

ЛЕКЦИЯ 13

1 ЧАСТЬ 13 неделя

Нелинейные элементы
электрических цепей
поточного тока

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Расчетные формулы

$$E = U_0 + U_{\text{л}} + U_2 = I(R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}});$$

$$U_2 = E - \Delta U = E - I(R_0 + R_{\text{л}}),$$

где

$$\Delta U = U_0 + U_{\text{л}} = I(R_0 + R_{\text{л}}).$$

Видно, что напряжение на нагрузке U_2 всегда меньше ЭДС генератора E на величину суммарной потери напряжения ΔU в источнике питания и линии электропередачи.

По закону Ома ток в одноконтурной цепи $I = \frac{E}{R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}}}.$

Напряжение на нагрузке $U_2 = IR_{\text{н}}$. С учетом предыдущей формулы:

$$U_2 = \frac{ER_{\text{н}}}{R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}}} \quad \text{или} \quad U_2 = \frac{E}{\frac{R_0 + R_{\text{л}}}{R_{\text{н}}} + 1}.$$

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Анализ вышеприведенных формул показывает, что рост сопротивлений R_0 и R_L вызывает увеличение суммарной потери напряжения ΔU в источнике питания и линии электропередачи и, соответственно, уменьшение напряжения питания нагрузки U_2 .

С увеличением сопротивления нагрузки напряжение питания U_2 увеличивается, изменяясь от 0 до E , при увеличении сопротивления нагрузки от $R_H = 0$ до $R_H = \infty$.

Режим с нулевым значением сопротивления нагрузки ($R_H = 0$) называется *режимом короткого замыкания*, сокращенно – **КЗ**, режим с отключенной нагрузкой, когда до $R_H = \infty$, называется *режимом холостого хода*, сокращенно – **ХХ**.

График зависимости $U_2 = f(R_H)$ от режима **КЗ** до режима **ХХ**, включая номинальный режим (при $R_H = R_{Hном}$) показан на рис. 7.

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

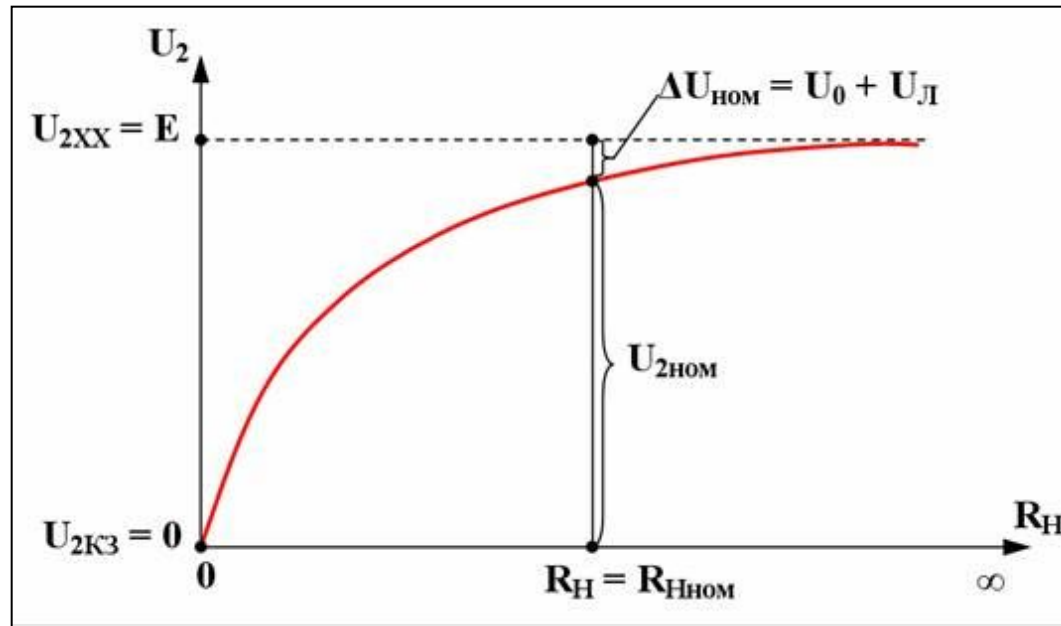


Рис. 7. Зависимость напряжения питания U_2 от сопротивления нагрузки R_H

Из графика видно, что с увеличением сопротивления нагрузки R_H увеличивается доля напряжения U_2 , приходящегося на питание нагрузки с одновременным уменьшением потери напряжения $\Delta U = U_0 + U_L$.

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Номинальный режим работы цепи

При проектировании системы электроснабжения соотношение параметров цепи R_0 , R_L и R_H выбирают таким образом, чтобы в *номинальном режиме*, при номинальной величине сопротивления нагрузки $R_H = R_{Hном}$ потери напряжения $\Delta U_{ном}$ были намного меньше напряжения питания нагрузки $U_{2ном}$. Это объясняется тем, что потери напряжения в линии U_L и источнике питания U_0 напрямую связаны с потерями мощности в этих элементах электрической цепи.

Для уменьшения потерь напряжения нужно, чтобы суммарное сопротивление линии и источника питания было намного меньше сопротивления нагрузки: $R_0 + R_L \ll R_H$. Номинальное напряжение U_H , номинальный ток I_H и номинальная мощность нагрузки P_H связаны соотношением: $P_H = U_H I_H$.

Соблюдение номинальных режимов работы источников и приемников обеспечивает эффективное и экономичное производство и потребление электрической энергии, высокий коэффициент полезного действия и гарантирует заданный срок службы электротехнических устройств.

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия (КПД) η системы электроснабжения на примере цепи постоянного тока, как и любой другой замкнутой энергетической системы, не обязательно электрического характера, определяется как отношение полезной мощности P_2 , выделяемой в нагрузке R_H к мощности P_1 , вырабатываемой в источнике энергии этой системы:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Мощность P_1 , равная мощности $P_{ист}$, вырабатываемой в источнике питания, равна сумме полезной мощности P_2 и мощности потерь ΔP . Поэтому КПД цепи можно определить как:

$$\eta = \frac{P_2}{\Delta P + P_2} = \frac{1}{\frac{\Delta P}{P_2} + 1} < 1.$$

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Коэффициент полезного действия

Мощности в источнике питания и нагрузке соответственно равны:

$$P_1 = P_{\text{ист}} = E \cdot I, \quad P_2 = U_2 \cdot I.$$

Подставляя мощности P_1 и P_2 из этих формул и деля числитель и знаменатель на ток I , получим выражение для КПД в виде отношений напряжений:

$$\eta = \frac{U_2}{E} = \frac{U_2}{U_0 + U_{\text{л}} + U_2} = \frac{U_2}{\Delta U + U_2}.$$

Деля числитель и знаменатель этого выражения на ток I , получим КПД, как отношение сопротивлений элементов цепи:

$$\eta = \frac{R_{\text{н}}}{R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}}} = \frac{1}{\frac{R_0 + R_{\text{л}}}{R_{\text{н}}} + 1}.$$

Это выражение показывает, что при увеличении сопротивления нагрузки от нуля до очень большой величины, КПД цепи растет от нуля до величины приближенной к единице (100%).

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Режим холостого хода

Под режимом холостого хода (сокращенно – ХХ) *понимается такой режим, при котором через источник или приемник не протекает ток.*

При этом источник не отдает энергию во внешнюю цепь, а приемник не потребляет ее. В частности, отключение нагрузки от источника питания, когда $R_H = \infty$, вызывает *режим холостого хода*. В этом случае:

$$U_2 = U_{XX} = E; \quad I = I_{XX} = 0.$$

Режим короткого замыкания (аварийный режим)

Режим с нулевым значением сопротивления нагрузки ($R_H = 0$) *называется режимом короткого замыкания*, сокращенно – КЗ.

Режимом КЗ в общем случае может возникнуть при соединении между собой накоротко зажимов источника или иных элементов электрической цепи, между которыми имеется напряжение. Расчет тока при *коротком замыкании нагрузки* ($I_{КЗН}$) для [цепи](#) рис. 2.6 определяется формулой:

$$I_{КЗН} = \frac{E}{R_{\text{вн}} + R} \gg I_H.$$

Короткое замыкание источника приводит к току КЗ: $I_{КЗИ} = \frac{E}{R_0} \gg I_{КЗН} \gg I_H.$

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Режим **КЗ** может быть следствием нарушения изоляции, обрыва проводов, ошибки электромонтажника при сборке электрической цепи и др. При коротком замыкании могут возникнуть недопустимо большие токи $I_{\text{КЗ}}$, электрическая дуга, что может привести к тяжелым последствиям, поэтому режим короткого замыкания является аварийным.

Режим согласованной нагрузки

Согласованный режим работы наступает при условии равенства сопротивления нагрузки $R_{\text{Н}}$ сумме внутреннего сопротивления источника R_0 и сопротивления линии электропередачи $R_{\text{Л}}$: $R_{\text{Н}} = R_0 + R_{\text{Л}}$.

В *согласованном режиме работы* обеспечивается передача максимальной энергии от источника к приемнику и достигается максимальная мощность, выделяемая в нагрузке.

Мощность, выделяемая в нагрузке в согласованном режиме, хотя и будет максимальна, но при этом будет равна только половине мощности вырабатываемой источником: $P_{2\text{max}} = 0,5P_1$ [1] (см. рис. 8).

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Режим согласованной нагрузки

КПД электрической системы в согласованном режиме работы, равен $\eta = 0,5$ (то есть пятьдесят процентов).

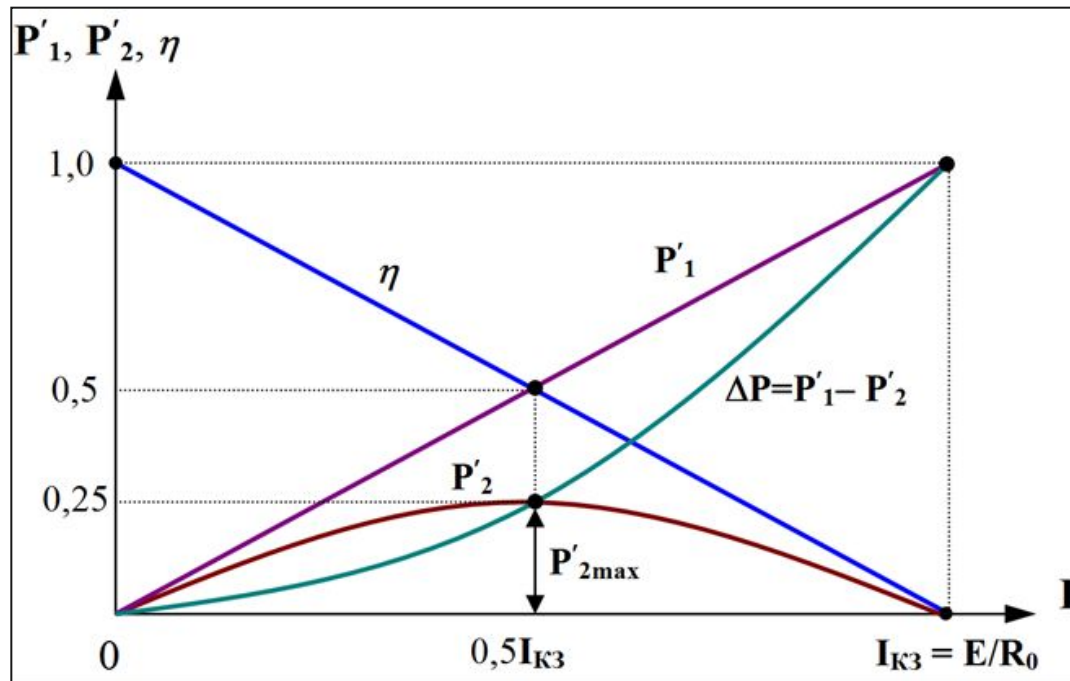


Рис. 8. Зависимости относительных мощностей источника P'_1 , приемника P'_2 и КПД электрической системы η от тока нагрузки I

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Режим согласованной нагрузки

Поэтому *согласованный режим работы* приемлем только для маломощных электрических систем, где можно пренебречь потерями электрической энергии в силу их малости, но совершенно не допустим в силовых (то есть мощных) электротехнических системах, устройствах и установках.

На следующем слайде представлены графики зависимостей относительных мощностей источника P'_1 , приемника P'_2 и КПД электрической системы η от относительного сопротивления R'_H нагрузки:

$$R'_H = \frac{R_H}{R_0 + R_L}$$

Под относительными мощностями P'_1 , P'_2 понимаются мощности источника и приемника при единичной мощности источника в режиме короткого замыкания (при нулевом значении сопротивления нагрузки $R_H = 0$).

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

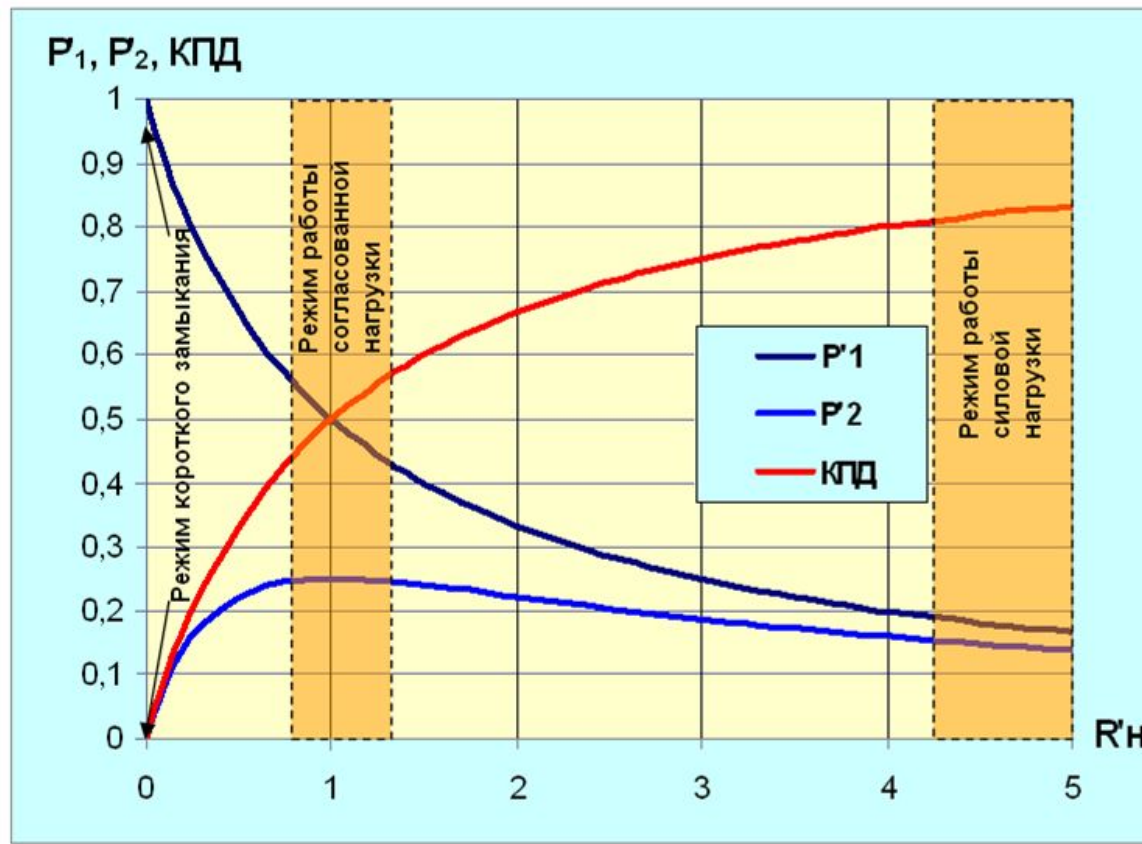
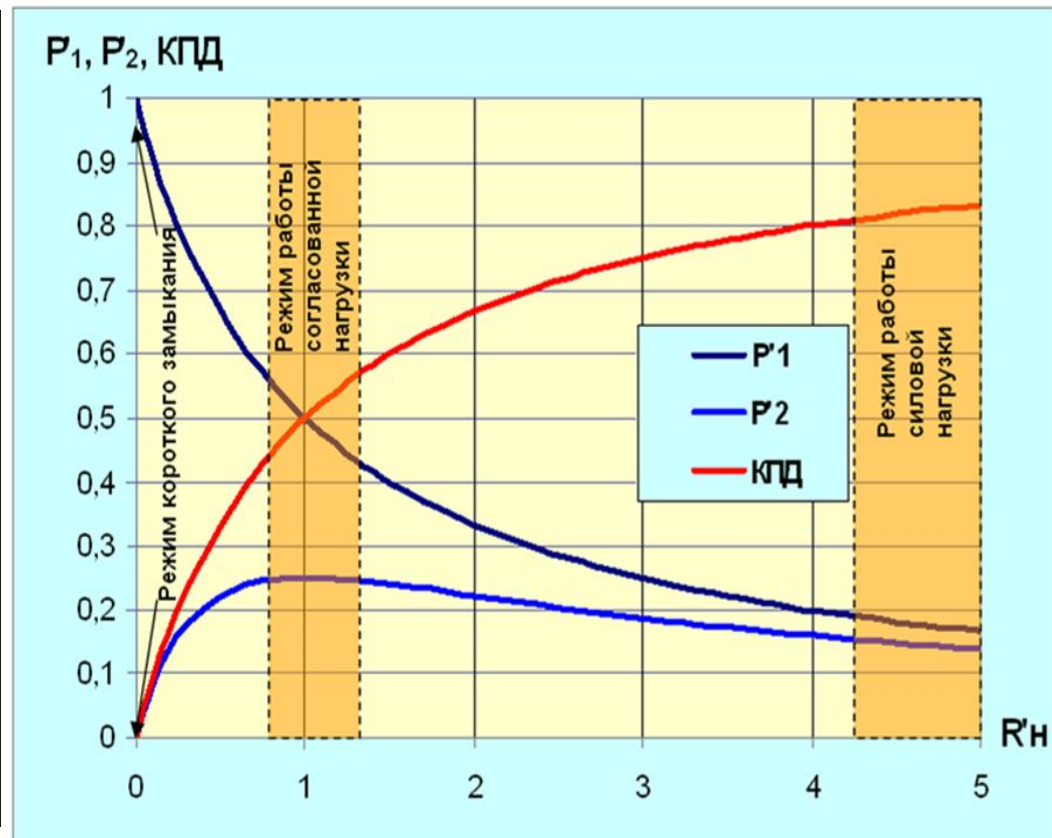
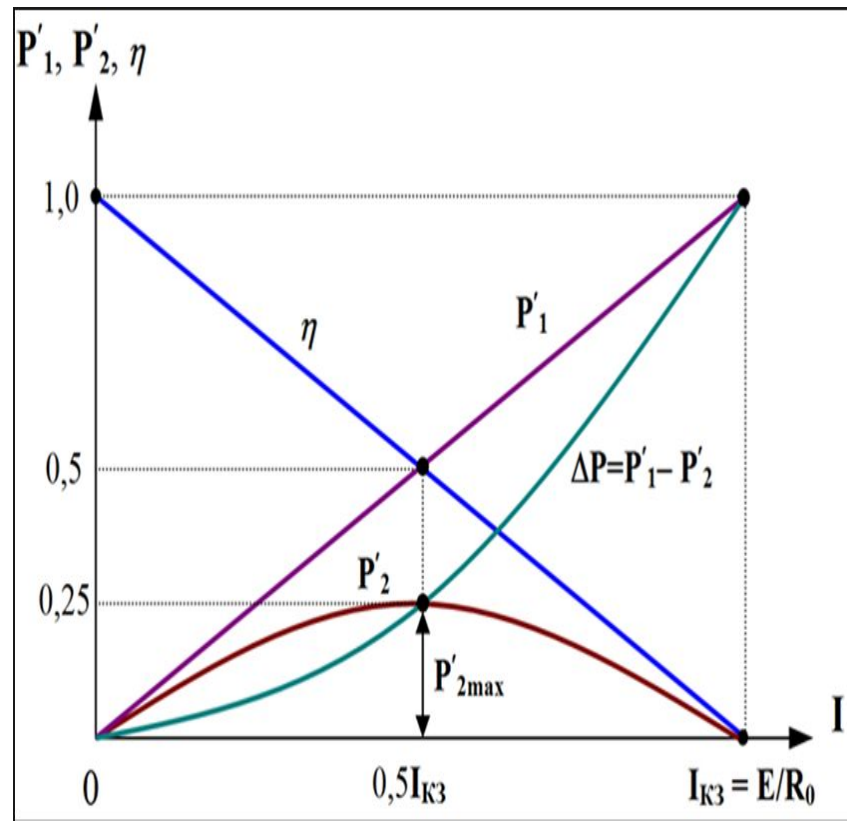


Рис. 9. Зависимости относительных мощностей источника P'_1 , приемника P'_2 и КПД электрической системы η от относительного сопротивления нагрузки R'_H



Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Режим согласованной нагрузки

Видно, что с увеличением относительного сопротивления нагрузки R'_H

мощность P'_1 , выделяемая в источнике питания цепи, падает от максимальной при коротком замыкании ($R'_H = 0$), становясь в два раза больше мощности P'_2 , выделяемой в нагрузке в согласованном режиме.

В режиме работы **силовой нагрузки** (при больших значениях **КПД** η) мощность источника P'_1 не намного больше мощности нагрузки P'_2 . Из этого графика также видно, что в режиме согласованной нагрузки

(при $R'_H = 1$) **КПД** цепи действительно равен **0,5**, а при увеличении относительного сопротивления нагрузки свыше **4** (в режиме работы силовой нагрузки) **КПД** цепи превышает **0,8**.

Электрические цепи постоянного тока



Вольт-амперные характеристики

Вольт-амперная характеристика линейного резистора

Вольт-амперными характеристиками (ВАХ) элементов и участков электрических цепей называются зависимости их напряжений от величины проходящего тока $U = f(I)$.

Вольт-амперные характеристики пассивных элементов проходят через начало координат, так как в отсутствии напряжения на элементах ток в них также отсутствует. ВАХ линейного резистивного элемента, определяется формулой: $U = I \cdot R$.

При этом активное сопротивление R принимается неизменным и не зависящим от приложенного напряжения U и проходящего тока I .

Линейное активное сопротивление определяется из закона Ома:

$$R = \frac{U}{I} = \operatorname{tg}\varphi = \text{const.}$$

Меньшему углу наклона ВАХ соответствует резистор с меньшей величиной активного сопротивления R и наоборот (см. рис. 10).

Электрические цепи постоянного тока



Вольт-амперные характеристики

Вольт-амперная характеристика линейного резистора

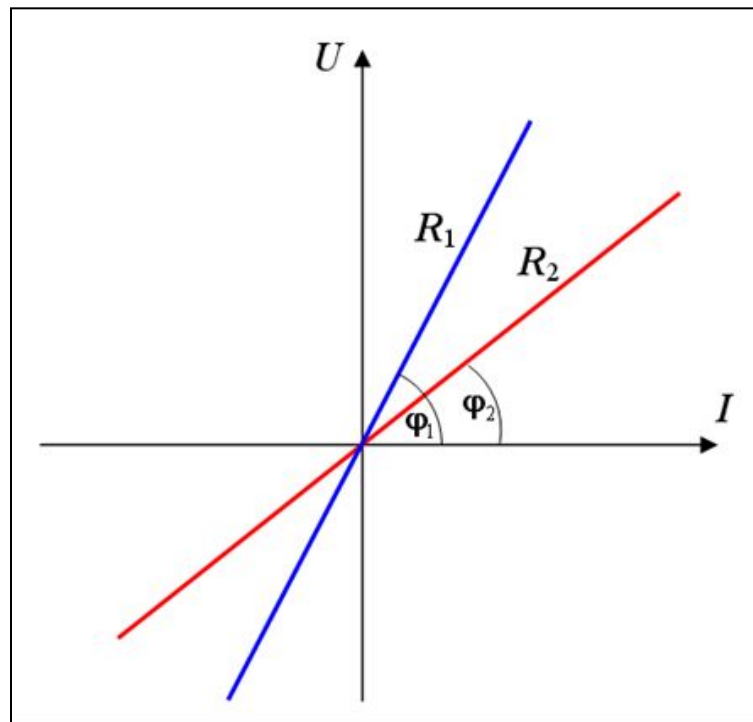


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики линейных резисторов ($R_1 > R_2$)

Электрические цепи постоянного тока



Вольт-амперные характеристики

Вольт-амперная характеристика источника ЭДС

(внешняя характеристика)

ВАХ источника ЭДС E с внутренним сопротивлением R_0 , называется *внешней характеристикой*. Внешняя характеристика определяется как зависимость напряжения U_1 на зажимах источника ЭДС от величины протекающего тока I , исходя из второго закона Кирхгофа:

$$U_1 = E - U_0 = E - IR_0.$$

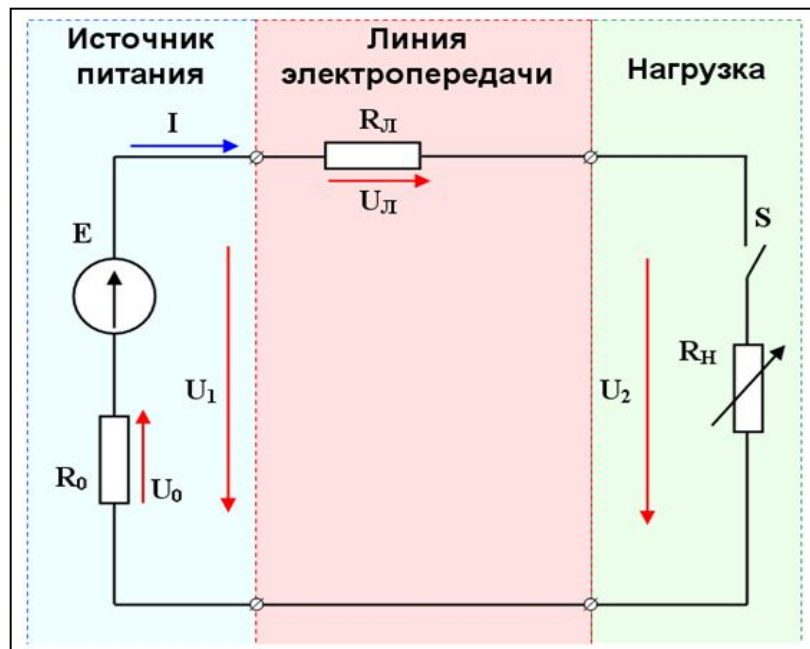
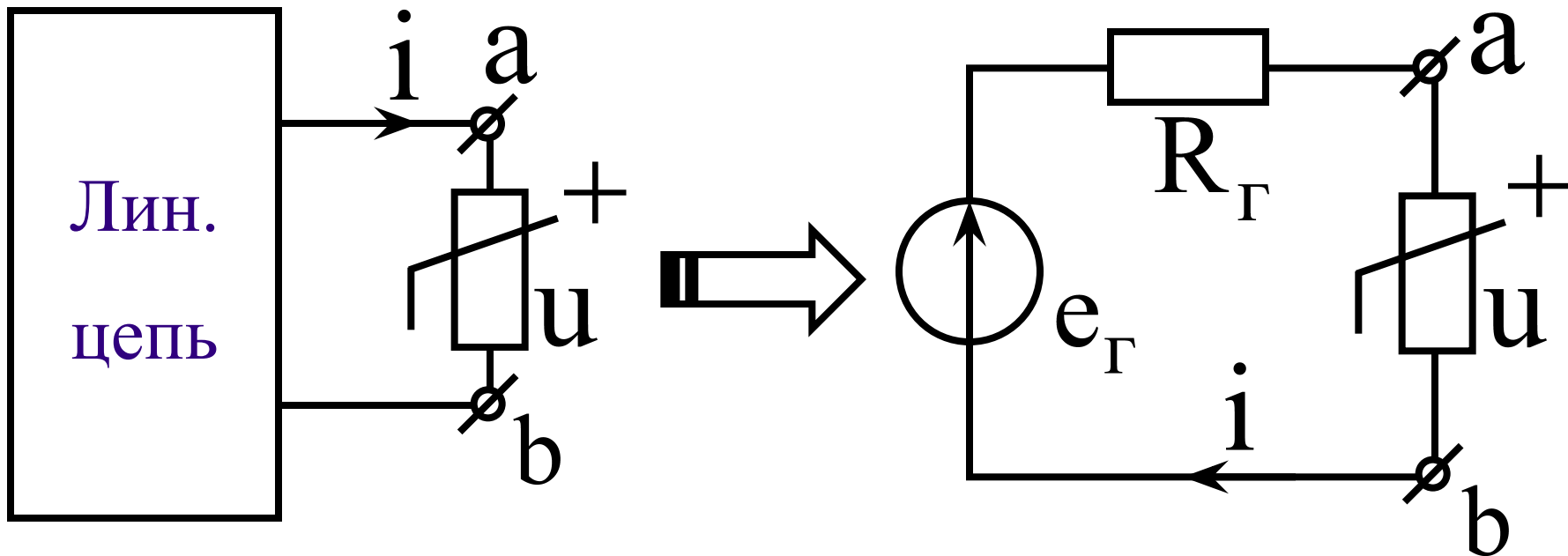
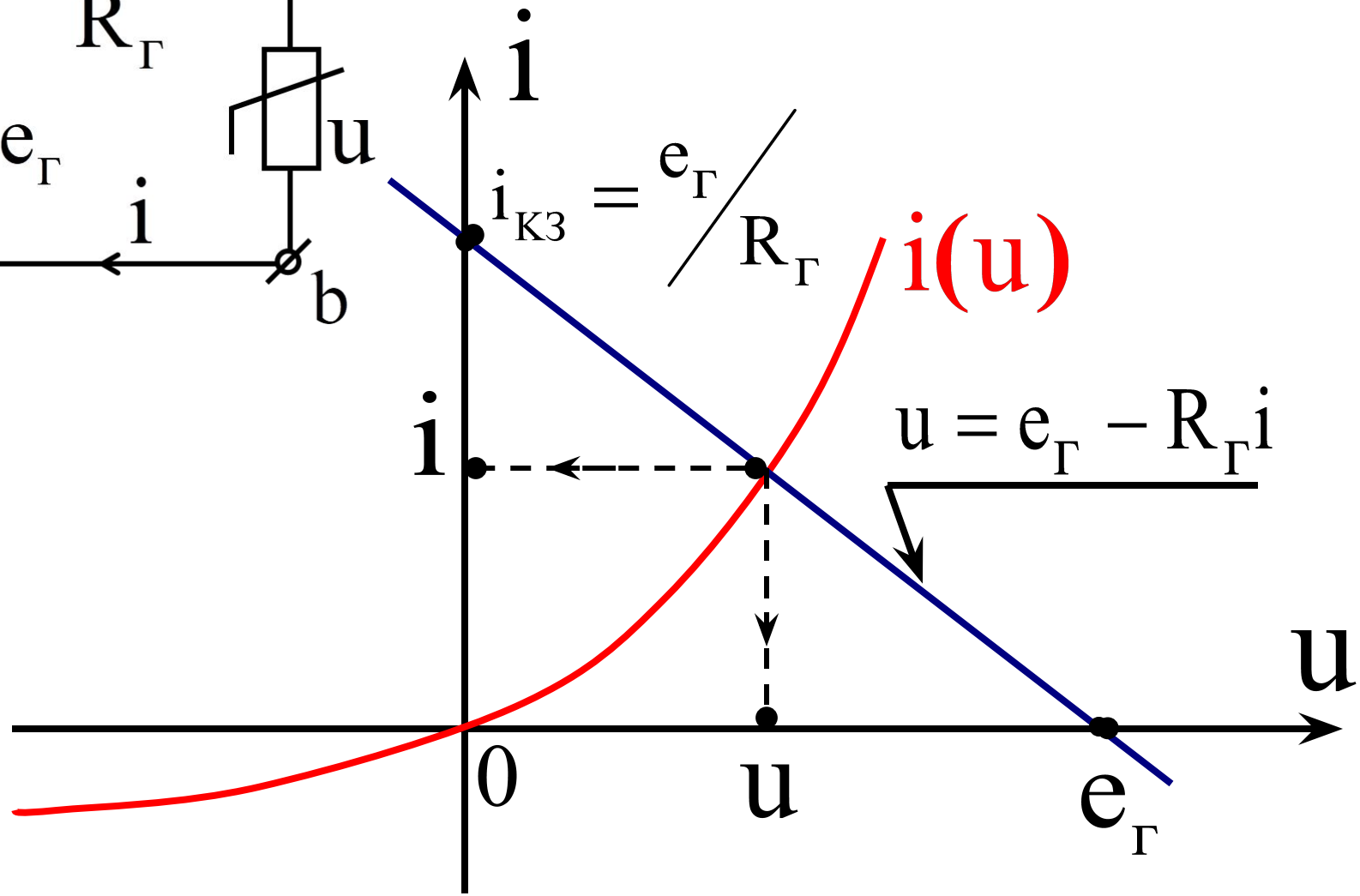
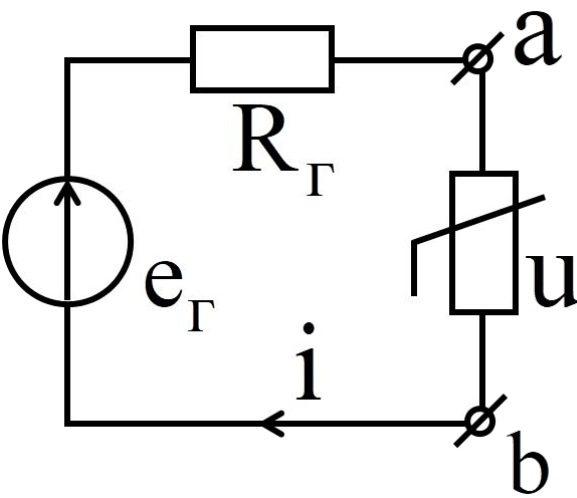


Рис. 11. Схема замещения электрической цепи постоянного тока, состоящей из источника ЭДС и активной нагрузки, соединенных двухпроводной линией электропередачи

Метод эквивалентного
генератора – применяется для
цепей с одним НРЭ:





Электрические цепи постоянного тока



Вольт-амперные характеристики

Внешняя характеристика

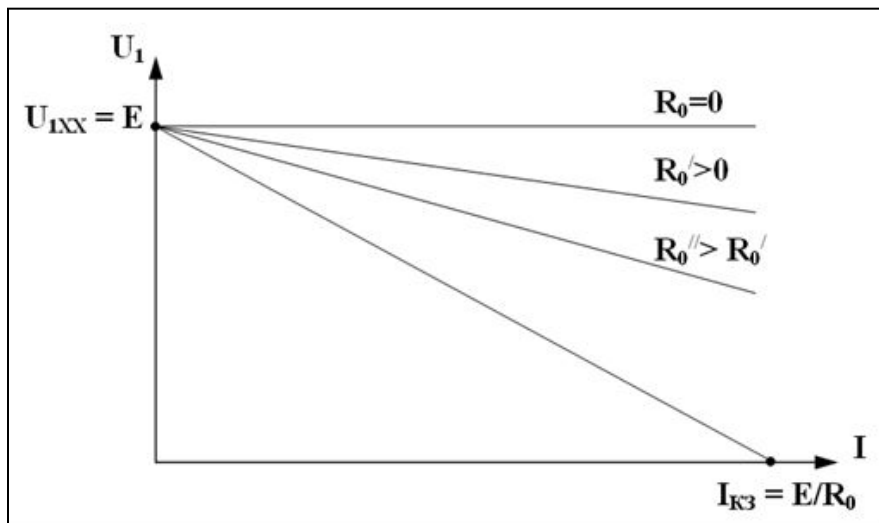


Рис. 12. Внешние характеристики источников ЭДС E с разными внутренними сопротивлениями R_0 .

Видно, что чем меньше внутреннее сопротивление R_0 , тем меньше меняется напряжение питания на зажимах источника от величины тока питания I .

Для идеального источника ЭДС с нулевым внутренним сопротивлением его напряжение равно ЭДС при любом токе в цепи. Для реальных источников ЭДС (с ненулевым внутренним сопротивлением) напряжение на его зажимах U_{1XX} равно величине ЭДС E только в разомкнутой цепи (режим холостого хода). Максимальный ток, вырабатываемый источником ЭДС определяется из режима короткого замыкания, при котором $I_{кз} = E/R_0$.

Электрические цепи постоянного тока



Вольт-амперные характеристики

Вольт-амперная характеристика нелинейного элемента (нелинейная ВАХ)

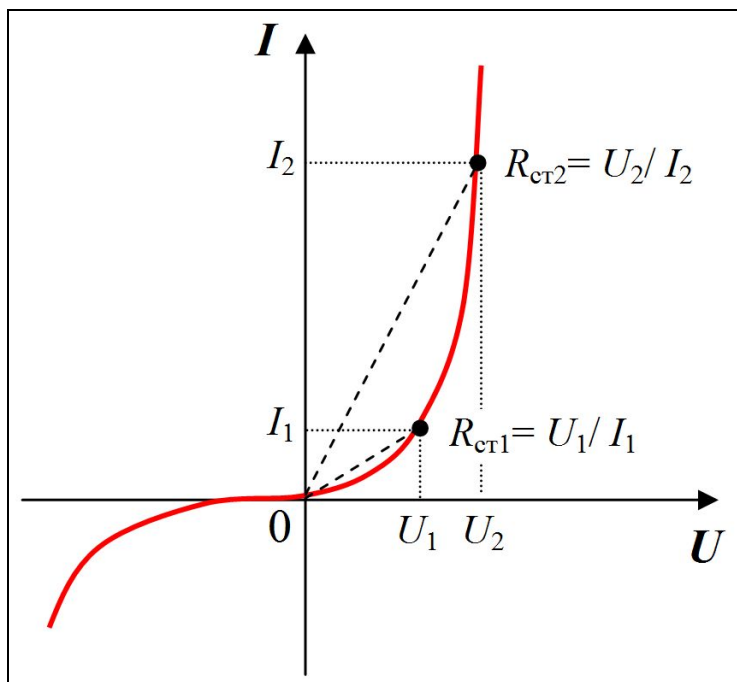


Рис. 13. Нелинейная ВАХ $I(U)$

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}} = \text{var.}$$

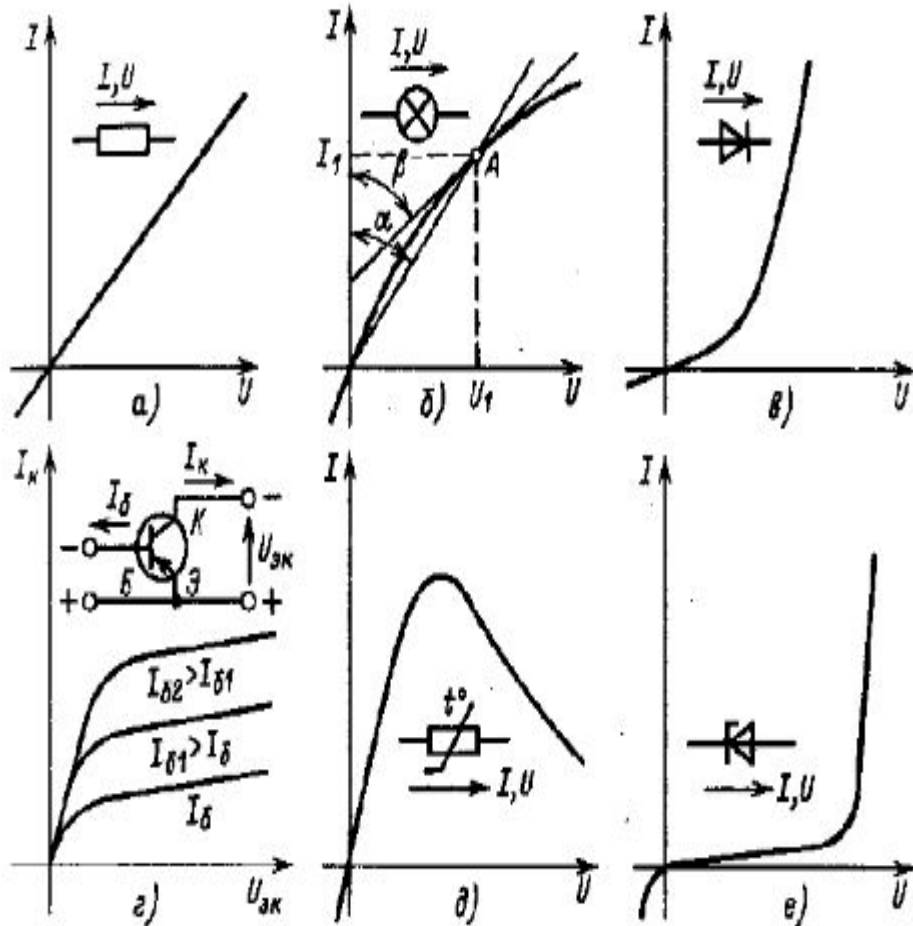
$$\mathbf{R}_{\text{ст1}} < \mathbf{R}_{\text{ст2}} \cdot$$

Расчет электрических цепей с нелинейными элементами проводится графоаналитическим методом [1].

Примеры нелинейных сопротивлений (элементов):

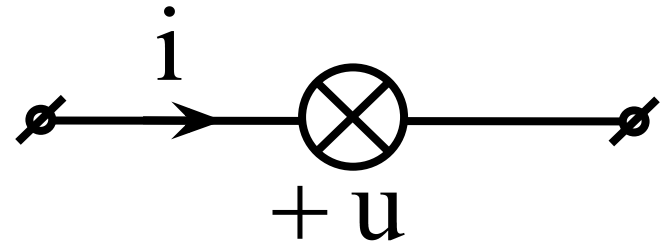
- лампа накаливания $\mathbf{R}_{\text{нагр}} > \mathbf{R}_{\text{хол}}$;
- полупроводниковые приборы: диод, тиристор, транзистор и др.

Примеры ВАХ

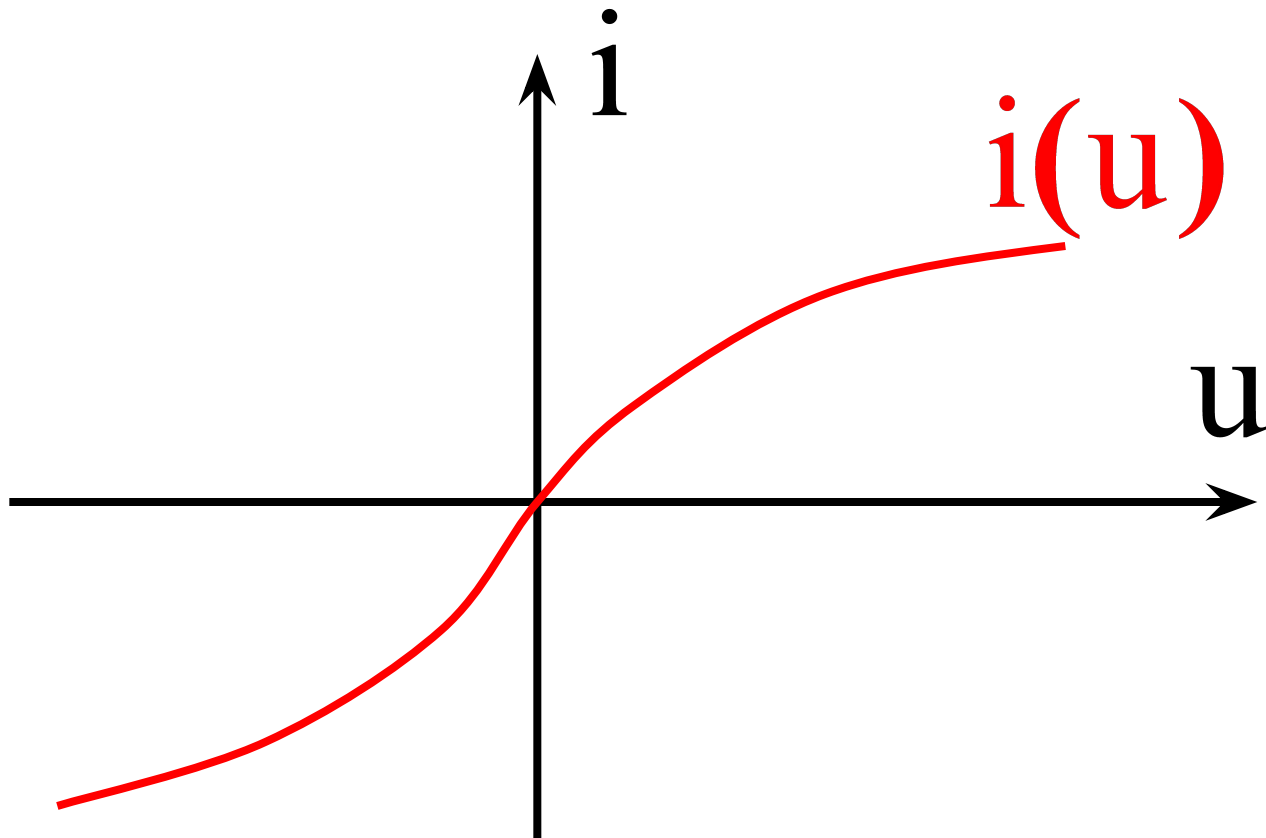


- ВАХ – важнейшая характеристика нелинейного элемента, представляет собой зависимость между током через элемент и напряжением на его выводах

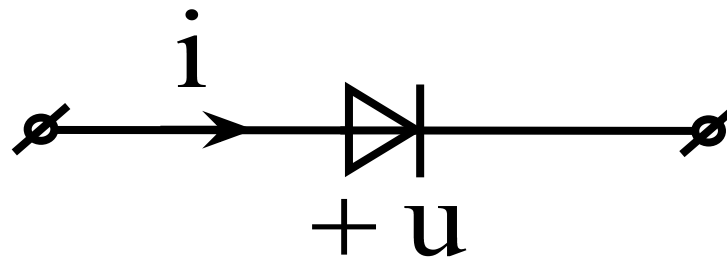
1. Лампа накаливания:



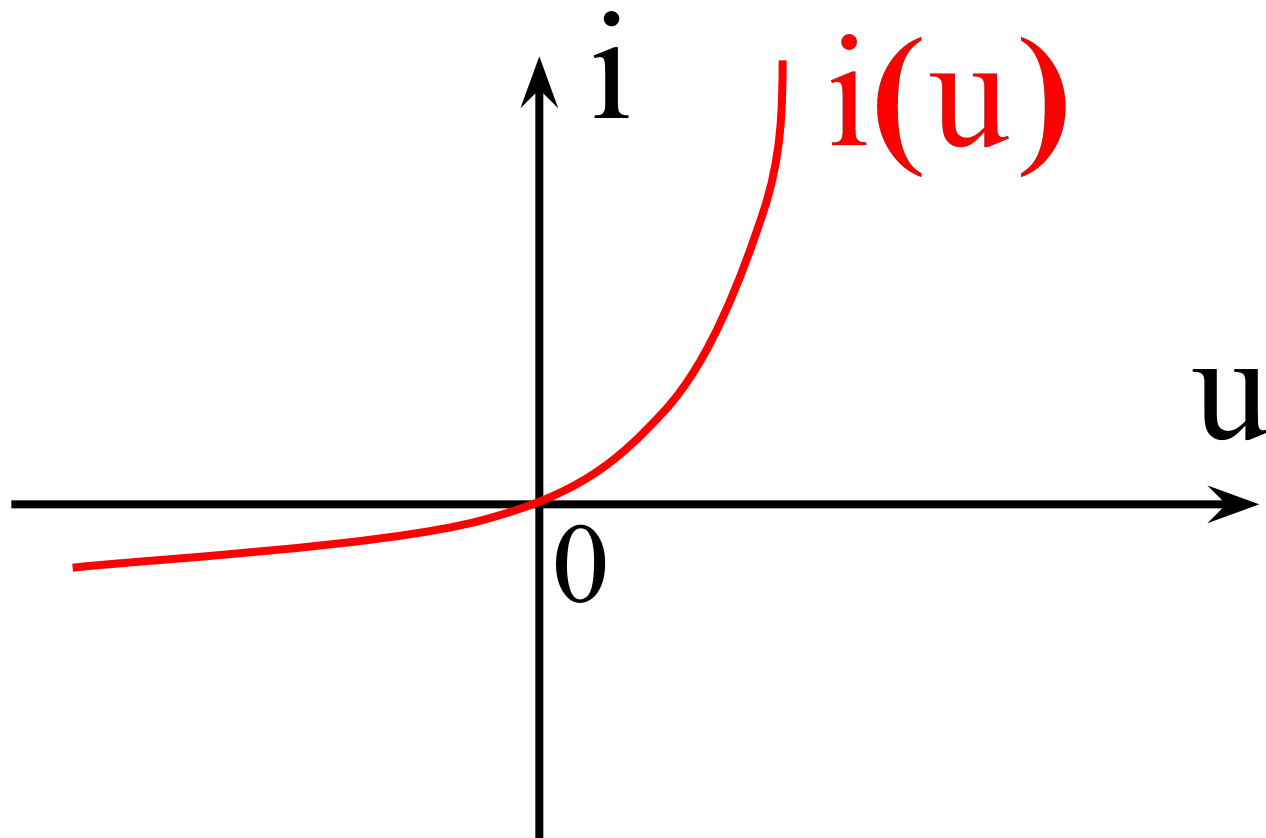
Симметричная ВАХ



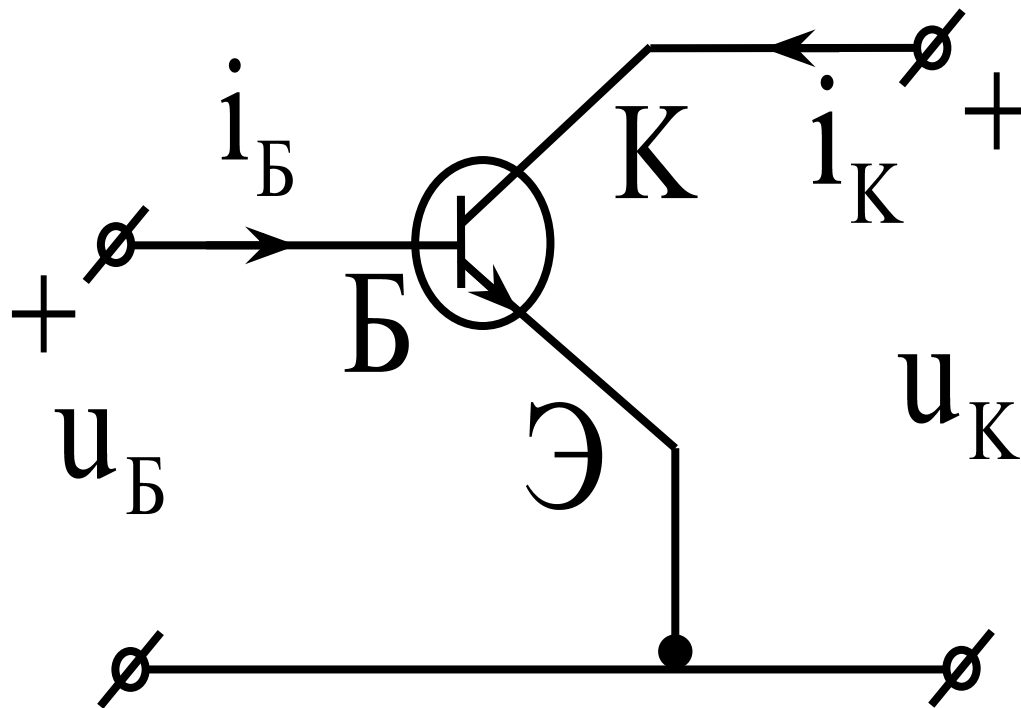
2. Полупроводниковый диод:



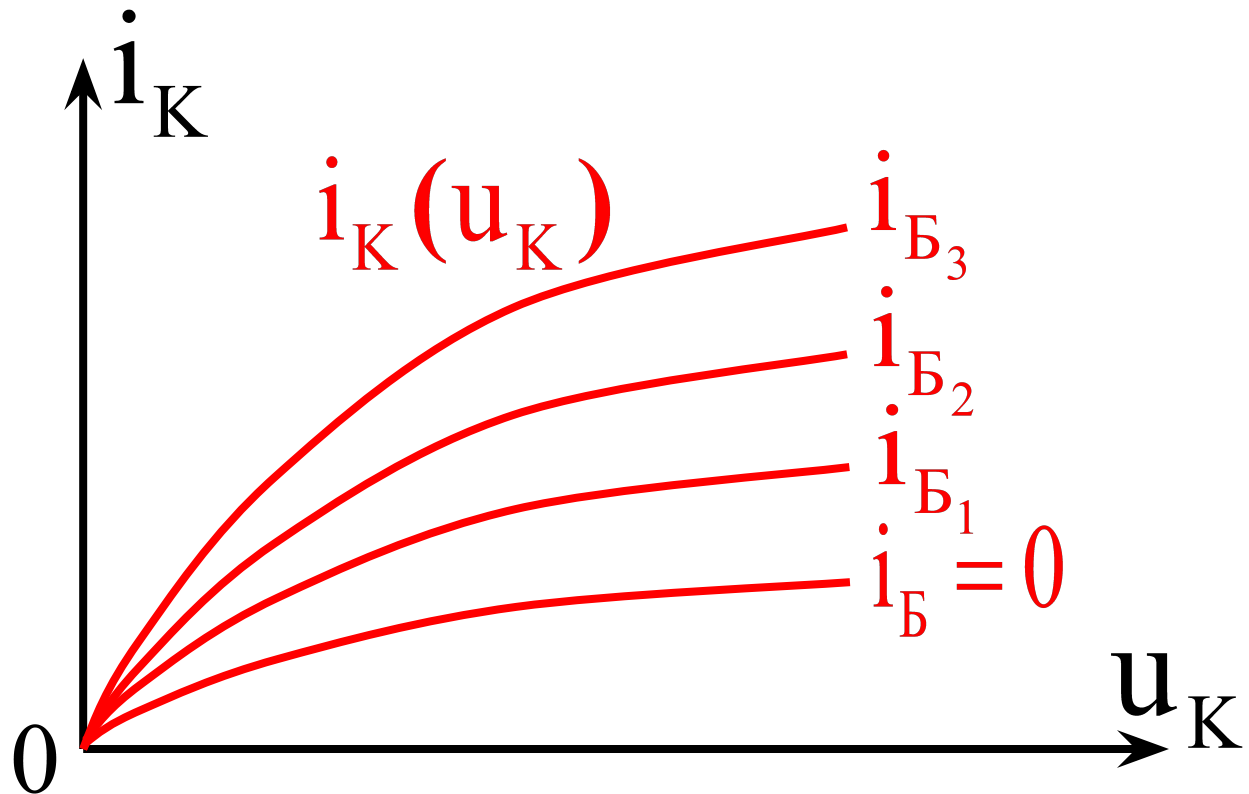
Несимметричная ВАХ



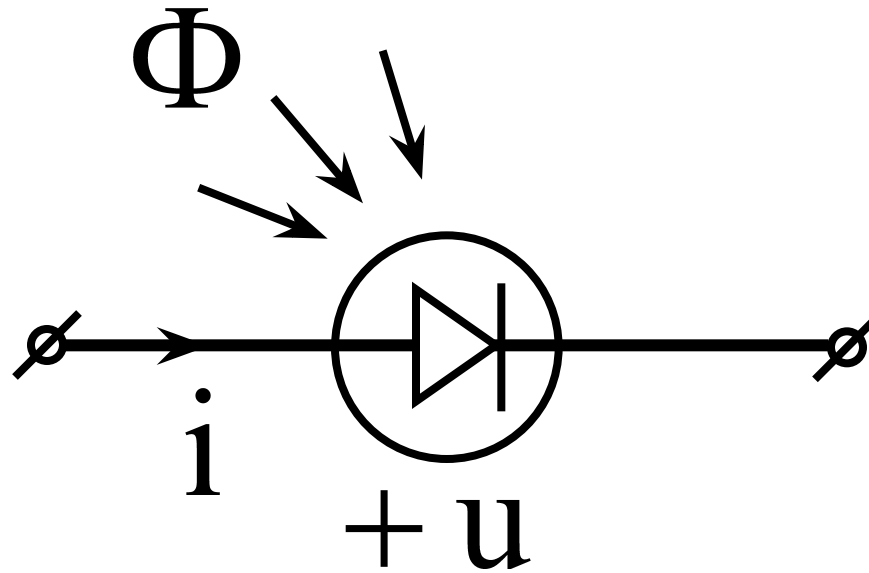
3. Биполярный транзистор:



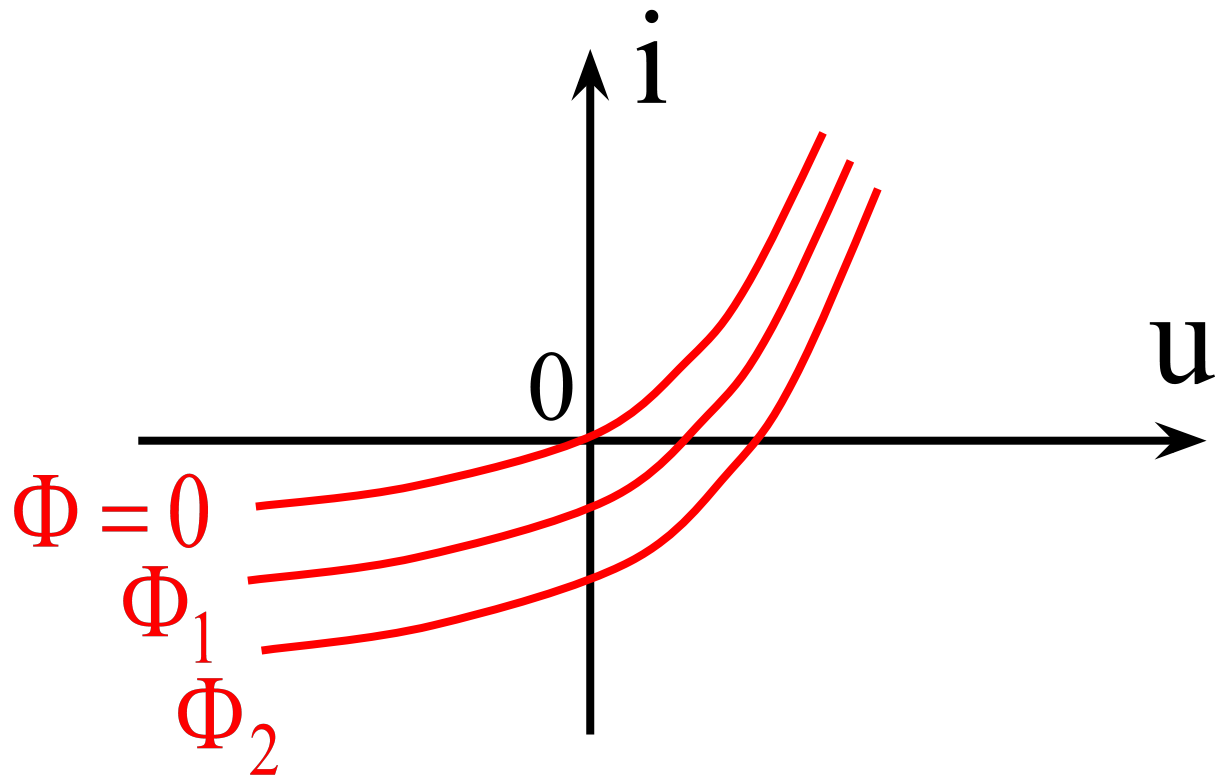
Семейство ВАХ



4. Фотодиод (активный НРЭ):

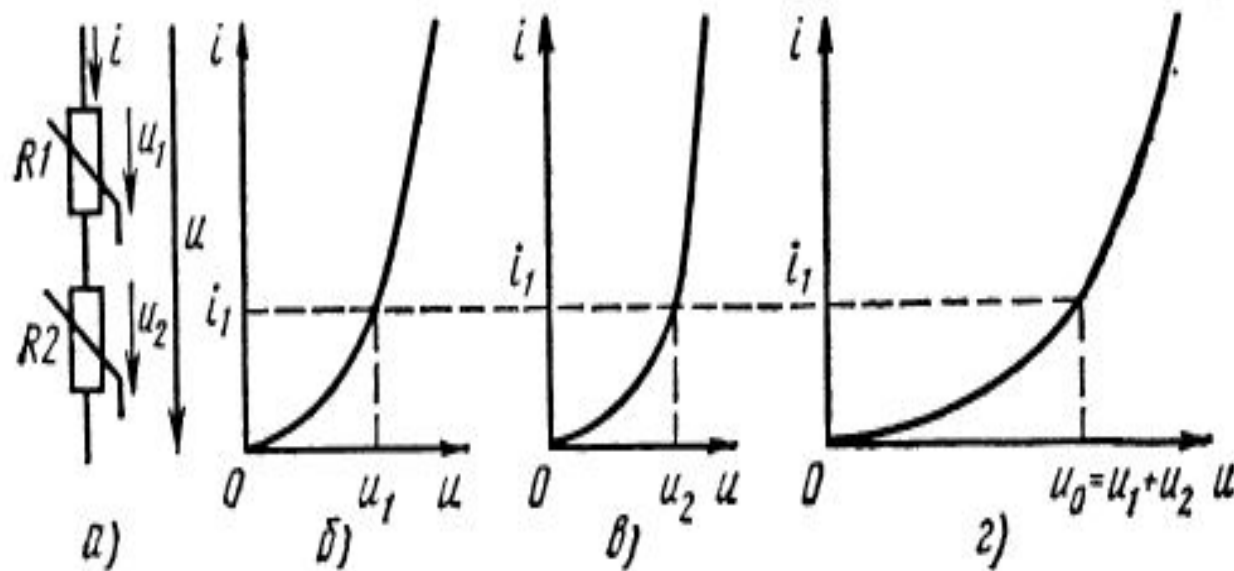


Семейство ВАХ



Замена нескольких НЭ в цепи одним

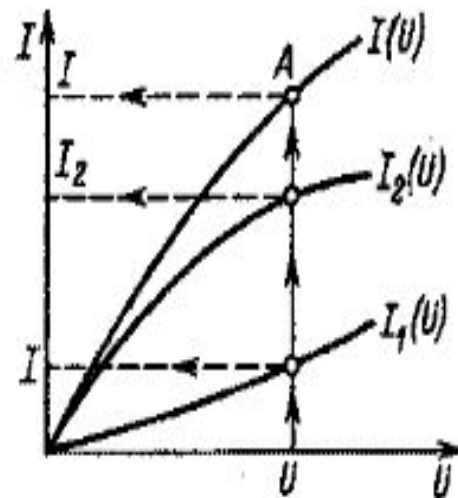
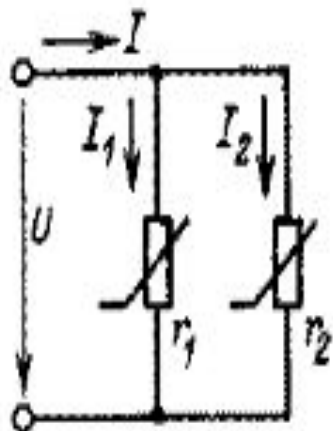
- Вычисления эквивалентной ВАХ путем сложения эквивалентных ВАХ НЭ



При **последовательном соединении НЭ** складываются напряжения U_1 и U_2 при определенном значении тока I_1 . Графики располагают рядом друг с другом. Определяется значение суммарного напряжения U_0 и строят итоговую ВАХ (рисунок г).

Параллельное соединение НЭ

- Вычисления эквивалентной ВАХ путем сложения эквивалентных ВАХ НЭ



При **параллельном соединении НЭ** необходимо складывать токи, поэтому ВАХ элементов рекомендуется располагать один над другим.

Задавшись несколькими значениями напряжения U , по ВАХ $I(U_1)$ и $I(U_2)$ НЭ, находят соответствующие токи I_1 и I_2 , после чего определяется суммарный ток I и строят ВАХ $I(U)$.