

Упражнение 2. СНЯТИЕ ВХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА

С помощью потенциометра R_4 установить $U_{кз} = U_{кз}^*$. Снять зависимость $I_6(U_{6з})$, занося результаты измерений I_6 и $U_{6з}$ в таблицу. При этом напряжение $U_{6з}$ увеличивать с помощью потенциометра R_1 , поддерживая $U_{кз} = U_{кз}^*$, с помощью потенциометра R_4 . Закончив измерения, уменьшить напряжения и токи в схеме до минимума.

Построить графики зависимости $I_6(U_{6з})$ при $U_{кз} = U_{кз}^*$. Для значения $I_6 = I_6^*$ по наклону зависимости $I_6(U_{6з})$ определить величину входного сопротивления транзистора $R_{вх}$ (см. (5)).

Упражнение 3. НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА УСИЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО СИГНАЛА С ПОМОЩЬЮ ТРАНЗИСТОРА

Зная величины β и $R_{вх}$, найденные в предыдущих упражнениях для определенного режима работы транзистора ($U_{кз} = U_{кз}^*$, $I_6 = I_6^*$), а также зная сопротивление резистора нагрузки R_n (см. на панели), можно вычислить величину коэффициента усиления транзисторного усилителя, в котором транзистор стоит в указанном режиме, а в качестве нагрузки стоит резистор $R = R_n$. Вычислить коэффициент усиления K (см. (8)).

Теперь определим, каков же на самом деле коэффициент усиления нашего усилителя.

Снять короткозамыкающую перемычку с резистора R_3 .

С помощью потенциометров R_1 и R_4 установить режим работы транзистора, соответствующий выбранному по результатам предыдущих упражнений ($U_{кз} = U_{кз}^*$, $I_6 = I_6^*$). Вольтметр V_1 исключить из схемы. Включить генератор, и с его выхода подать небольшое (около 10 мВ) напряжение частоты примерно 1 кГц на вход транзистора через конденсатор C_1 .

Подключить к схеме в соответствии с рис. 5 осциллограф и на его экране получить изображение сигнала на входе транзисторного усилителя, а затем на выходе. Убедиться в том, что выходной сигнал сохранил свою гармоническую форму. Если же нет, то уменьшить величину входного сигнала.

Определить коэффициент усиления усилителя как отношение величин сигнала на его выходе и входе:

$$K_{\text{эсп}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$$

Закончив измерения, уменьшить напряжение и токи в схеме до минимума, выключить приборы и питание схемы.

Сравнить коэффициент усиления, определенный экспериментально, с коэффициентом усиления, найденным теоретически с использованием параметров β и $R_{вх}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой транзисторы $n-p-n$ -типа?
2. Какую роль играют эмиттер, база и коллектор в транзисторе?
3. Почему базу транзистора делают тонкой?
4. Какие носители заряда являются основными и неосновными в эмиттерной, базовой и коллекторной областях транзистора?
5. Для каких носителей заряда коллекторный переход включается в обратном направлении?
6. Объяснить сходство между входными и выходными характеристиками транзистора, с одной стороны, и вольт-амперной характеристикой диода — с другой?
7. Как можно найти величины входного и выходного сопротивления транзистора?
8. Как можно определить коэффициент усиления транзистора по току?
9. Какого порядка обычно бывают входное и выходное сопротивления транзистора?

Литература

1. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 206.
2. Жеребцов И. П. Основы электротехники. Л.: Энергия, 1974, с. 86—94.

Лабораторная работа 13

УСИЛИТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ НА ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЕ

Рассматривается работа усилителя, построенного на интегральной микросхеме. Снимаются амплитудная, амплитудно-частотная и фазовая характеристики усилителя.

Усилитель на транзисторе. При проведении физических экспериментов часто возникает необходимость в усилении слабых электрических сигналов. Широкое применение получили усилители на транзисторах.

Рассмотрим, как работает усилитель на одном транзисторе, который имеет два $n-p$ -перехода: эмиттерный — между эмиттером и базой, коллекторный — между базой и коллектором. Такие транзисторы называют биполярными, так как их работа основана на использовании носителей заряда обоих знаков.

Режим работы транзистора называют активным, если на эмиттерном переходе напряжение прямое, т. е. имеет полярность, соответствующую прямому току через этот переход, а на коллекторном переходе — обратному. Активный режим является основным и используется в большинстве усилителей.

В усилительные схемы транзистор включается как четырехполюсник, имеющий два входных и два выходных зажима. Так как транзистор имеет три вывода, один из них оказывается одновременно и входным и выходным, т. е. является общим.

Наиболее часто в усилителях применяется включение транзистора с общим эмиттером, показанное на рис. 1 для случая транзистора $n-p-n$ -типа.

Переменное напряжение $U_{вх}$, которое необходимо усилить, подается от источника колебаний на участок база — эмиттер (входная цепь). В цепи базы находится также источник постоянного тока \mathcal{E}_1 . Цепь коллектора (выходная цепь) питается от источника \mathcal{E}_2 . Для выделения усиленного выходного напряжения $U_{вых}$ в эту цепь включен резистор нагрузки R_H .

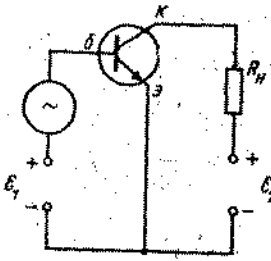


Рис. 1. Включение транзистора с общим эмиттером.

Усиление электрических колебаний с помощью транзистора основано на том явлении, что напряжение участка база — эмиттер $U_{бэ}$ (или ток на участке база — эмиттер) существенно влияет на ток коллектора: чем больше напряжение между базой и эмиттером, тем больше ток коллектора, т. е. входное напряжение $U_{бэ}$ управляет током коллектора.

Важным параметром, характеризующим работу полупроводниковых усилителей, является его коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \quad (1)$$

Коэффициент усиления по напряжению оказывается неодинаковым для сигналов разных частот — это присуще всем усилителям.

Кроме того, отношение амплитуды напряжения на выходе усилителя к амплитуде напряжения на входе даже при фиксированной частоте не является постоянной величиной. При небольших амплитудах на входе усилителя напряжение на выходе пропорционально напряжению на входе. С увеличением амплитуды на входе пропорциональность нарушается, зависимость этих величин становится нелинейной, что приводит к искажению формы сигналов, поступающих на его вход.

Сказанное выше заставляет описывать работу усилителей при помощи следующих характеристик: амплитудно-частотной характеристики — зависимости коэффициента усиления по напряжению от частоты $K_U = f(\omega)$ и амплитудной характеристики — зависимости амплитуды напряжения на выходе от амплитуды на входе при фиксированной частоте.

Представляет интерес также фазовая характеристика — зависимость угла сдвига фазы напряжения на выходе по отношению к фазе напряжения на входе от частоты $\varphi = f(\omega)$.

Амплитудная характеристика усилителя. Поведение амплитудной характеристики, т. е. зависимости $U_{вых} = f(U_{вх})$ при $\omega = \text{const}$,

можно объяснить режимом работы транзистора, т. е. выбором рабочих точек на его входных и выходных характеристиках.

Семейство выходных характеристик транзистора представляет собой зависимость

$$I_K = f(U_{кэ}) \text{ при } I_б = \text{const} \quad (2)$$

Для выходной цепи транзистора справедливо уравнение

$$\mathcal{E}_2 = U_{кэ} + I_K R_H \quad (3)$$

Таким образом, имеются два уравнения с двумя неизвестными I_K и $U_{кэ}$, причем одно из уравнений дано графически. Для решения такой системы уравнений надо построить график второго уравнения и найти координаты точки пересечения двух графиков. Уравнение (3) — это уравнение первой степени относительно I_K и $U_{кэ}$. Его графиком является прямая линия, называемая линией нагрузки. Построение линии нагрузки производится по точкам ее пересечения с осями координат (рис. 2).

При $I_K = 0$ получаем $\mathcal{E}_2 = U_{кэ}$ (точка M), при $U_{кэ} = 0$ $I_K = \mathcal{E}_2 / R_H$ (точка N).

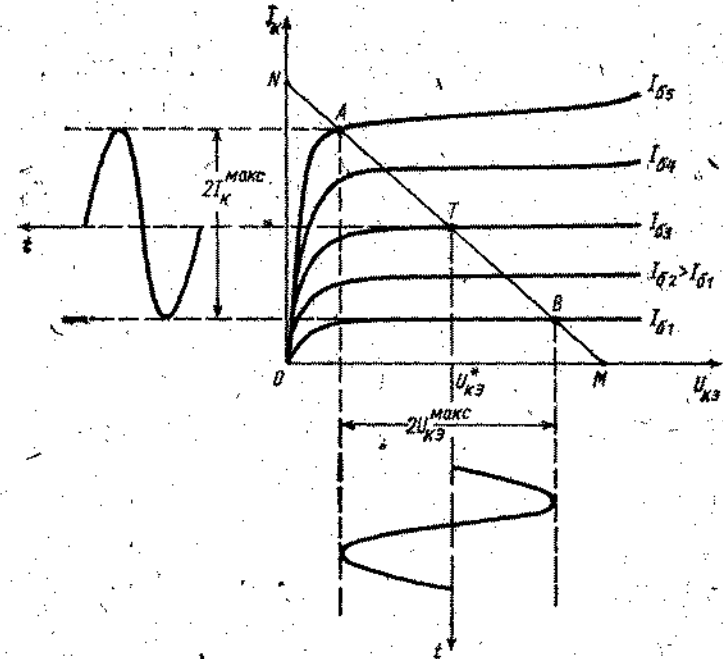


Рис. 2. Построение линии нагрузки

На линии нагрузки выбирается рабочий участок (AB), который определяет пределы возможных изменений I_K и $U_{кэ}$, т. е. удвоенную амплитуду выходного тока $2I_{\text{макс}}$ и выходного напря-

жения $2U_{\text{макс кз}}$, а также пределы изменения I_0 (от значения I_{01} до I_{05}).

Середина рабочего участка (рабочая точка T) задает в свою очередь положение рабочей точки T_1 на входной характеристике (рис. 3):

$$I_0 = f(U_{03}) \text{ при } U_{кз}^* = \text{const.}$$

Из рис. 2 и 3 видно, что рабочие точки должны задаваться в областях, где нелинейности входных и выходных характеристик транзистора проявляются слабее. При этом усиление синусоидаль-

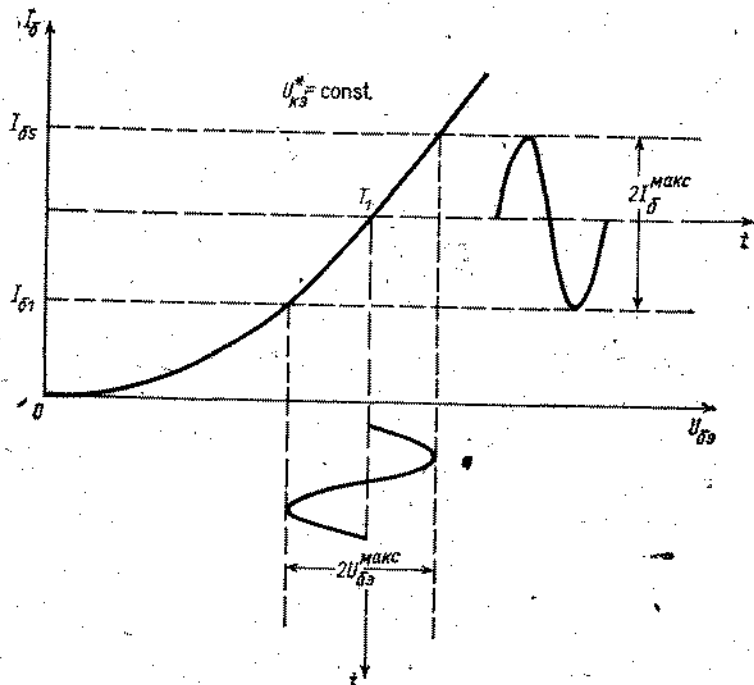


Рис. 3. Положение рабочей точки на входной характеристике транзистора

ных (или другой формы) колебаний входного напряжения U_{03} будет происходить с меньшими нелинейными искажениями. Однако даже при правильном выборе рабочей точки эти нелинейности начинают проявляться при достаточно больших амплитудах входного сигнала. Амплитудная характеристика усилителя дает возможность судить об этих искажениях.

Амплитудно-частотная характеристика усилителя. Характерным в этой зависимости является уменьшение (завал или спад) коэффициента усиления в области низких и высоких частот и

сравнительно постоянное его значение в области средних частот. Эта область средних частот зависит от реактивных элементов, входящих как в схему самого усилителя, так и в цепи, соединяющие усилитель с источником исследуемого сигнала и с устройством, регистрирующим усиленный сигнал.

Рассмотрим схему на рис. 4. В большинстве случаев цепь, соединяющую усилитель с внешними устройствами, можно предста-

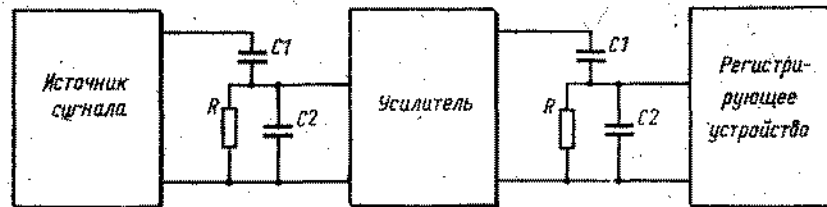


Рис. 4. Связь усилителя с внешними устройствами

вить в виде комбинации конденсаторов C_1 и C_2 и резистора R , изображенной на этом рисунке. Здесь C_1 — конденсатор, развязывающий по постоянному току усилитель и внешние устройства, R и C_2 — соответственно входное сопротивление и входная емкость усилителя или внешнего устройства. Такая комбинация C_1, R, C_2 может рассматриваться как делитель переменного напряжения. Спад величины K_U в области низких частот объясняется возрастанием сопротивления переменному току верхнего плеча делителя — конденсатора C_1 ($|Z| = 1/\omega C$). При этом сопротивление нижнего плеча определяется резистором R , так как на этих частотах $R > 1/\omega C_2$. Таким образом, для данного усилителя по мере понижения частоты от некоторого среднего значения происходит перераспределение падения напряжения на делителе, в результате на нижнем плече падение напряжения уменьшается, а именно оно подается на следующее устройство.

Область средних частот начинается с частот, для которых $1/\omega C_1 \ll R$, т. е. частот, для которых конденсатор C_1 представляет собой малое сопротивление по сравнению с R .

С ростом частоты конденсатор C_2 начинает все больше и больше шунтировать резистор R . Вследствие этого падение напряжения на делителе перераспределяется, и на высоких частотах также получается «завал» характеристики.

Фазовая характеристика усилителя. Любой периодический сигнал сколь угодно сложной формы можно представить в виде суммы гармонических составляющих, имеющих определенные амплитуды и фазы (теорема Фурье). Поэтому, если нужно усилить сигнал сложной формы, нужно сохранить между его гармоническими составляющими не только первоначальные амплитудные, но и фазовые соотношения.

Фазовая характеристика усилителя представляет собой зави-

симось изменения фазы усиленного гармонического напряжения относительно фазы входного напряжения от частоты:

$$\varphi = f(\omega),$$

где φ — разность фаз $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$.

Фазовая характеристика определяется теми же реактивными элементами, что и частотная.

Интегральная технология. В последние годы широкое распространение получила новая технология создания радиосхем, при которой отдельные элементы соединяются в единое целое не после, а в ходе их изготовления. Эта технология получила название *интегральной*. Узлы радиоэлектронной аппаратуры, изготовленные таким образом, были названы интегральными микросхемами. Приставка «микро» подчеркивает характерную особенность интегральной технологии — высокий уровень миниатюризации, достигаемый в ее изделиях. Действительно, интегральная технология позволяет получать плотности упаковки до 1000 элементов (диодов, транзисторов, резисторов и т. п.) в кубическом сантиметре.

Наибольшее распространение получили интегральные микросхемы, у которых все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводника. Для изготовления таких полупроводниковых микросхем используются кремниевые монокристаллические пластины толщиной 0,3—0,4 мм. Элементы микросхемы — биполярные и полевые транзисторы, диоды, резисторы и конденсаторы — формируют в полупроводниковой пластине методами селективной диффузии, атомов, эпитаксии и др. Соединения элементов друг с другом выполняют путем напыления узких проводящих дорожек алюминия на окисленную (т. е. электрически изолированную) поверхность кремния, имеющую окна в пленке окисла в тех местах, где должен осуществляться контакт дорожек с кремнием (в области эмиттера, базы, коллектора транзисторов и др.). Резисторы и конденсаторы иногда изготавливают методом напыления на кремниевую пластину атомов другого вещества.

После выполнения всех операций по формированию элементов и соединений кремниевую пластину помещают в герметичный защитный корпус, имеющий выводы от определенных точек схемы.

Описание микросхемы. В настоящей лабораторной работе изучается усилитель, собранный на интегральной микросхеме типа К1С221А. Упрощенная принципиальная схема этого модуля изображена на рис. 5. Он используется как двухкаскадный усилитель. Оба каскада усилителя на транзисторах VT1 и VT2 типа $n-p-n$ выполнены по схеме с общим эмиттером. Источник питания с напряжением $\pm 6,3$ В подключается к выводам микросхемы 7 и 1. Резистор R_1 является нагрузкой первого транзистора, резистор R_5 — нагрузкой второго транзистора. Резисторы R_2 и R_6 определяют режим работы транзисторов по постоянному току, т. е. они таковы, что рабочая точка на характеристиках транзисторов лежит в середине линейных участков характеристик.

Входной сигнал подается на вывод 4, а выходной сигнал снимается с вывода 9.

Усилители вообще, а многокаскадные особенно склонны к возбуждению, т. е. переходу из режима усиления в режим генерирования колебаний. Чтобы этого не допустить, в усилителях вводят отрицательную обратную связь. В схеме рассматриваемого усилителя она осуществляется с помощью резисторов R_3 и R_4 , включенных между эмиттером второго транзистора и базой первого. Действительно, пусть потенциал базы первого транзистора под действием сигнала возрос. Тогда возрастает и ток коллектора, вследствие чего потенциал коллектора упадет. Так как коллектор

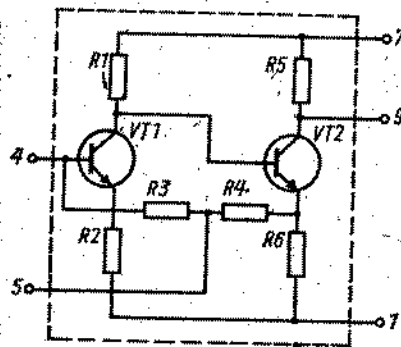


Рис. 5. Устройство микросхемы

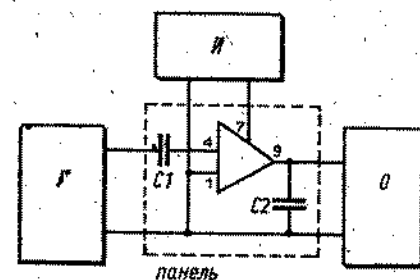


Рис. 6. Соединение микросхемы с приборами

первого транзистора непосредственно соединен с базой второго транзистора, то упадет и потенциал этой базы. Это приведет к уменьшению тока коллектора второго транзистора и, следовательно, к уменьшению падения напряжения на резисторе R_6 . Через резисторы R_3 и R_4 это приведет к уменьшению потенциала базы первого транзистора. Таким образом, чем больше усиление всего тракта, тем больший сигнал отрицательной обратной связи поступает с выхода усилителя на вход. Сопротивление резисторов R_3 и R_4 делается таким, чтобы сигнал обратной связи был достаточен для предотвращения возбуждения усилителя.

Между выводами 5 и 1 включается конденсатор большой емкости, с помощью которого величина обратной связи подобрана оптимальной — без него она слишком сильная.

Микросхема К1С221А имеет ряд элементов и выводов, не указанных на рис. 5, которые позволяют корректировать частотную характеристику усилителя, регулировать коэффициент усиления и т. д.

Описание экспериментальной установки. Для снятия различных характеристик усилителя используется установка, блок-схема которой представлена на рис. 6. На вход микросхемы (вывод 4)

сигнал, подлежащий усилению, от генератора переменного напряжения подается через конденсатор C_1 . Конденсатор C_2 , подключенный к выходу микросхемы, искусственно увеличивает спад частотной характеристики усилителя в области верхних частот. Микросхема, конденсаторы C_1 и C_2 смонтированы на специальной панели, имеющей гнезда для подключения источника питания H , генератора Γ и осциллографа O , используемого для наблюдения усиленного сигнала.

Монтаж и включение установки. Собрать схему в соответствии с рис. 6. Для питания схемы подключить к ней один из выходов источника, предварительно убедившись, что ручка регулировки выхода стоит в крайнем положении против часовой стрелки, что соответствует минимальному выходному напряжению источника.

Вход усилителя подключить к гнездам генератора «выход». На усилитель *не следует* подавать напряжение свыше 10 мВ. Напряжение с выхода усилителя подать на вход Y осциллографа. Осциллограф должен работать в режиме внутренней развертки с синхронизацией развертки исследуемым сигналом.

Включить приборы в сеть и дать им прогреться 10 мин.

Установить напряжение питания усилителя $\pm 6,3$ В. Установить выходное напряжение генератора величиной несколько милливольт при частоте несколько килогерц. Получить на экране осциллографа изображение усиленного гармонического сигнала.

Упражнение 1. СНЯТИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ

Меняя частоту генератора, установить ее в области, где выходной сигнал усилителя, наблюдаемый на экране осциллографа, максимален. Установить величину изображения сигнала $Y_{\text{макс}}$ удобной для отсчета, равной, например, 40 мм. Измерить величину U этого сигнала с помощью осциллографа.

Меняя частоту генератора, снять зависимость усиленного сигнала от частоты $U(f)$ в пределах от 20 Гц до 20 кГц. При этом следить за постоянством входного сигнала. Обратит внимание на спады частотной характеристики усилителя в области низких и в области высоких частот. Результаты измерений занести в таблицу.

Величину выходного напряжения усилителя $U_{\text{вых}}$ найти из соотношения

$$U_{\text{вых}} = Y \frac{U_{\text{макс}}}{Y_{\text{макс}}}$$

где Y — размер изображения сигнала U на экране осциллографа. Коэффициент усиления исследуемого усилителя найти по формуле

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$$

Вычисленные значения $U_{\text{вых}}$ и K также занести в таблицу. Построить график зависимости $K(\lg f)$.

Упражнение 2. СНЯТИЕ АМПЛИТУДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ

Установить частоту в области, где коэффициент усиления был максимален.

Увеличивая входное напряжение усилителя, обнаружить искажение формы выходного сигнала. Установить величину изображения еще не искаженного сигнала $Y_{\text{макс}}$, удобной для отсчета, равной, например, 40 мм. С помощью осциллографа определить напряжение этого сигнала $U_{\text{макс}}$.

Увеличивая входное напряжение усилителя $U_{\text{вх}}$ от нулевого, снять зависимость $Y(U_{\text{вх}})$. Результаты измерений занести в таблицу.

Для каждой точки вычислить величину выходного напряжения:

$$U_{\text{вых}} = Y \frac{U_{\text{макс}}}{Y_{\text{макс}}}$$

Результаты вычислений также занести в таблицу.

Построить график зависимости $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$.

Зарисовать осциллограмму искаженного сигнала.

Упражнение 3. СНЯТИЕ ФАЗОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ

Поставить осциллограф в режим развертки от внешнего источника. В качестве внешнего напряжения использовать напряжение со второго выхода генератора ГЗ-18, обозначенного «выход 5Ω».

Установить частоту, на которой выполнялось предыдущее упражнение, и величину входного напряжения усилителя, при котором выходной сигнал еще не искажался. Добиться наблюдения на экране осциллографа эллипса, близкого по форме к прямой линии, пересекающей центр экрана и занимающей диагональ квадрата со стороной, например, 40 мм.

Меняя частоту генератора от 20 Гц до 20 кГц, снять зависимость $Y(f)$ и $Y_{\text{макс}}(f)$, где Y и $Y_{\text{макс}}$ — характерные размеры эллипса, наблюдаемого на экране осциллографа (рис. 7). Обратит внимание,

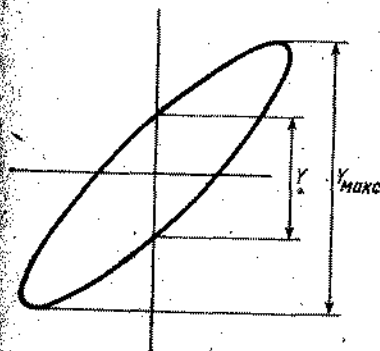


Рис. 7. Параметры эллипса, подлежащие измерению

что в районе средних частот фазовый сдвиг меняет знак. Результаты измерений занести в таблицу.

Вычислить угол фазового сдвига между выходным $U_{\text{вых}}$ и входным $U_{\text{вх}}$ напряжением усилителя:

$$\varphi = \arcsin \frac{Y}{Y_{\text{макс}}}$$

Построить график зависимости $\varphi(\lg f)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как происходит усиление сигнала с помощью транзистора в схеме с общим эмиттером?
2. Какие факторы приводят к нелинейности амплитудной характеристики усилителя?
3. Какой вид имеют входные и выходные характеристики транзистора?
4. Какие дополнительные изменения нужно сделать в усилительной схеме с транзистором $n-p-n$ -типа, если заменить его на транзистор $p-n-p$ -типа?
5. Как выбирается рабочая точка на характеристиках транзистора?
6. Какие факторы влияют на частотную характеристику усилителя?
7. Какой вид должна иметь фазовая характеристика идеального усилителя?
8. В чем заключается интегральная технология создания радиосхем и в чем ее достоинства?
9. Что представляет собой микросхема К1УС221А?
10. Нарисовать схему установки и объяснить назначение отдельных ее элементов.
11. Какие правила техники безопасности следует соблюдать при выполнении настоящей задачи?

Литература

1. Брандт А. А., Ржевкин К. С. Техника монтажа и налаживания радиосхем. Изд-во Моск. ун-та, 1966.

ЛАБОРАТОРИЯ МАГНЕТИЗМА

В лаборатории магнетизма студенты изучают физические явления: возникновение магнитного поля в пространстве, окружающем проводники с током, намагничивание и перемагничивание ферромагнетиков, возникновение и изменение доменной структуры ферромагнетиков, ларморову прецессию, проявление магнитной анизотропии, изменение магнитных свойств ферромагнетика с температурой, эффект Холла, эффект Джоуля — Ленца;

изучают физические законы: закон Био — Савара, закон электромагнитной индукции, закон полного тока, теорему Лармора, закон Джоуля — Ленца;

овладевают методами расчета магнитных полей, основанными на законе Био — Савара и на законе полного тока;

овладевают методами измерения величины индукции магнитного поля, индукции насыщения вещества, остаточной индукции, магнитной проницаемости, коэрцитивной силы, точки Кюри, размеров доменов ферромагнетиков, величины постоянной Холла, g -фактора и др.;

приобретают навыки работы с приборами: амперметрами постоянного и переменного тока, источниками питания, автотрансформатором, баллистическим гальванометром, потенциометром постоянного тока, микроверметром, осциллографом и др.

Лабораторная работа 14

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ИНДУКЦИИ

В настоящей лабораторной работе изучается магнитное поле, создаваемое соленоидом, катушками Гельмгольца, электромагнитом. При измерении величины индукции магнитного поля используется баллистический гальванометр, а также приборы, работа которых основана на эффекте Холла и ядерном магнитном резонансе.

Оборудование экспериментальной установки: соленоид длиной 40 см с числом витков 2000 провода ПЭЛ-0,21; катушки Гельмгольца специальной конструкции, позволяющей передвигать одну из катушек, а также передвигать держатель измерительного датчика по оси катушек и в вертикальном направлении; электро-