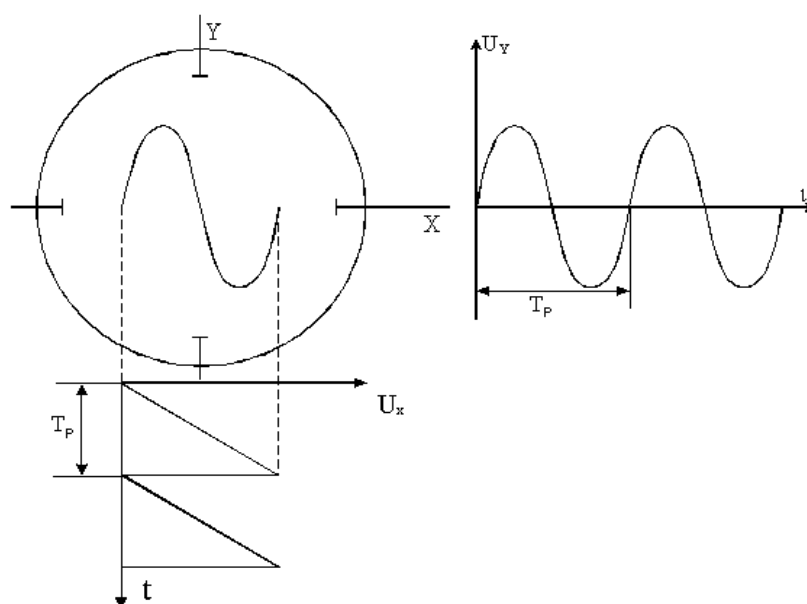


Рис. 4

Чтобы наблюдать короткие импульсы, как периодические, так и непериодические, длительность развертки должна быть несколько больше длительности исследуемого сигнала. Подобные развертки называются «ждущими» или однократными. Генератор ждущей развертки собирается на основе схемы генератора пилообразного напряжения, но приводится в действие при помощи внешнего запускающего сигнала, под действием которого генератор ждущей развертки создает только один пилообразный импульс. По прекращении действия запускающего сигнала генератор возвращается в состояние покоя до следующего сигнала. Ждущая развертка характеризуется тем, что скорость изменения пилообразного напряжения можно регулировать совершенно независимо от частоты измеряемого напряжения. Следовательно, отпадает необходимость в синхронизации и создается возможность наблюдать на экране часть исследуемого напряжения. Часто запуск генератора развертки производится самим исследуемым сигналом.

3. УСИЛИТЕЛЬ

Усилитель “У” служит для увеличения амплитуды исследуемых сигналов до таких значений, при которых минимальное отклонение электронного луча по оси Y на экране ЭЛТ составляет единицы мм, т.е. хорошо заметно глазу наблюдателя. От коэффициента усиления усилителя ($k_{yc} = U_{вых}/U_{вх}$) зависит чувствительность осциллографа, которая определяется минимальным входным напряжением, необходимым для отклонения луча на экране на одно деление вертикальной шкалы. Она обычно измеряется в В/мм или в В/дел, если на экран нанесена сетка с делениями. Иногда такой усилитель называют «усилитель вертикального отклонения», понимая под этим то, что выходной сигнал усилителя подаётся на вертикально-отклоняющие пластины «Y₁, Y₂» ЭЛТ. В случае подачи на вход осциллографа значительных напряжений (десятки и сотни вольт), для их уменьшения предусмотрен обычный делитель напряжения, как и в цепях постоянного тока.

4. БЛОК ПИТАНИЯ

Блок питания обеспечивает все электрические цепи осциллографа необходимым для работы напряжением, которое получают преобразованием сетевого переменного напряжения с частотой 50 Гц.

Приборы и принадлежности: электронный осциллограф, генератор низкочастотных электрических колебаний ГЗ-35, генератор колебаний специальной формы Г6-15, соединительные кабели.

Цель работы: ознакомление с электронным осциллографом, определение его чувствительности и измерение временных и амплитудных параметров наблюдаемых сигналов.

Порядок выполнения работы

После включения осциллографа кнопкой «сеть», расположенной на передней панели в центре, должна загореться сигнальная лампочка, после этого на экране спустя 10 – 30 с появится яркая горизонтальная линия. Она означает, что электронный луч под действием напряжения генератора развёртки, поданного на пластины « X_1 , X_2 », колеблется в горизонтальном направлении, и осциллограф готов к работе. Далее студент выполняет операции, перечисленные ниже.

1. Ознакомление с назначением ручек управления работой ЭО.
2. Калибровки длительности развёртки и чувствительности осциллографа.
3. Наблюдение синусоидальных электрических сигналов разных частот.
4. Определение реальной чувствительности ЭО на заданных частотах.
5. Измерение длительности и амплитуд периодических электрических сигналов различной формы.
6. Практическое применение ЭО (по указанию преподавателя).

Основные ручки управления ЭО вынесены для удобства на переднюю панель прибора. Сначала ознакомьтесь с ручками, непосредственно управляющими ЭЛТ (рис.2): «**яркость**» - потенциометр R_1 , регулирующий потенциал модулятора и, следовательно, интенсивность пучка электронов; «**фокус**» - потенциометр R_2 , регулирующий напряжённость электрического поля, формирующего сечение пучка электронов; «**I**» - смещение луча по вертикали за счёт подачи регулируемого постоянного электрического напряжения на вертикальные отклоняющие пластины « Y_1, Y_2 » и «**--**» - то же для пластин « X_1, X_2 » (сами потенциометры на рис.2 не показаны). Ручка «**подсветка**» регулирует яркость накладной прозрачной шкалы с делениями, прикреплённой к экрану ЭЛТ и служащей для проведения измерений напряжения (вертикальные деления) и времени (горизонтальные деления).

Исследуемый сигнал подаётся на гнездо «**вход Y**» (слева внизу), при этом, его амплитуда регулируется переключателем коэффициента усиления в пределах от 0,1 до 50 В/см. Это сделано для того, чтобы была возможность исследования как малых, так и больших по амплитуде сигналов. Соосный с ним переключатель имеет два положения: «узкая полоса» и «широкая полоса», которые изменяют пределы возможных частот исследуемых периодических сигналов.

Ручка «**развёртка**» (справа посередине) регулирует период развёртки от 0,1 мкс/см до 1с/см, т.е. масштаб по горизонтальной оси времени. Кроме того, ниже расположена ручка «**множитель x**», которая позволяет дополнительно расширить диапазон развёрток: либо уменьшая (x 0,25 – x 0,5), либо увеличивая (x 2 – x 5) в соответствующее множителю число раз.

Важной для работы с ЭО является ручка «**синхронизация**»: она обеспечивает стабильность изображения сигнала на экране. Для этого

необходимо время начала роста «пилообразного» напряжения развёртки, подаваемого на горизонтальные пластины « X_1, X_2 », совместить, т.е. «синхронизовать» по времени с моментом прихода исследуемого сигнала (рис.4). Для этого в лабораторной работе используют синхронизацию от высокостабильной сети промышленного переменного тока (50 Гц), которая используется для питания осциллографа, при этом, ручку «**синхронизация**» ставят в положение – «**от сети**». Кроме того, существует дополнительная ручка для синхронизации - «**режим запуска**», которую плавно вращают до достижения стабильности картины на экране.

Примечание: 1) все остальные ручки управления в настоящей лабораторной работе не используются, так как предназначены для других операций с исследуемыми сигналами; 2) указанные выше «цены делений» означают либо амплитуду напряжения сигнала, приходящегося на 1 см вертикальной шкалы (не путать с единицей напряжённости электрического поля), либо значение времени, приходящееся на 1 см горизонтальной оси времени.

Задание 1

Отрегулировать яркость и толщину луча на экране; отрегулировать подсветку накладной шкалы; установить светящуюся яркую линию примерно посередине экрана так, чтобы её начало попало в левую часть экрана (1 – 2 см от края) и совместить её с любой горизонтальной линией на накладной шкале.

Поставить ручку «**множитель x** » в положение «**ус. X** », при этом, на горизонтально отклоняющие пластины « X_1, X_2 » напряжение развёртки не подаётся, нет и напряжения сигнала на пластинах « Y_1, Y_2 », и луч должен превратиться в точку посередине экрана.

Задание 2

Перед началом измерений необходимо провести контроль («калибровку») цены деления длительности развертки и цены деления усилителя вертикального отклонения. В случае заметного несоответствия значений, указанных на ручках, величинам, измеренным при подаче на вход ЭО калибровочного сигнала, необходимо произвести регулировку по следующей процедуре. Для подачи на вход калибровочного сигнала необходимо кабель оснастить специальной насадкой, заканчивающейся двумя гибкими проводниками с однополюсными вилками: красный проводник всегда подключается к «сигнальному» гнезду или зажиму, а синий – к корпусу прибора, т.е. к зажиму «заземление».

2.1. Калибровка развёртки

Один конец кабеля вставляется в гнездо «вход Y », а второй конец с насадкой - в гнездо «калибраторы, 100 кГц» (красный проводник), а синий проводник вставляется в клемму заземления (внизу слева). Ручка «**синхронизация**» переводится в положение «**калибр**», при этом на вход

осциллографа подаётся калиброванный по времени импульсный сигнал частотой 100 кГц и периодом 10^{-5} с. Регулятор развёртки «*длит/см*» поставьте в положение «*10мкс*», а ручку «*множитель*» - в положение «*x1*». Совместите ручкой горизонтального смещения луча начало любого импульса с крайним левым делением горизонтальной шкалы и отсчитайте время десяти периодов – оно должно быть равно 10^{-4} с, т.е. 0,1мс. Если наблюдается заметное несоответствие, то необходимо отвёрткой вращать корректор частоты на боковой панели осциллографа.

2.2. Калибровка чувствительности

Красный проводник вставляется в гнездо «*1:1*», а переключатель «*100кГц - амплитуда*» в положение «*амплитуда*». Ручка усиления «*В/см*» должна быть установлена в положение «*1В/см*», а соосная - в положении «*широкая (полоса)*». На экране должна наблюдаться картина чередующихся импульсов, амплитуда которых должна соответствовать 40 мм. Если наблюдается заметное несоответствие, то необходимо вращать ручку «*усиление min - max*» до достижения амплитуды 40 мм. В дальнейшем эту ручку уже не трогают.

Задание 3

а) Присоединить генератор синусоидальных электрических колебаний ГЗ – 35 к осциллографу специальным коаксиальным кабелем: один конец кабеля присоединяется к гнезду генератора «*выход II*», а другой - к гнезду «*вход Y*» осциллографа.

б) Установить на генераторе любую частоту в диапазоне 200 – 500 Гц ручкой «*частота*» и «*множитель частоты*», а ручкой «*регулятор напряжения*» - любую амплитуду выходного напряжения в диапазоне 3 – 10 В, при этом, ступенчатый переключатель выходного напряжения генератора (с подсвеченной шкалой) надо установить в положение «*10 В*».

в) На осциллографе ручку «*развёртка*» следует поставить в положение «*10 или 20 мс/см*», ручку «*множитель x*» - в положение «*x 1*» и ручкой «*режим запуска*» добиться стабильного изображения сигнала на экране.

г) Изменить частоту и амплитуду выходного напряжения генератора и снова наблюдать на экране ЭО изображение сигнала при прежнем масштабе оси времени, т.е. периоде развёртки. Сравнить наблюдаемые картины и зарисовать их в тетрадь.

Задание 4

Установить на ГЗ–35 частоту сигнала 1000 Гц и выходное напряжение 0,1 В и подать его на «*вход Y*» осциллографа. Произвести синхронизацию сигнала (п. 2) и измерить число делений в сантиметрах, соответствующее амплитуде сигнала на пределе 0,2 или 0,1 В/см. Рассчитать реальную чувствительность (см.п.3) осциллографа на данной частоте и сравнить её с указанной на ручке (0,2 или 0,1 В/см). Повторить измерения, установив на генераторе частоту сигнала 10 кГц с той же амплитудой 0,1 В, снова определить чувствительность

и сравнить их оба значения. Все измеренные значения и расчеты записать в тетради.

Задание 5

а) Присоединить генератор сигналов специальной формы Г6-15 к осциллографу специальным коаксиальным кабелем: один конец кабеля присоединяется к гнезду генератора **«основной выход»**, а другой - к гнезду **«вход Y»** осциллографа.

б) Установить на генераторе клавишным переключателем **«форма сигнала»** выходное напряжение вида **«_ _ _»**, т.е. чередующиеся прямоугольные импульсы положительной и отрицательной полярности, затем ручкой **«амплитуда сигнала»** установить напряжение 10 В, а ручками **«частота»** и **«множитель частоты»** установить частоту 250 Гц. Положение клавишного переключателя **«ослабление dB»** должно быть «0 дБ».

в) На осциллографе ручку **«развёртка»** следует поставить в положение «10 или 20 мс/см», ручку **«множитель x»** - в положение **«x 1»** и ручкой **«режим запуска»** добиться стабильного изображения сигнала на экране.

г) Измерить по масштабной шкале величину амплитуды и периода повторения наблюдаемых импульсов и записать эти значения в тетрадь.

д) Повторить те же операции (пп. а-г) для сигналов «пилообразной» формы (клавишный переключатель **«форма сигнала»** поставить в соответствующее положение). Результаты измерений записать в тетрадь.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

а) продольное электрическое поле

Продольным будем называть такое электрическое поле, в котором вектор скорости электрического заряда направлен вдоль силовых линий поля (рис.5).

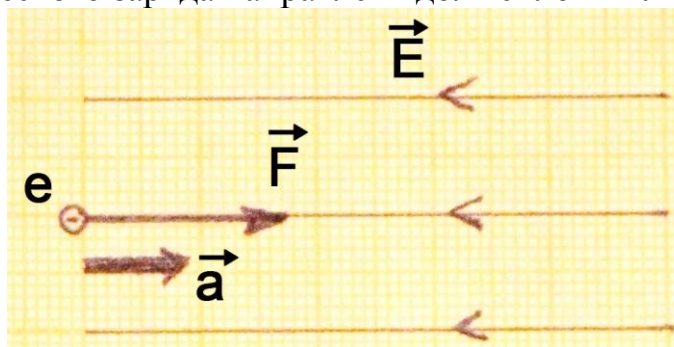


Рис. 5

Со стороны поля на электрон будет действовать сила $\vec{F} = -e\vec{E}$, сообщающая электрону ускорение

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{e\vec{E}}{m},$$

следовательно, электрон будет двигаться равноускоренно со скоростью

$$V = V_0 + at = V_0 + \frac{eE}{m}t.$$

Полагая $V_0 = 0$, получим

$$V = \frac{eE}{m}t,$$

а для кинетической энергии электрона

$$W = \frac{mV^2}{2} = \frac{(eEt)^2}{m}.$$

Таким образом, продольное электрическое поле может быть использовано для «разгона» электронов до необходимой скорости (кинетической энергии).

б) поперечное электрическое поле

Если электрон влетает в поле перпендикулярно его силовым линиям, то такое поле будем называть поперечным (рис.6).

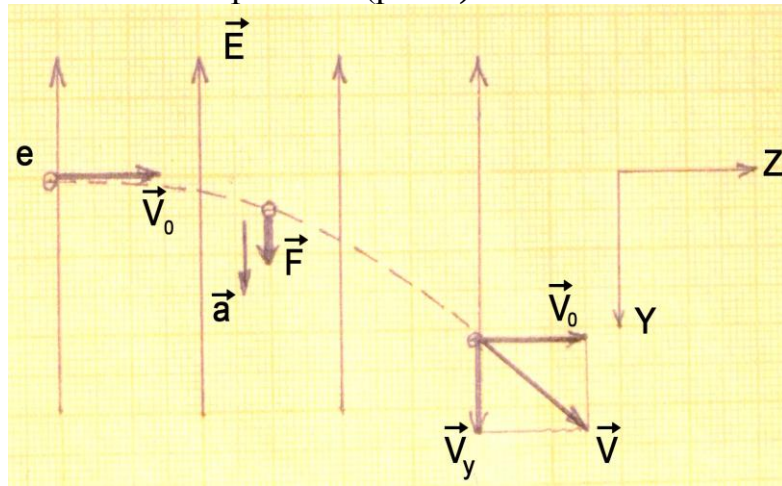


Рис. 6

В этом случае на электрон со стороны поля будет действовать сила $\vec{F} = -e\vec{E}$, направленная перпендикулярно вектору скорости электрона, сообщая ему ускорение

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{e\vec{E}}{m},$$

при этом начальная скорость электрона как по величине, так и по направлению, остается неизменной. Уравнения движения электрона вдоль поля (ось OZ) и поперек поля (ось OY) в этом случае имеют вид:

$$\begin{aligned} Z &= V_0 t, \\ Y &= \frac{at^2}{2} = \frac{eEt^2}{2m}. \end{aligned}$$

Решая эти уравнения совместно и исключив время, получим уравнение траектории электрона:

$$Y = \frac{eE}{qm} \frac{Z^2}{V_0^2} = \text{const} \cdot Z^2,$$

которое представляет собой параболу (рис.6). Таким образом, поперечное электрическое поле позволяет «искривлять» траекторию электрона и изменять его скорость.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ЗАРЯД И РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА ЧЕРЕЗ СОПРОТИВЛЕНИЕ

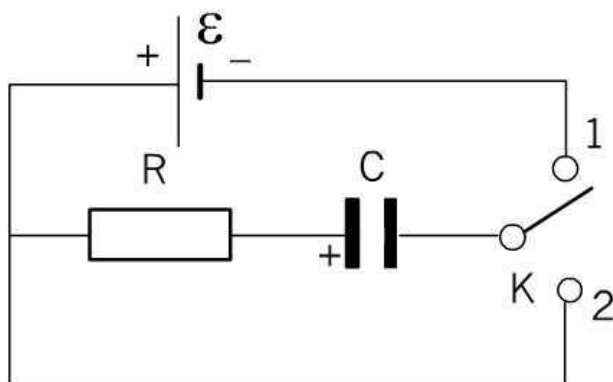


Рис.7

Рассмотрим схему, представленную на рис.7. Схема включает в себя источник постоянного тока, активное сопротивление и конденсатор, процессы заряда и разряда в котором и будем рассматривать. Эти процессы разберем по отдельности.

а) Разряд конденсатора

Пусть вначале источник тока ε подключен к конденсатору C через сопротивление R . Конденсатор зарядится. Переведем ключ K из положения 1 в положение 2. В результате конденсатор, заряженный до напряжения ε , начнет разряжаться через сопротивление R . Считая ток положительным, когда он направлен от положительно заряженной обкладки конденсатора к отрицательно заряженной, можем записать:

$$i = - dq/dt, \quad q = CU, \quad iR = U, \quad (1)$$

где i – мгновенное значение силы тока в цепи, знак «минус» которого показывает, что появление тока в цепи i связано с уменьшением заряда q на конденсаторе; q и C – мгновенные значения заряда и напряжения на конденсаторе.

Очевидно, что первые два выражения представляют собой определения силы тока и емкости, соответственно, а последнее – закон Ома для участка цепи. Из двух последних соотношений выразим силу тока i следующим образом:

$$i = \frac{U}{R} = \frac{q}{RC}.$$

Тогда можно записать следующее уравнение:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = 0. \quad (2)$$

Это дифференциальное уравнение, решением которого является экспоненциальная функция:

$$q = q_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (3)$$

где q_0 – заряд конденсатора в начальный момент времени $t = 0$ и $\tau = RC$ – время «релаксации» RC -цепи, измеряемое в секундах. Если с начала разряда конденсатора пройдет время $t = \tau$, то, согласно (3), заряд уменьшится в e раз ($e = 2,71$ – основание натурального логарифма), поэтому по порядку величины τ примерно равно времени разряда конденсатора.

Поделив обе части уравнения (3) на величину емкости C , получим:

$$U = \frac{q}{C} = \varepsilon \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (4)$$

где $\varepsilon = q_0 / C$ – напряжение на конденсаторе в начальный момент времени $t = 0$. Эта зависимость показана на рис.8.

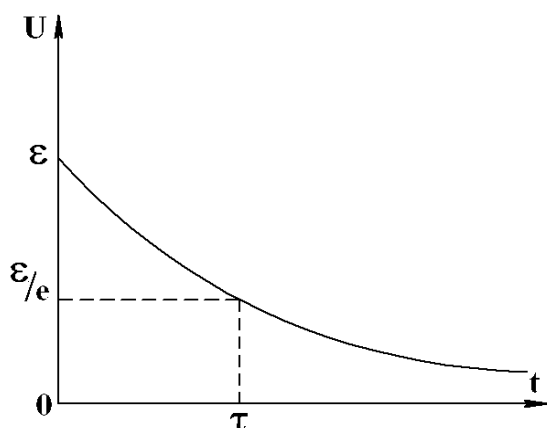


Рис.8

б) Заряд конденсатора

Переведем ключ К на схеме (рис. 7) из положения 2 в положение 1: в результате начнется заряд конденсатора от батареи, имеющей ЭДС ε , через сопротивление R . Уравнения, описывающие заряд конденсатора, аналогичны выражениям (1-3) с учётом действия включённого источника тока с ЭДС ε :

$$\begin{aligned} i &= \frac{dq}{dt}, \\ iR &= \varepsilon - U, \quad q = CU. \end{aligned} \quad (5)$$

Предположим, что внутреннее сопротивление источника тока пренебрежимо мало по сравнению с величиной R . Теперь ток в цепи считается положительным, когда он течет в направлении положительно заряженной обкладки конденсатора. Исключая в уравнениях (5) силу тока i и напряжение на конденсаторе U , получим уравнение, похожее на (2):

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = \frac{\varepsilon}{R}. \quad (6)$$

Запишем его в следующем виде:

$$\frac{d}{dt}(q - C\varepsilon) + \frac{q - C\varepsilon}{RC} = 0 \quad (7)$$

и, решив, получим:

$$q - C\varepsilon = A \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (8)$$

при этом, коэффициент A найдем из начальных условий:
 $q = 0$ при $t = 0$, тогда $A = -C\varepsilon$.

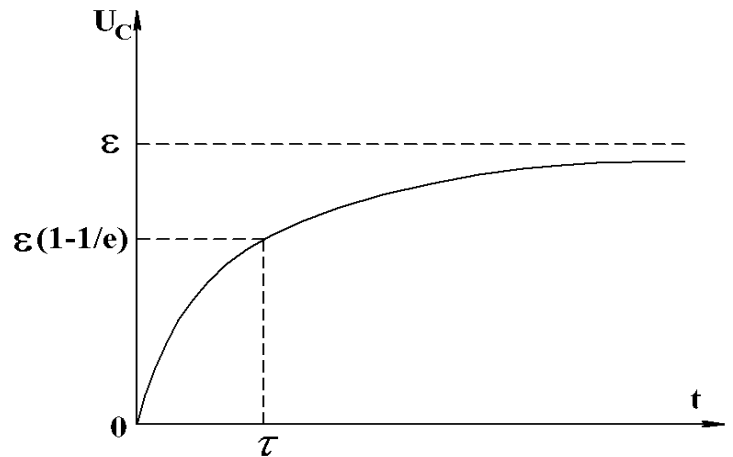


Рис.9

Зависимость $q(t)$ получается в виде:

$$q = C\varepsilon \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right). \quad (9)$$

Поделив обе части уравнения (9) на C , получим зависимость напряжения на конденсаторе U от времени, представленную на рис.9:

$$U = \frac{q}{C} = \varepsilon \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right). \quad (10)$$

Для дальнейших рассуждений необходимо разложить функцию $e^{-\frac{t}{\tau}}$ в ряд:

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - \frac{t}{\tau} + \frac{t^2}{2!\tau} - \dots \quad (11)$$

Полагая, что $\frac{t}{\tau} \rightarrow 0$ с ростом времени, ограничимся первыми двумя членами ряда, тогда для процесса разряда конденсатора получим:

$$U = U_0 \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \approx -const \cdot \frac{t}{\tau}, \quad (12)$$

а для процесса заряда – соответственно:

$$U = U_0 \left[1 - \left(1 - \frac{t}{\tau} \right) \right] = U_0 \frac{t}{\tau} = \text{const} \cdot t. \quad (13)$$

Из соотношений (12,13) следует, что в обоих случаях зависимость $U(t)$ можно считать линейной при $t / \tau \ll 1$ и, следовательно, начальная часть кривой $U(t)$ как при заряде, так и при разряде конденсатора может быть использована в качестве напряжения «пилообразной» развертки в осциллографе (рис. 3-б). Небольшая нелинейность может быть устранена применением специальных корректирующих схем.

Библиографический список

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики», М.: Наука, 2004, Т. 2, §28, 37, 38.
2. Савельев И.В. Курс общей физики, М., Наука 2007. Т. 2, § 73.
3. Физическая энциклопедия в 5 т.- М.: Советская энциклопедия, 1988 – 1998. Т. 3.

Учебное издание

Андрей Андреевич Абрамович
Михаил Николаевич Полянский
ФИЗИКА
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Учебно-методическое пособие
к лабораторной работе № 3-И
для индивидуального лабораторного практикума

Редактор и корректор В.А.Басова
Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2014г., поз.50.

Подп. к печати	Формат 60х84/16.	Бумага тип. №1
Печать офсетная.	Объём 1,25 печ.л.,	1,25 уч.-изд.л.
Тираж экз.	Изд. №50.	Цена «С». Заказ

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, Санкт-Петербург, ул.Ивана Черных,4.

