

6. Нелинейные электрические цепи

Нелинейными элементами электрической цепи называются такие элементы параметры, которых зависят от напряжений, токов, магнитных потоков и других величин, т.е. это элементы с нелинейными вольтамперными, вебер-амперными и кулон-вольтными характеристиками. Принципиально все элементы электрических цепей в большей или меньшей степени нелинейны, но если нелинейность существенно не влияет на характер процессов в цепи, то ею пренебрегают и считают цепь линейной.

Наличие даже одного нелинейного элемента в цепи не позволяет применить для её анализа методы, основанные на разделении реакции цепи, такие как метод контурных токов, метод наложения, метод эквивалентного генератора. При наличии нелинейности анализ процессов значительно усложняется и если это возможно, то характеристики нелинейных элементов линеаризуются, аппроксимируются полиномами и т.п.

В современной технике нелинейные элементы находят очень широкое распространение. С их помощью преобразуется электрическая энергия, генерируются сигналы с заданными свойствами, преобразуется и сохраняется информация. Они применяются в энергетике, автоматике, радиотехнике, вычислительной технике и других областях, связанных с применением электрической энергии.

6.1. Нелинейные резистивные элементы

Нелинейные резистивные элементы (НР) это элементы электрической цепи с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ). Они относятся к числу наиболее распространённых в технике элементов и отличаются большим разнообразием свойств. Одна из возможных классификаций НР приведена на рис. 6.1, а.

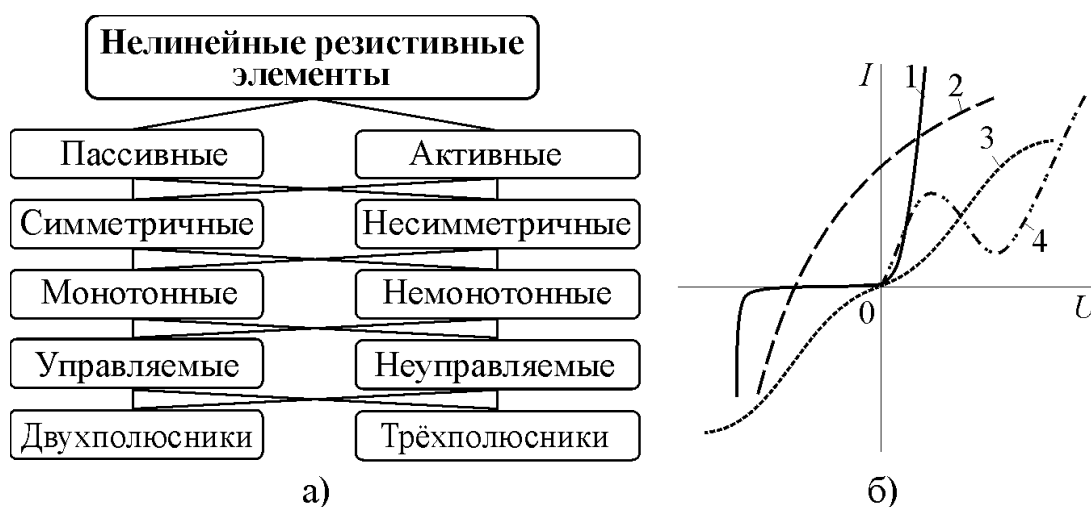


Рис.6.1

По признаку наличия источника электрической энергии НР делятся на активные и пассивные. Если ВАХ проходит через начало координат, то НР

пассивный. В противном случае он относится к активным НР и его схема

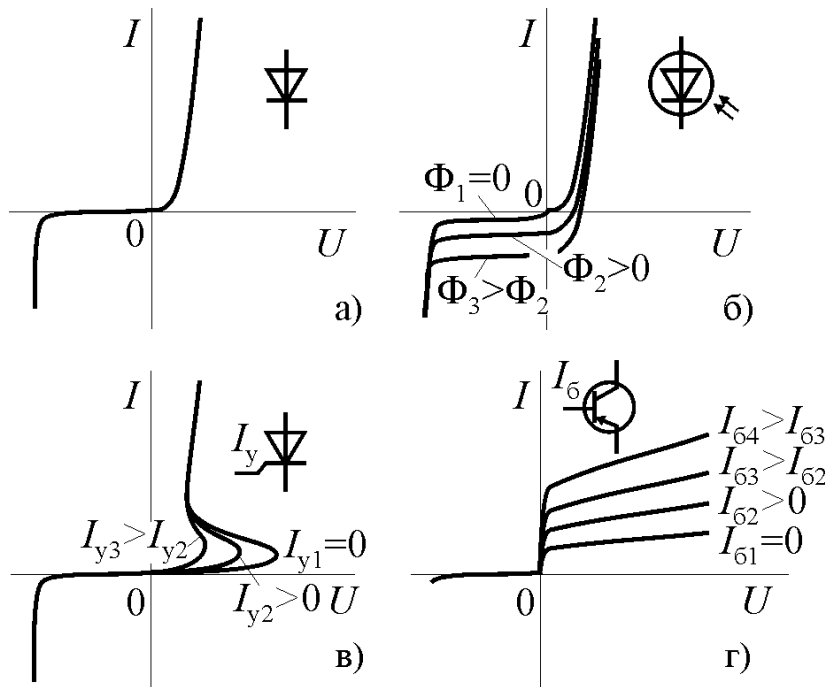


Рис. 6.2

замещения содержит источник ЭДС или источник тока (кривая 2 рис. 6.1, б). По отношению к началу координат ВАХ НР могут быть симметричными (кривая 3 рис. 6.1, б) и несимметричными.

Знак производной dU/dI в различных точках ВАХ может быть неизменным (монотонная характеристика), а может изменяться (немонотонная ВАХ кривая 4 рис. 6.1, б). Наибольшим разнообразием отличаются

ВАХ полупроводниковых приборов. На рис. 6.2 в качестве примера приведены ВАХ диода, фотодиода, тиристора и транзистора (рис. 6.2, а, б, в и г соответственно). Первый элемент относится к неуправляемым НР, а остальные – к управляемым. Характеристики этих элементов резко несимметричны, при разных полярностях приложенного напряжения они обладают различными сопротивлениями. Вольтамперные характеристики управляемых НР, кроме того, изменяются под воздействием управляющей величины. У фотодиода изменение ВАХ происходит под воздействием светового потока Φ , у тиристора и транзистора – под воздействием тока, протекающего через управляющий вход (I_y, I_b). Диод и фотодиод относятся к двухполюсникам, т.к. включаются в электрическую цепь в двух точках, а тиристор и транзистор – к трёхполюсникам.

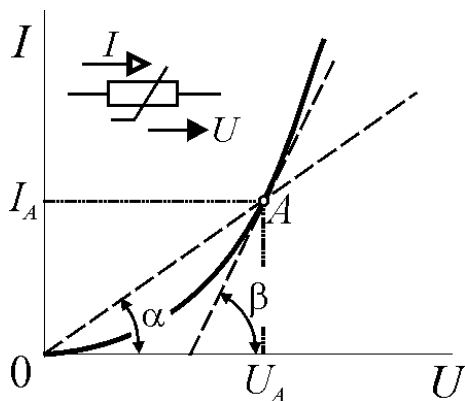


Рис.6.3

Свойства НР определяются его ВАХ. В отличие от линейного резистивного элемента каждая точка ВАХ нелинейного элемента определяется двумя параметрами статическим сопротивлением $R_{ст} = U/I$ и дифференциальным сопротивлением $R_{диф} = dU/dI$. Графически статическое сопротивление представляет собой котангенс угла наклона секущей проведённой из начала координат ВАХ в точку А

(рис. 6.3): $R_{ст} = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{ctg} \alpha$, а дифференциальное сопротивление – котангенс угла

наклона касательной в точке A (рис. 6.3): $-R_{дин} = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{ctg} \beta$. Статическое со-

противление соответствует сопротивлению НР в цепи постоянного тока, а дифференциальное – сопротивлению НР при малых изменениях тока и напряжения относительно рабочей точки.

Вопросы для самопроверки

1. Какие элементы электрической цепи называются нелинейными?
2. По какому признаку можно определить наличие источника электрической энергии в нелинейном резисторе?
3. Дайте определение статическому (дифференциальному) сопротивлению?
4. Как соотносятся между собой статическое и дифференциальное сопротивления линейного резистора?

6.2. Анализ цепи с нелинейными двухполюсниками

Задача анализа нелинейной цепи заключается в расчёте токов и напряжений на участке цепи при заданных ВАХ НР, сопротивлениях линейных элементов и ЭДС источников. Современные справочные данные НР включают их математические модели, позволяющие решить эту задачу численными методами с помощью специализированных пакетов программ. Поэтому мы остановимся на графических методах анализа, дающих представление об особенностях режимов нелинейных цепей.

6.2.1. Цепь с источником постоянного тока

Если требуется определить ток в последовательном соединении НР (рис. 6.4, а), то можно построить ВАХ участка цепи $I(U)$ на основе закона Кирхгофа

$$U = U_1 + U_2, \quad (6.1)$$

а затем по полученной характеристике найти ток I_0 при заданном значении

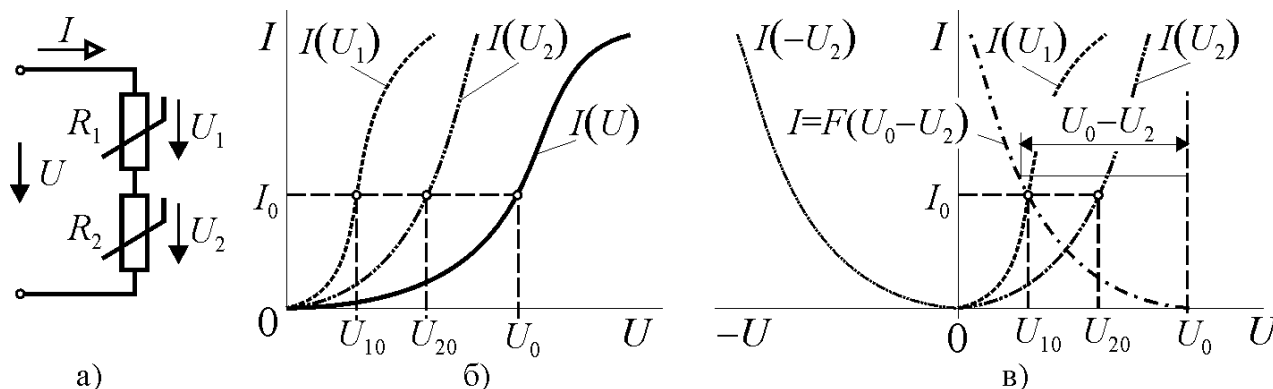


Рис. 6.4

напряжения U_0 . После чего по найденному току можно определить напряжения на отдельных элементах U_{10} , U_{20} . Построение ВАХ $I(U)$ выполняется путём суммирования абсцисс точек ВАХ резистивных элементов R_1 и R_2 (рис. 6.4, б).

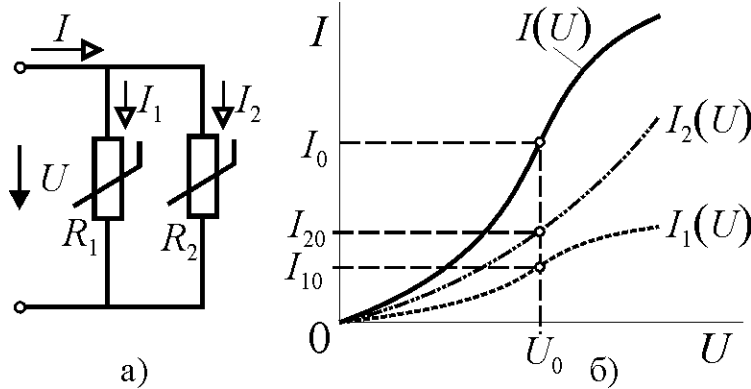


Рис. 6.5

ся общий ток цепи I_0 и токи в отдельных НР I_{10} , I_{20} .

Существует более удобный метод, не требующий построения общей ВАХ участка $I(U)$ и называемый *методом пересечения характеристик*. Из выражения (6.1) напряжение на R_1 при заданном значении входного напряжения U_0 равно $U_1 = U_0 - U_2$. Значит, если построить ВАХ R_2 с аргументом $U_0 - U_2$, то ордината точки пересечения этой характеристики с ВАХ R_1 даст искомый ток. Для построения вспомогательной ВАХ $I = F(U_0 - U_2)$ вначале строится ВАХ $I(-U_2)$, представляющая собой характеристику зеркально симметричную относительно оси ординат ВАХ $I(U_2)$, а затем она смещается по оси абсцисс на величину $+U_0$ (рис. 6.4, в).

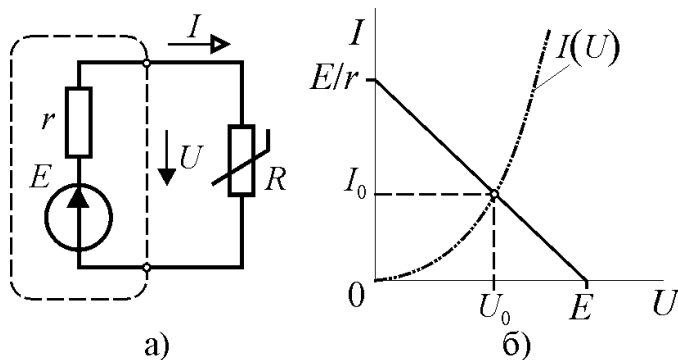


Рис. 6.6

элементом. В разделе методов анализа цепей постоянного тока было показано, что любая электрическая цепь по отношению к отдельной ветви или элементу может быть представлена эквивалентным генератором с источником, ЭДС которого равна напряжению на разомкнутой ветви, и внутренним со-

При параллельном соединении НР (6.5, а) ВАХ участка цепи $I(U)$ строится на основании первого закона Кирхгофа

$$I = I_1 + I_2,$$

т.е. путём суммирования ординат точек ВАХ резистивных элементов R_1 и R_2 (рис. 6.5, б). После получения ВАХ $I(U)$ определяют

Если резистивный элемент R_2 линейный, то ВАХ $I = F(U_0 - U_2)$ представляет собой линию с наклоном соответствующим значению R_2 и проходящую через точку $+U_0$ на оси абсцисс. Это позволяет применять метод пересечения характеристик для электрических цепей с одним нелинейным

противлением равным сопротивлению цепи относительно точек подключения. Таким образом, если выделить нелинейный элемент, то вся линейная часть цепи по отношению к нему будет линейным активным двухполюсником (рис. 6.6, а) с ВАХ проходящей через точки $[E, 0]$ и $[0, E/r]$ (рис. 6.6, б). Точка пересечения линии ВАХ двухполюсника, называемой *нагрузочной характеристикой*, с ВАХ НР определяет режим его работы. Этот метод анализа цепей с нелинейным элементом называется *методом нагрузочной характеристики*.

6.2.2. Цепь с источником переменного тока

Мгновенные значения тока или напряжения на НР в цепи с источником переменного тока можно получить последовательным построением точек кривых методом нагрузочной характеристики.

В качестве примера выполним построение кривых тока и напряжения на полупроводниковом диоде в цепи с источником синусоидальной ЭДС $e(t) = E_m \sin \omega t$ (рис. 6.7).

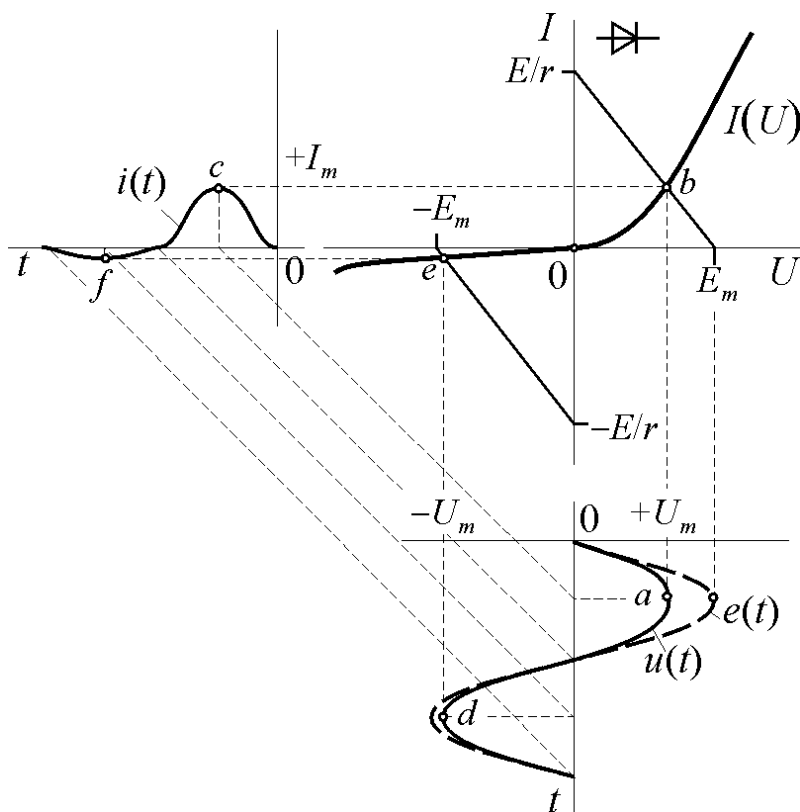


Рис. 6.7

Схема замещения цепи соответствует рис. 6.6, а. Параллельно оси ординат ВАХ построим ось времени для кривых ЭДС и напряжения на диоде, а параллельно оси абсцисс – ось времени для кривой тока, протекающего через диод. Выберем некоторый момент времени и построим для него нагрузочную характеристику в соответствии с мгновенным значением ЭДС. На рисунке один такой момент выбран для положительного максимума ЭДС и другой для отрицательного. Точка пересечения

нагрузочной характеристики с ВАХ диода (точка b на рис. 6.7) определяет мгновенные значения тока и напряжения на диоде. Максимум напряжения $+U_m$ меньше максимума ЭДС на величину падения напряжения на эквивалентном сопротивлении цепи r . Аналогично построим нагрузочную характеристику в третьем квадранте ВАХ для отрицательного максимума и определим ток и напряжение на диоде по координатам точки пересечения e . Здесь

падение напряжения на эквивалентном сопротивлении существенно меньше, чем при положительном максимуме, т.к. существенно меньше ток в цепи. Это связано с тем, что сопротивление диода при обратной полярности напряжения на несколько порядков больше, чем при прямой. На рисунке это соотношение уменьшено, чтобы можно было выявить детали построения кривых.

Повторяя построения для всех точек синусоиды ЭДС, мы получим кривые мгновенных значений тока и напряжения. Обе кривые несинусоидальны. Отрицательные значения тока значительно меньше положительных и если пренебречь ими, а также искажениями синусоиды тока при положительной полуволне ЭДС, то диод можно считать элементом электрической цепи с односторонней проводимостью. Он проводит ток при положительной полярности приложенного к нему напряжения и не проводит при отрицательной полярности. Такой элемент цепи называется *вентильным элементом*.

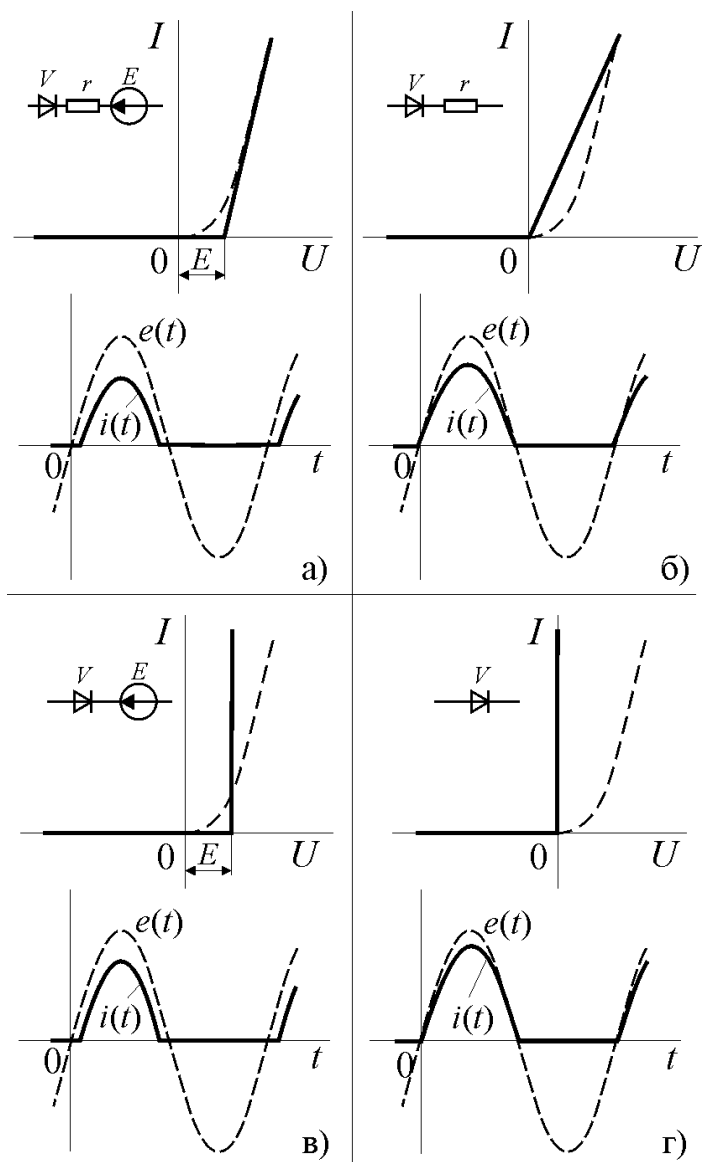


Рис. 6.8

При анализе цепей с диодами ВАХ часто заменяют схемами замещения с различной степенью детализации свойств диода (рис. 6.8). В такую схему включают идеальный вентильный элемент V с нулевым сопротивлением при положительной полярности напряжения и нулевой проводимостью при отрицательной (рис. 6.8, г). Кроме того, ВАХ диода в первом квадранте аппроксимируют линейными функциями. Наилучшая аппроксимация достигается при включении в схему замещения источника ЭДС E и резистивного элемента r , соответствующего дифференциальному сопротивлению на большей части ВАХ (рис. 6.8, а). Если напряжение на диоде существенно больше падения напряжения на начальном участке ВАХ, то искажения тока и напряжения

незначительны и из схемы замещения можно исключить источник ЭДС (рис. 6.8, б). В случае малого сопротивления диода по отношению к сопротивлению цепи, можно исключить из схемы дифференциальное сопротивление (рис. 6.8, в).

Полупроводниковые диоды являются наиболее распространёнными НР. Они используются в энергетике для преобразования переменного тока в постоянный, в радиотехнике, автоматике и вычислительной технике для преобразования сигналов и реализации логических функций.

Вопросы для самопроверки

1. Как строится вольтамперная характеристика участка электрической цепи с последовательным (параллельным) соединением нелинейных резисторов?
2. Что такое метод пересечения характеристик и как он используется для определения режима работы цепи?
3. Что такое нагрузочная характеристика?
4. Что такое метод нагрузочной характеристики? В каком случае он используется?
5. Нарисуйте кривую тока в электрической цепи с полупроводниковым диодом и объясните причину искажений.
6. Нарисуйте кривую напряжения на полупроводниковом диоде и объясните причину искажений.
7. Нарисуйте вольтамперные характеристики диода при различных вариантах аппроксимации?
8. Нарисуйте кривые тока через диод при различных вариантах аппроксимации вольтамперной характеристики.
9. Укажите условия, при которых применяется каждая из схем замещения диода.

6.3. Анализ цепи с нелинейными трёхполюсниками

Самым распространённым трёхполюсником, т.е. элементом электрической цепи, подключаемым к ней в трёх точках, является транзистор. Выводы, которыми он подключается к внешней цепи называются коллектор, эмиттер и база (κ , ε , δ на рис. 6.9, а). Одна из возможных схем его включения приведена на рис. 6.9, а. Ток коллектора транзистора I_{κ} определяется напряжением между коллектором и эмиттером $U_{\kappa\varepsilon}$, а также током, протекающим через его базу I_{δ} , поэтому ВАХ $I_{\kappa}(U_{\kappa\varepsilon}, I_{\delta})$ представляют собой множество характеристик, построенных для различных значений I_{δ} (рис. 6.9, в). Таким образом, изменяя ток базы транзистора можно воздействовать на режим работы цепи коллектор-эмиттер, т.е. электрическая цепь базы является управляющей цепью транзистора или входной цепью, а цепь коллектор-эмиттер – выходной или цепью нагрузки. Поэтому характеристики $I_{\kappa}(U_{\kappa\varepsilon}, I_{\delta})$ называются выходными характеристиками транзистора. В отличие от выходных характеристик,

входная ВАХ $I_{\text{б}}(U_{\text{бэ}})$ мало зависит режимов других цепей. Она представляет собой ВАХ диода, т.к. между базой и эмиттером находится кристаллическая структура аналогичная структуре диода. Основным свойством транзистора, обеспечивающим его применение в технике, является способность малым током базы воздействовать на большой ток коллектора, т.е. способность усиливать ток.

Анализ состояния входной и выходной цепи транзистора проводится методом пересечения характеристик для входной и выходных ВАХ. По заданному значению сопротивления $R_{\text{к}}$ и ЭДС $E_{\text{к}}$ цепи коллектора для выходных

ВАХ строится нагрузочная характеристика и определяется значение тока базы, обеспечивающее требуемый режим в выходной цепи. Затем по входной ВАХ и нагрузочной характеристике входной цепи определяется режим её работы при требуемом токе.

В технических устройствах транзистор используется в качестве усилителя сигналов постоянного и переменного тока, однако для усиления переменного тока требуется введение в сигнал постоянной составляющей, т.к. транзистор обладает только односторонней проводимостью. Постоянную составляющую тока базы $I_{\text{б0}}$ определяют по выходным ВАХ как среднее значение между максимальным $I_{\text{бmax}}$ и минимальным $I_{\text{бmin}}$ токами, соответствующими заданным значениям максимального $I_{\text{кmax}}$ и мини-

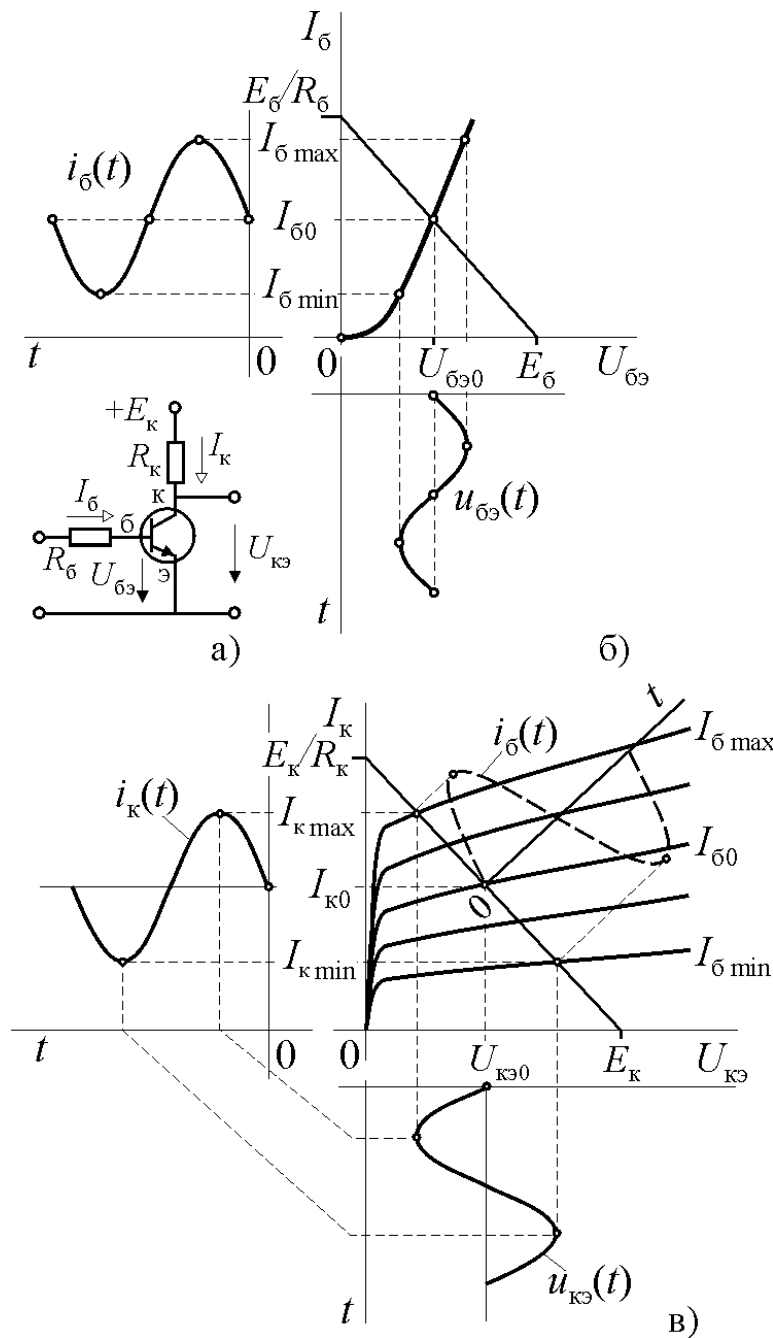


Рис. 6.9

мального $I_{к\min}$ тока коллектора. После чего по входной ВАХ определяют параметры сопротивления $R_б$ и источника ЭДС $E_б$, обеспечивающие формирование тока базы в заданных пределах.

Методом пересечения характеристик определяют также режим работы транзистора в качестве ключевого элемента, т.е. управляемого элемента электрической цепи, который может находиться в двух состояниях: открытом и закрытом. В первом состоянии его сопротивление близко к нулевому, а во втором – к бесконечности. Для этого выбирают режим нагрузки таким образом, чтобы точка пересечения нагрузочной характеристики оказалась на начальном участке выходной ВАХ, соответствующей максимальному току ба-

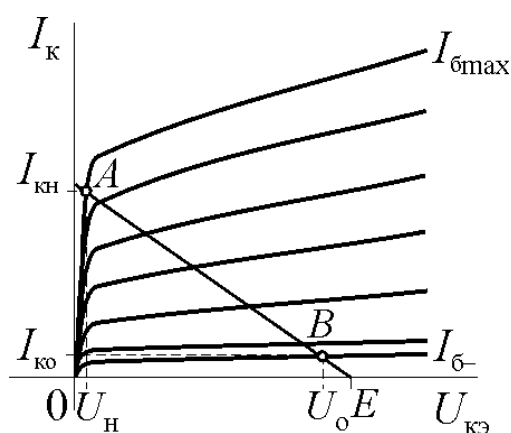


Рис. 6.10

зы $I_{б\max}$ (точка A на рис. 6.10). В этом режиме при большом токе коллектора $I_{кн}$ напряжение коллектор-эмиттер $U_н$ близко к нулевому, что соответствует замыканию точек коллектор-эмиттер, т.е. открытому состоянию ключа. Режим работы транзистора в точке A называется режимом насыщения. При подаче в базу транзистора небольшого тока отрицательной полярности $I_{б-}$ рабочая точка переместится в точку B . При этом ток коллектора $I_{ко}$ будет очень малым, а напряжение коллектор-эмиттер $U_о$ почти равным ЭДС E . Такое состояние близко к размыканию цепи коллектор-эмиттер, т.е. эквивалентно закрытому ключу. Оно называется также режимом отсечки транзистора.

Ключевой режим работы транзистора используется в преобразователях постоянного тока в переменный, преобразователях частоты переменного тока, в устройствах автоматики, в вычислительной технике. Процессоры современных компьютеров построены на основе миллиардов транзисторов, работающих в ключевом режиме.

Вопросы для самопроверки

1. Для чего в ток базы транзистора вводится постоянная составляющая?
2. Какой метод используют для определения режимов работы цепей базы и коллектора?
3. Нарисуйте вольтамперные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером и покажите на них рабочие точки соответствующие режимам насыщения и отсечки.
4. В каких устройствах используется ключевой режим работы транзистора?