

Работа 2.2

СОГЛАСОВАНИЕ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы: ознакомление с принципами построения электрической цепи и согласования источника электрического сигнала с регистратором.

Оборудование: амперметры, вольтметры, низкочастотный генератор, магазин сопротивлений, источник постоянного напряжения (тока), фотоэлемент, цифровой вольтметр, полупроводниковый стабилизатор, двухкоординатный самописец.

1. Краткая теория

Каждый измерительный прибор стараются сконструировать так, чтобы из множества действующих на него факторов он реагировал только на один, для измерения которого он предназначен. Влияние мешающих факторов, например, температуры, электрических и магнитных полей, наводок на соединительные провода, необходимо свести к минимуму, правильным образом разместив прибор и произведя экранирование его от внешних электромагнитных и тепловых полей.

Но и в этом случае может оказаться невозможным измерить интересующую вас величину, если подключение прибора существенно изменит электрическую цепь и, соответственно, измеряемый параметр. Поэтому для измерения напряжения сопротивление вольтметра должно быть достаточно большим по сравнению с внутренним сопротивлением источника напряжения, а для измерения тока амперметром сопротивление последнего должно быть достаточно малым. Что значит достаточно? Очевидно, что если изменение измеряемой величины при подключении прибора меньше его систематической погрешности, то этого достаточно. Таким образом, для проведения измерений необходимо знать сопротивление прибора и определить величину эквивалентного сопротивления источника измеряемой величины.

Для определения эквивалентного сопротивления источника измеряемой величины рассмотрим электрическую схему, приведенную на рис. 1. Если

электродвижущая сила (ЭДС) \mathcal{E} и сопротивление источника r не зависят от отдаваемого тока, зависимость тока I от напряжения U при изменении сопротивления нагрузки R будет линейной. Действительно, так как электродвижущая сила $\mathcal{E} = Ir + U$, следовательно, $I = \frac{\mathcal{E} - U}{r}$.

Для построения этой линейной зависимости тока от напряжения (рис. 2) достаточно любых двух точек: этими точками могут быть ток короткого замыкания $I_{кз}$ (не всегда допустимый режим) и напряжение холостого хода $U_{хх}$. При отключенной нагрузке напряжение холостого хода очевидно равно ЭДС, т.к. ток равен нулю. Заметим, что линейная зависимость получится только в том случае, если \mathcal{E} и r не зависят от тока нагрузки. Поэтому построение зависимости $I(U)$ по достаточному количеству точек позволит убедиться в этом и найти ЭДС и внутреннее сопротивление генератора.

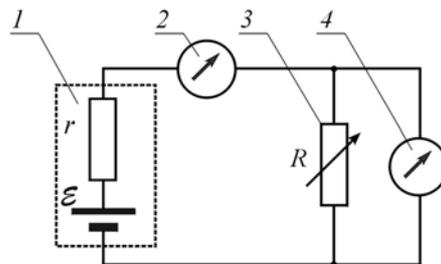


Рис. 1. Схема включения приборов для определения параметров источника напряжения: 1 – генератор, 2 – амперметр, 3 – переменное сопротивление, 4 – вольтметр.

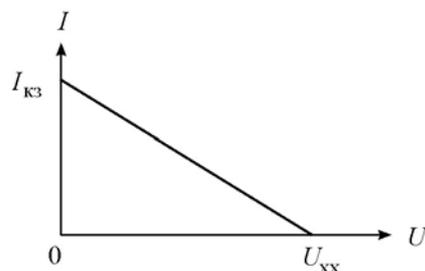


Рис. 2. Связь между током и напряжением на нагрузке при неизменной ЭДС генератора.

Для дальнейшего анализа эффектов согласования источника электрического сигнала с регистратором рассмотрим типичную схему измерительной цепи, включающую источник электрического сигнала, передающую линию, согласующий элемент и регистратор (рис. 3).

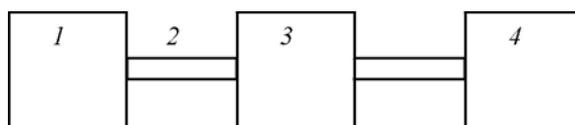


Рис. 3. Принципиальная схема измерительной цепи:
1 – источник электрического сигнала, 2 – передающая линия,
3 – согласующий элемент, 4 – регистратор.

В качестве источника электрического сигнала могут использоваться как стандартные приборы (генераторы, источники ЭДС), так и специальные датчики и детекторы, преобразующие неэлектрический сигнал (механический, оптический, тепловой, поток частиц и т.п.) в электрический. Источник характеризуется электродвижущей силой, выходным сопротивлением и частотной характеристикой генерируемого сигнала.

Передающая линия предназначена для передачи сигнала от источника к регистратору с минимальными потерями и защиты сигнала от посторонних электрических помех. Можно выделить два принципиально различных режима работы линии: передача постоянного напряжения или низкочастотных сигналов и импульсный. Во втором случае исследуются процессы, имеющие характерное время, меньшее или сравнимое со временем распространения электромагнитного сигнала по линии.

Соединение может быть выполнено следующими способами: 1) произвольной двухпроводной линией, чаще всего используемой при измерении постоянных или медленно меняющихся сигналов большой величины, 2) "витой парой", представляющей собой два скрученных и, как правило, экранированных провода, и 3) коаксиальным кабелем, устройство которого описано в Работе 3.2.

Для передачи коротких импульсов и высокочастотных сигналов используют коаксиальный кабель, имеющий постоянное волновое сопротивление¹ и позволяющий защитить передаваемый сигнал от наводок.

¹ Волновое сопротивление двухпроводной линии равно $\sqrt{L/C}$, где L и C – индуктивность и емкость единицы длины линии.

При исследовании сигналов необходимо обеспечить равенство сопротивления генератора, приемника и волнового сопротивления передающей линии. В этом случае передаваемый сигнал будет полностью поглощаться приемником без появления отраженных сигналов. Обычно используемые коаксиальные кабели имеют волновое сопротивление, равное 50 или 75 Ом.

При исследовании постоянного или низкочастотного сигнала поток электромагнитной энергии по линии от источника определяется свойствами нагрузки и слабо зависит от свойств передающей линии, в качестве которой может быть использована и обычная двухпроводная линия. Важно лишь, чтобы омическое сопротивление линии было много меньше сопротивления нагрузки.

Согласующий элемент, например, усилитель или делитель напряжения или тока, предназначен для преобразования амплитуды сигнала без искажения его формы, чтобы регистратор мог надежно зафиксировать сигнал, если он был слишком маленьким или слишком большим. Кроме того, при помощи этого элемента входное сопротивление регистратора согласуется с сопротивлением электрической цепи.

Использование омического делителя для уменьшения регистрируемого переменного напряжения может приводить к изменению формы регистрируемого сигнала, поскольку регистратор вместе с передающей линией имеет определенную емкость C , и коэффициент деления будет зависеть от частоты сигнала. Для исследования переменных сигналов

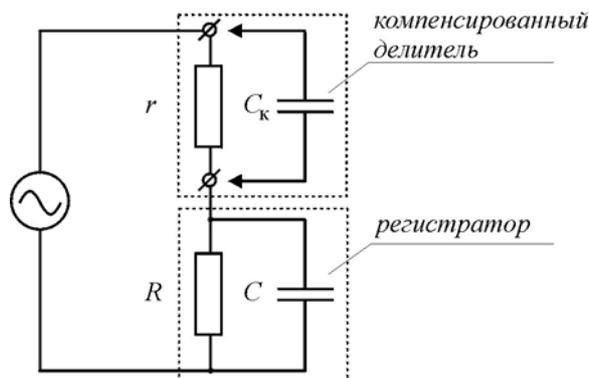


Рис. 4. Компенсированный делитель.

используют так называемый компенсированный делитель, простейшая схема которого представлена на рис. 4. Подключив параллельно делителю сопротивлению r компенсирующий конденсатор C_k емкостью $C_k = C R/r$, достигаем отсутствия зависимости коэффициента деления от частоты, а следовательно, и отсутствия искажений.

Регистратор предназначен для измерения параметров сигнала и представления информации об исследуемом сигнале. Как согласующий элемент, так и регистратор характеризуются входным сопротивлением, входной емкостью, чувствительностью, динамическим диапазоном измеряемых параметров, классом точности, частотной характеристикой. Многие регистраторы имеют встроенный согласующий элемент в виде отдельного блока.

В зависимости от соотношения величин выходного сопротивления источника электрического сигнала и сопротивления нагрузки, один и тот же источник может работать как генератор тока или как генератор напряжения. Возможен также режим согласованной нагрузки, когда источник отдает максимальную мощность в цепь.

Режим генератора тока реализуется в том случае, если сопротивление нагрузки R при всех его изменениях остается малым по сравнению с выходным сопротивлением источника r . При этом ток в цепи постоянен $I = \mathcal{E}/r$, а падение напряжения на нагрузке U меняется пропорционально сопротивлению нагрузки $U = IR$.

Источник работает как генератор напряжения в том случае, если выходное сопротивление источника r много меньше сопротивления нагрузки R . В этом случае ток в цепи обратно пропорционален сопротивлению нагрузки $I = \mathcal{E}/R$, а напряжение $U = IR = \mathcal{E}$ постоянно и не зависит от сопротивления нагрузки.

В общем случае, при использовании источника постоянного тока передаваемая от источника к регистратору мощность определяется следующим образом:

$$P = IU = \mathcal{E}^2 \frac{R}{(R + r)^2}.$$

График зависимости мощности от сопротивления нагрузки представлен на рис. 5. Видно, что при равенстве выходного сопротивления источника и сопротивления нагрузки $r = R$ источник передает максимум мощности приемнику. Такой режим называется режимом согласованной нагрузки.

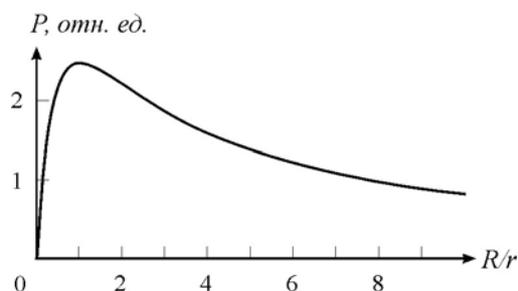


Рис. 5. Зависимость передаваемой мощности от сопротивления нагрузки R , выраженного в единицах выходного сопротивления источника r .

Для переменного тока при работе в режиме согласованной нагрузки требуется, чтобы активные сопротивления генератора и нагрузки были равны, а реактивные сопротивления были равны по абсолютной величине, но имели противоположный характер. Так, если у генератора реактивная компонента полного сопротивления имеет индуктивный характер, то регистратор должен иметь емкостный характер реактивного сопротивления, и наоборот.

2. Задания

1. Определение выходного сопротивления источника

Соберите схему, представленную на рис. 1, включающую в себя низкочастотный генератор, амперметр, вольтметр и магазин сопротивлений. Ручкой переключения диапазонов на передней панели генератора установите выходное сопротивление генератора 600 Ом. Изменяя сопротивление R в диапазоне от 100 до 2000 Ом, измерьте ток в цепи и падение напряжения на сопротивлении.

Постройте график зависимости тока I от напряжения U и определите по нему выходное сопротивление генератора.

Постройте график зависимости мощности, выделяемой на нагрузке, от сопротивления нагрузки, предварительно подумав о том, что же действительно является нагрузкой. Определите по графику выходное сопротивление генератора.

2. Исследование режимов стабилизации тока и напряжения

В схеме, используемой для выполнения предыдущего задания, замените низкочастотный генератор источником постоянного напряжения, таким как, например, Б5-47.

Изменяя сопротивление нагрузки, измерьте выходные параметры источника питания, ток и напряжение, обращая внимание на индикацию режима стабилизации, находящейся на передней панели источника. Измерения проводите только при таких значениях ограничения тока и напряжения, устанавливаемых переключателями на источнике, при которых в процессе изменения сопротивления нагрузки происходит смена режима стабилизации. Постройте графики зависимости тока I и напряжения U от сопротивления нагрузки R . Определите величину сопротивления нагрузки, соответствующей смене режима стабилизации. Сравните эту величину со значением отношения значений напряжения и тока, установленных на шкалах источника.

3. Исследование фотоэлемента

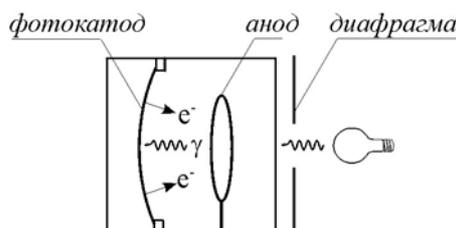


Рис. 6. Принципиальная схема вакуумного фотоэлемента.

Принципиальная схема вакуумного фотоэлемента показана на рис. 6. В стеклянной откачанной колбе расположены фотокатод и анод. Под действием электромагнитного излучения ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов фотокатод эмитирует электроны. Если энергия падающего кванта $h\nu$ превышает работу выхода A , то ее избыток превращается в кинетическую энергию высвобожденного электрона $E = h\nu - A$. Попадающие на анод электроны при отсутствии стока могут зарядить анод до потенциала $U = E/e$, препятствующего дальнейшему накоплению заряда (здесь e – заряд электрона).

При минимальной и максимальной яркости лампы с помощью цифрового прибора определите зависимость тока и ЭДС фотоэлемента от

освещенности, изменяя диаметр ирисовой диафрагмы, помещенной перед фотоэлементом. Постройте графики зависимости тока и ЭДС от освещенности при минимальной и максимальной яркости лампы. Объясните наблюдаемые эффекты.

Полагая, что фотоэлемент освещается видимым светом, характеризующимся энергией фотонов от 1,6 эВ (красная область спектра) до 3 эВ (фиолетовая), оцените работу выхода материала фотокатода.

Определите, источником тока или источником напряжения является фотоэлемент в проведенных измерениях.

4. Исследование вольт-амперной характеристики стабилитрона

Соберите схему согласно рис. 7, включающую генератор сигналов специальной формы Г6-28, стабилитрон, постоянное сопротивление R и двухкоординатный самописец. Подавая двуполярный сигнал амплитудой несколько вольт, периодом несколько секунд, снимите вольт-амперную характеристику стабилитрона $U(I)$. Не забудьте провести осевые линии тока (при $U = 0$), напряжения (при $I = 0$) и разметить оси. По полученной кривой в нескольких характерных точках определите дифференциальное сопротивление $R_d = \frac{\partial U}{\partial I}$. Постройте график $R_d(I)$.

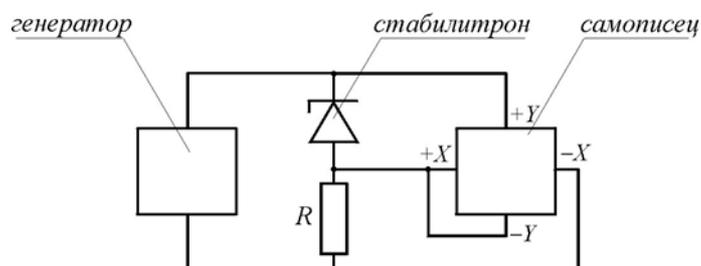


Рис. 7. Схема включения приборов для исследования вольт-амперной характеристики стабилитрона.

**Дополнительное задание к работе 2.2
по курсу "Основы информационных технологий"**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СТАБИЛИТРОНА**

Постановка задачи

Полупроводниковый стабилитрон представляет собой полупроводниковый диод, работающий при обратном напряжении на нем (рис. 8, а). Хотя при подаче обратного напряжения диод практически не пропускает ток, при некотором напряжении происходит пробой, и ток через диод резко возрастает. Специальная технология делает возможным изменять пробивное напряжение в широком диапазоне от 3,5 до 180 В и добиться, чтобы такое резкое возрастание тока не приводило к выходу диода из строя. Такой режим работы диода (стабилитрона) позволяет стабилизировать напряжение при сильном изменении протекающего тока.

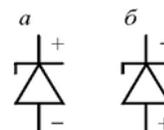


Рис. 8. Полярность включения.

При прямом включении стабилитрона (рис. 8, б) его вольт-амперная характеристика, так же как и диода, описывается следующим выражением:

$$I = I_s \left(e^{\frac{eU}{mkT}} - 1 \right),$$

где I_s – ток насыщения p - n -перехода; T – температура; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж К⁻¹ – постоянная Больцмана; m – поправочный коэффициент. Простое рассмотрение в приближении "свободных" зарядов с максвелловским распределением по скорости позволяет получить приведенное выше выражение, но без коэффициента m . Введение поправочного коэффициента m позволяет учесть более сложные процессы, отражающие реальные свойства конкретного стабилитрона. Из этой формулы можно определить дифференциальное сопротивление стабилитрона в прямом включении:

$$R_d(U) = \left(\frac{\partial I}{\partial U} \right)^{-1} = \frac{mkT}{I_s} e^{-\frac{eU}{mkT}}.$$

Вам предлагается проверить эту формулу по экспериментально полученной вольт-амперной характеристике стабилитрона на участке прямого включения и определить значения I_s и m .

Измерения

С помощью установки, собранной по схеме, представленной на рис. 7, но заменив самописец цифровыми вольтметрами, а генератор сигналов треугольной формы – источником постоянного напряжения, снимите вольт-амперную характеристику стабилитрона, изменяя напряжение источника питания с шагом 0,1 В. Проведя измерения при одной полярности подаваемого напряжения, не забудьте провести измерения и при обратном напряжении. Запишите в таблицу полученные значения напряжений. Узнайте температуру воздуха в помещении и запишите это значение.

Обработка данных и представление

Внесите в столбцы таблицы *Excel* значения измеренных падений напряжения на стабилитроне и на постоянном сопротивлении R в порядке возрастания подаваемого напряжения. В следующем столбце поместите вычисляемые значения протекающего через стабилитрон тока. В следующих двух столбцах поместите значения производной и напряжения, рассчитанные по формулам конечных разностей:

$$\frac{\partial U}{\partial I} = \frac{U_{k+1} - U_k}{I_{k+1} - I_k} \quad \text{и} \quad U = \frac{U_{k+1} + U_k}{2}.$$

Постройте вольт-амперную характеристику стабилитрона и график зависимости дифференциального сопротивления от напряжения $R_d(U) = (\partial I / \partial U)^{-1}$.

Представив зависимость дифференциального сопротивления функцией $y(x) = a e^{bx}$, с помощью регрессионного анализа в области прямой проводимости стабилитрона определите коэффициенты a и b . Определите обратный ток I_s и поправочный коэффициент m , естественно, не забыв определить и точность их измерений.

Представьте измеренную вольт-амперную характеристику в области прямой проводимости в виде практически применимого выражения.