

**«Общая  
электротехника и  
электроснабжение,**

**Авторы: Гордеев Юрий Александрович, Бургвиц Михаил  
Александрович, канд. техн. наук,  
транспорт»**  
доцент

Кафедра: «Электротехники и  
электропривода»  
**Введение. Электрические  
цепи переменного тока**

# 1.1 Общие сведения

- Электротехника – наука о практическом применении электрической энергии.
- Развитие любой отрасли промышленности во многом зависит от уровня электрификации технологических процессов, поэтому инженеры различных специальностей должны иметь понятие об основных процессах в электротехнических устройствах и знать их характеристики, квалифицированно применять на производстве электрические устройства и электротехнологии.

- Для работы любого электротехнического устройства необходимо, чтобы через него проходил электрический ток, обязательным условием существования которого является наличие замкнутого контура – электрической цепи и электродвижущей силы, обеспечивающей непрерывное протекание электрического тока.
- Основными элементами электрической цепи являются источники и приемники электрической энергии. Кроме этих элементов, электрическая цепь содержит измерительные приборы, коммутационную аппаратуру, соединительные линии, провода, полупроводниковые приборы, электрические двигатели, трансформаторы, электронные устройства различного назначения, датчики неэлектрических и электрических величин и т.д.

- В источниках электрической энергии различные виды энергии преобразуются в электрическую. Так, в генераторах электростанций в электрическую энергию преобразуется энергия механическая, в гальванических элементах и аккумуляторах – химическая, в солнечных батареях – световая и т.д.
- В приемниках электрическая энергия источников преобразуется в тепловую (нагревательные элементы), световую (электрические лампы), химическую (электролизные ванны) и т.д.
- Для теоретического анализа какой-либо электрической цепи ее изображают схемой – графическим изображением с помощью условных обозначений.
- Элементы электрической цепи по характеру физических процессов, протекающих в них, делятся на три основных вида: резистивные; индуктивные; емкостные.

# 1.2 Резистивные элементы

- В резистивных элементах (резисторах) электрическая энергия *необратимо* преобразуется в другие виды энергии. Примеры резистивных элементов: лампы накаливания (электрическая энергия необратимо преобразуется в световую и тепловую энергии), нагревательные элементы (электрическая энергия необратимо преобразуется в тепловую), электродвигатели (электрическая энергия необратимо преобразуется в механическую и тепловую энергии) и др.
- Основной характеристикой резистивного элемента является его вольт-амперная характеристика (ВАХ).

$$U=f(I), \quad (1.1)$$

где  $U$  – напряжение, В;

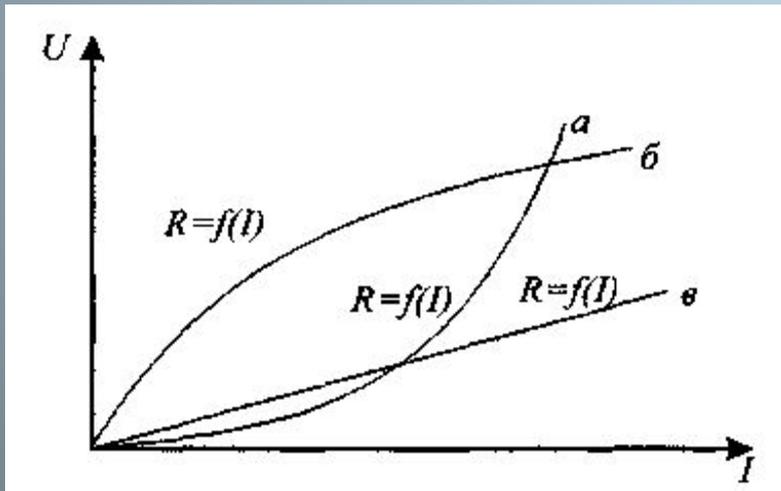
$I$  – сила тока, А.

- Если эта зависимость линейная, то резистивный элемент называется линейным и выражение (1.1) имеет вид, известный как закон Ома:

$$U=RI, \quad (1.2)$$

где  $R$  – сопротивление резистора, Ом.

- Однако во многих случаях ВАХ резисторов является нелинейной. Для многих резисторов (нагревательные спирали, реостаты и др.) нелинейность ВАХ объясняется тем, что эти элементы – металлические проводники и электрический ток в них есть ток проводимости (направленное движение – «дрейф» свободных электронов).
- Дрейфу электронов препятствуют (оказывают сопротивление) колеблющиеся атомы, амплитуда колебаний которых определяется температурой проводника (температура – мера кинетической энергии атомов).
- При протекании тока свободные электроны сталкиваются с атомами и еще более раскачивают их. Следовательно, температура проводника возрастает, отчего увеличивается и его сопротивление  $R$ . Таким образом, сопротивление  $R$  зависит от тока  $R = f(I)$  и ВАХ нелинейна (рис. 1.1).



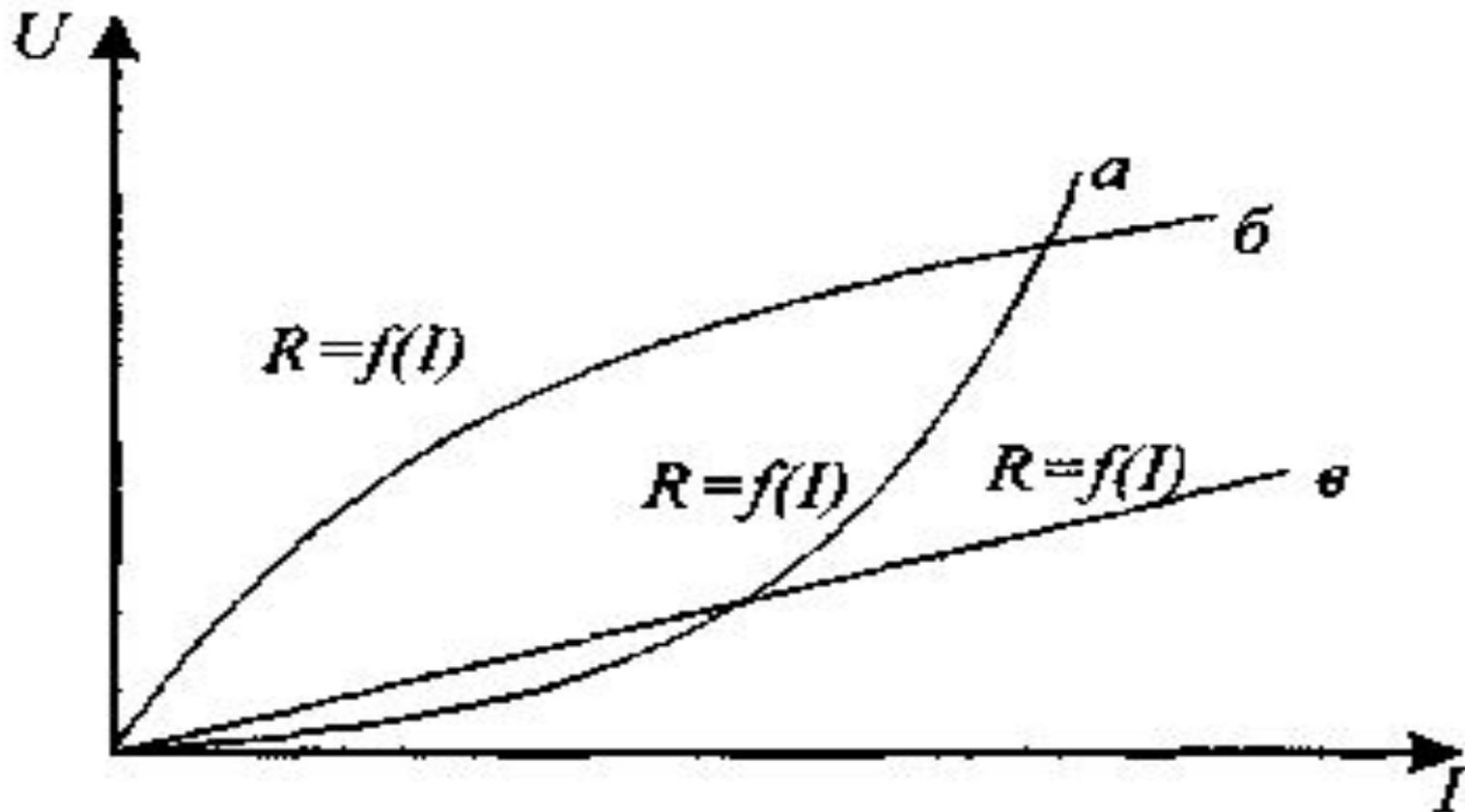


Рис. 1.1. Общий вид ВАХ металлического (а), полупроводникового (б), и константанового (в) резистивных элементов

- При изменении температуры в небольших пределах сопротивление проводника выражается формулой

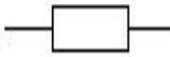
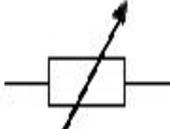
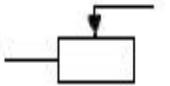
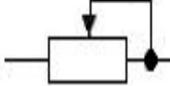
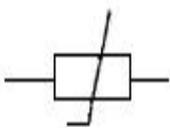
$$R=R_0[1+\alpha(T-T_0)] \quad (1.3)$$

- где  $R_0$ ,  $R$  – сопротивления проводников при температуре  $T_0$ ,  $T$ , Ом;
  - $T_0$  – начальная температура проводника, К;
  - $T$  – конечная температура проводника, К;
  - $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.
- 
- У большинства чистых металлов, что означает, что с повышением температуры сопротивление металлов увеличивается.
  - У электролитов, изделий из графита и полупроводников  $\alpha < 0$  (табл. 1.1).

**Таблица 1.1** Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления некоторых материалов

<b>Наименование материала</b>	<b>Удельное сопротивление при 20 °С, мкОм м</b>	<b>Температурный коэффициент сопротивления, 1/К</b>
Медь	0,0172–0,0182	0,0041
Алюминий	0,0295	0,0040
Сталь	0,125–0,146	0,0057
Вольфрам	0,0508	0,0048
Уголь	10–60	–0,005
Манганин (Cu–80%, Mn–12%, Ni–3%)	0,4–0,52	$3 \cdot 10^{-5}$
Константан	0,44	$5 \cdot 10^{-5}$
Нихром (Cr–20%, Ni–80%)	1,02–1,12	0,0001
Полупроводники (Si, Ge)	1,0–14	-(0,2-0,8)

В таблице 1.2 приведены условные графические обозначения резистивных элементов.

Наименование	Обозначение
Резистор постоянный (линейная ВАХ)	
Резистор переменный: общее обозначение	
с разрывом цепи	
без разрыва цепи	
Резистор нелинейный (нелинейная ВАХ)	

- Для характеристики проводящих свойств различных материалов существует понятие *объемного удельного электрического сопротивления*. Объемное удельное электрическое сопротивление  $\rho$  данного материала равно сопротивлению между гранями куба с ребром 1 м в соответствии с формулой

- $\rho = \frac{R \cdot S}{l}$  (1.4)

где  $S$  – площадь поперечного сечения проводника,  $\text{м}^2$ ;

$l$  – длина проводника, м.

## 1.3 Индуктивный и емкостный элементы

- Эти элементы имеют принципиальное отличие от резистивных элементов в том, что в них не происходит необратимого преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Поэтому когда сопоставляют элементы по своему характеру, то резистивные элементы называют *активными*, а индуктивный и емкостный – *реактивными*.
- Классическим примером индуктивного элемента является катушка, намотанная на магнитопровод (сердечник). Примерами емкостного элемента являются конденсаторы плоские, цилиндрические, сферические и т.д.
- Напряжение  $u_L$  на идеальном индуктивном элементе связано с током  $i_L$  в этом элементе формулой

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.5)$$

где  $L$  – индуктивность элемента, Гн.

- Для идеального емкостного элемента ток  $i_C$  и напряжение  $u_C$  выражаются идентичной формулой

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad (1.6)$$

где  $C$  – емкость элемента, Ф.

- Из (1.5) и (1.6) следуют выводы:
- при постоянном токе ( $i_L = const$ ) напряжение  $u_L = 0$ , вследствие чего и сопротивление индуктивного элемента на постоянном токе равно нулю;
- при постоянном напряжении ( $u_C = const$ ) ток  $i_C = 0$ , вследствие чего сопротивление емкостного элемента на постоянном токе равно бесконечности.
- Таким образом, индуктивный элемент пропускает постоянный ток *без сопротивления*, а емкостный элемент *не пропускает* постоянный ток.
- Конденсаторы можно рассматривать как *идеальные емкостные элементы*. Однако катушки индуктивности часто имеют значительное резистивное сопротивление и поэтому не могут рассматриваться в качестве идеальных индуктивных элементов.

- Условное обозначение в схемах электрических цепей:

- идеального индуктивного элемента



- идеального емкостного элемента



## 1.4 Источники постоянного напряжения

- Источник постоянного напряжения (ИПН) характеризуется следующими основными параметрами:
- электродвижущей силой (ЭДС)  $E$ ;
- внутренним сопротивлением  $R_0$ ;
- напряжением  $U$  на зажимах (полюсах) источника.
- Схема ИПН с подключенным к нему приемником  $R$  изображена на рисунке 1.2,а.
- Основной характеристикой ИПН является его ВАХ (внешняя характеристика) – зависимость напряжения  $U$  на его зажимах от тока  $I$  источника (прямая 1 на рисунке 1.2, б).

$$U = E - R_0 * I \quad (1.7)$$

Уменьшение напряжения  $U$  источника при увеличении тока объясняется увеличением падения напряжения на внутреннем сопротивлении  $R_0$  источника (слагаемое в (1.7)).

Прямая 2 соответствует ВАХ идеального ИПН, у которого  $R_0 = 0$

- Анализ (1.7) позволяет сделать выводы:
- - при токе источника  $I = 0$  (холостой ход источника) напряжение источника равно его ЭДС:  $U = E|_{I=0}$ ;
- ЭДС источника – это его напряжение в режиме холостого хода;
- по известной ВАХ источника (рис. 1.2,б) можно определить его внутреннее сопротивление по формуле:

$$R_0 = \frac{E - U_1}{I_1} \quad (1.8)$$

-ЭДС источника (рис. 1.2,а) можно измерить в режиме холостого хода вольтметром рVI с относительно большим внутренним сопротивлением  $R_v$ , так как при ( $R_v \gg R_0$ ) из (1.7) имеем:

$$E = U_v + R_0 I = I R_v + R_0 I \approx U_v \quad (1.9)$$

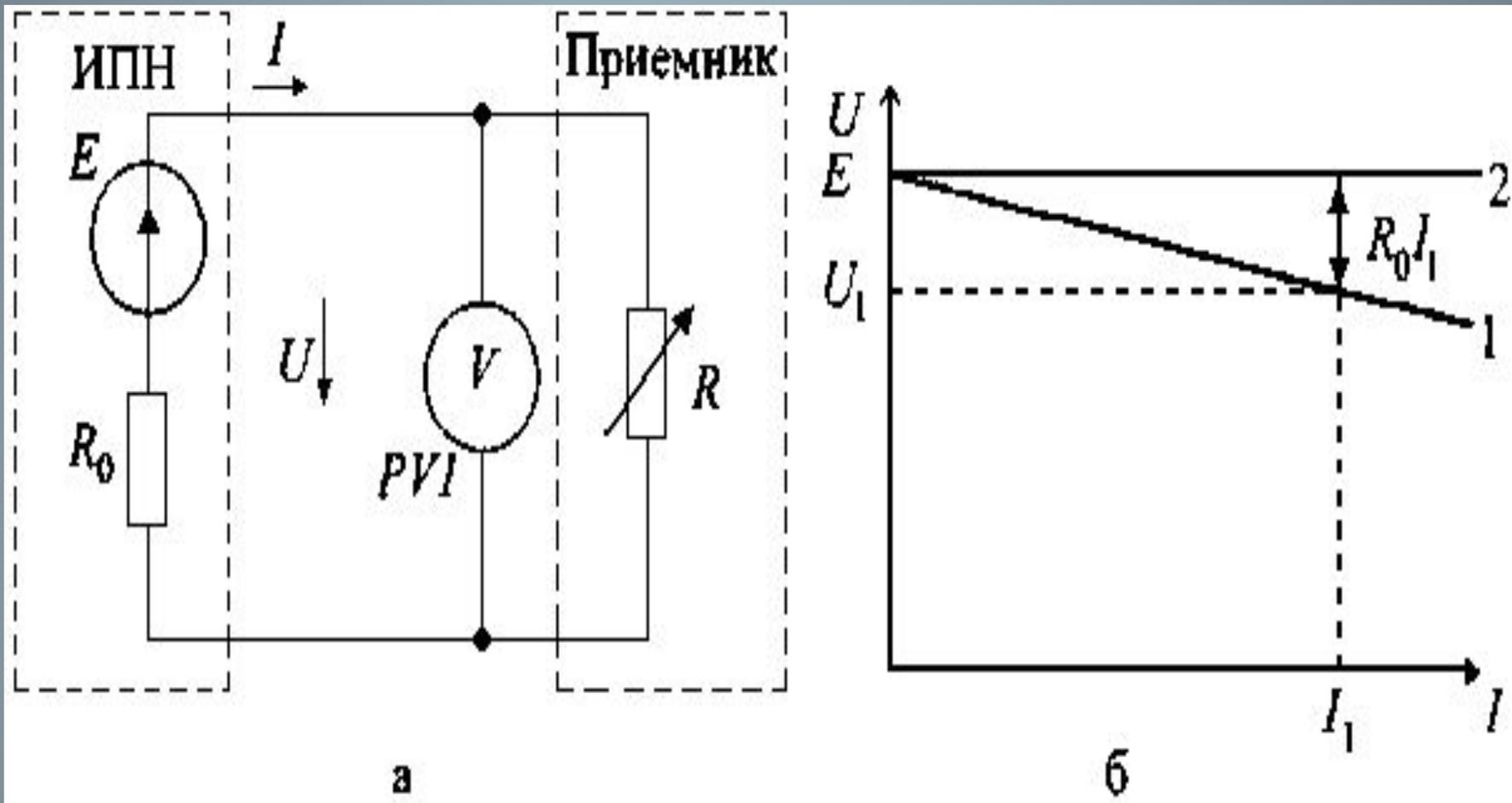


Рис. 1.2. Схема простейшей электрической цепи (а) и ВАХ ИПН (б)

## 2. ЛИНЕЙНЫЕ ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

- 2.1 Основные величины, характеризующие синусоидальный ток, напряжение и ЭДС
- Этими основными величинами являются:
- мгновенное значение;
- амплитудное значение;
- начальная фаза;
- действующее значение;
- среднее значение;
- комплекс действующего или амплитудного значения и др.

### 2.1.1 Мгновенное значение.

- Мгновенное значение величины  $a$  показывает закон ее изменения и записывается в виде:

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi) \quad (2.1)$$

где – амплитуда (максимальное значение) величины;

- $\omega$  – угловая частота, рад/с;
- $t$  – текущее значение времени, с;
- $\psi$  – начальная фаза.

- Мгновенные значения тока  $i$ , напряжения  $u$  или ЭДС  $e$  записываются в виде:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) \quad (2.2)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi) \quad (2.3)$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi) \quad (2.4)$$

Аргумент синуса  $(\omega t + \psi)$  называется *фазой*. Угол  $\psi$  равен фазе в начальный момент времени  $t = 0$  и поэтому называется *начальной фазой*.

Угловая частота  $\omega$  связана с периодом  $T$  и частотой  $f = 1/T$  формулами:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{или} \quad \omega = 2\pi f \quad (2.5)$$

- На рисунке 2.1 изображены графики синусоидальных токов одинаковой частоты, но с различными амплитудами и начальными фазами:

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \psi), \quad i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \psi)$$

По оси абсцисс отложено время  $t$  и величина  $\omega t$ , пропорциональная времени и измеряемая в радианах.

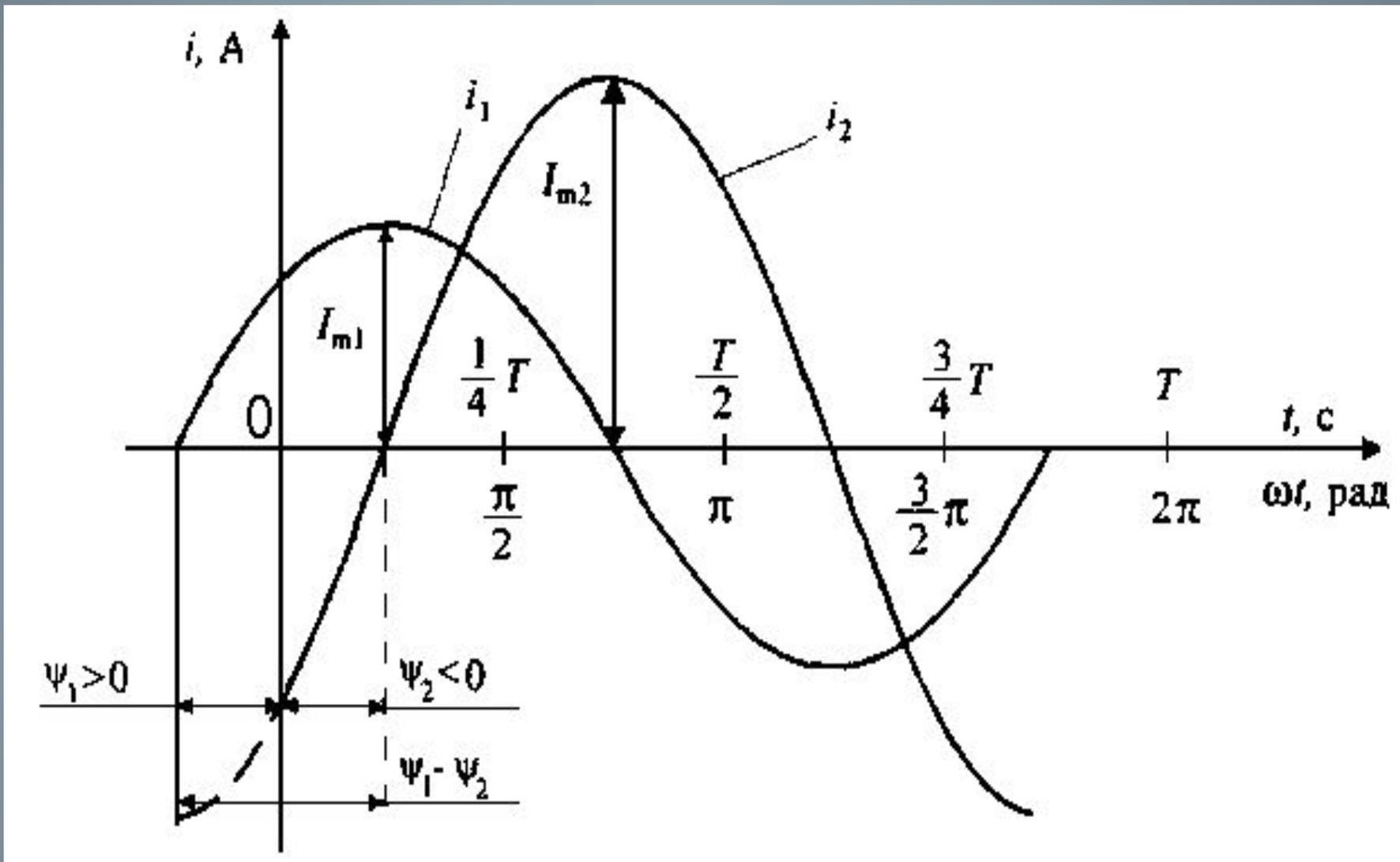


Рис. 2.1. График синусоидальных токов одинаковой частоты, но с различными амплитудами и начальными фазами

- Источники синусоидальной ЭДС (источники синусоидального напряжения) показывают на схемах с помощью условных обозначений (рис. 2.2, а, б) или только указывают напряжение между зажимами источника (рис. 2.2, в), т.к. в большинстве случаев принимают источники идеальными и ввиду равенства нулю их внутреннего сопротивления имеем  $e = u$ ,  $\dot{E} = \dot{U}$  и т.д.

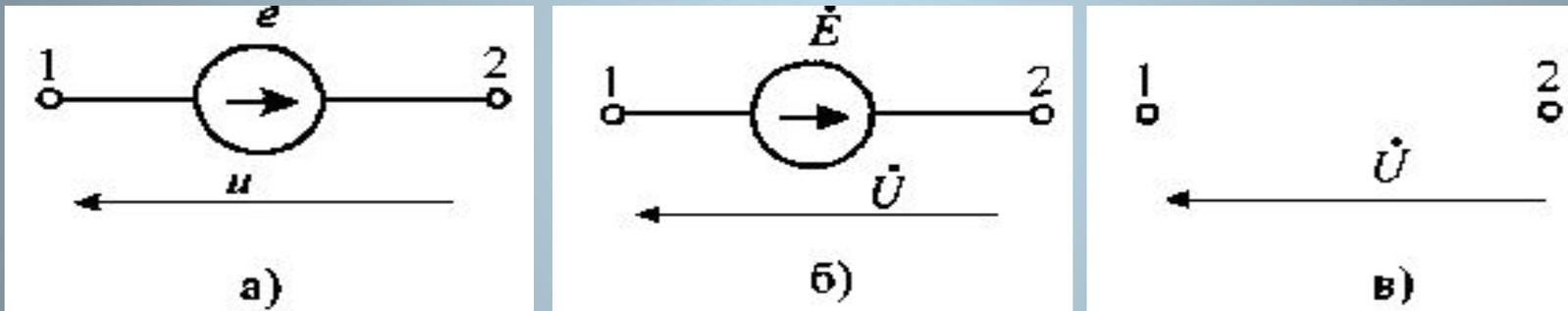


Рис. 2.2. Условные обозначения идеальных источников ЭДС

## 2.1.2 Действующее и среднее значения

- *Действующее значение синусоидального тока равно такому значению постоянного тока, который за один период выделяет в том же резисторе такое же количество тепла, как и синусоидальный ток.*

## 2.2 Элементы электрических цепей синусоидального тока

- Основные элементы электрических цепей синусоидального тока:
- источники электрической энергии (источники ЭДС и источники тока); резистивные элементы (резисторы, реостаты, нагревательные элементы и т. д.);
- емкостные элементы (конденсаторы);
- индуктивные элементы (катушки индуктивности).

# 2.2.1 Резистивный элемент (РЭ)

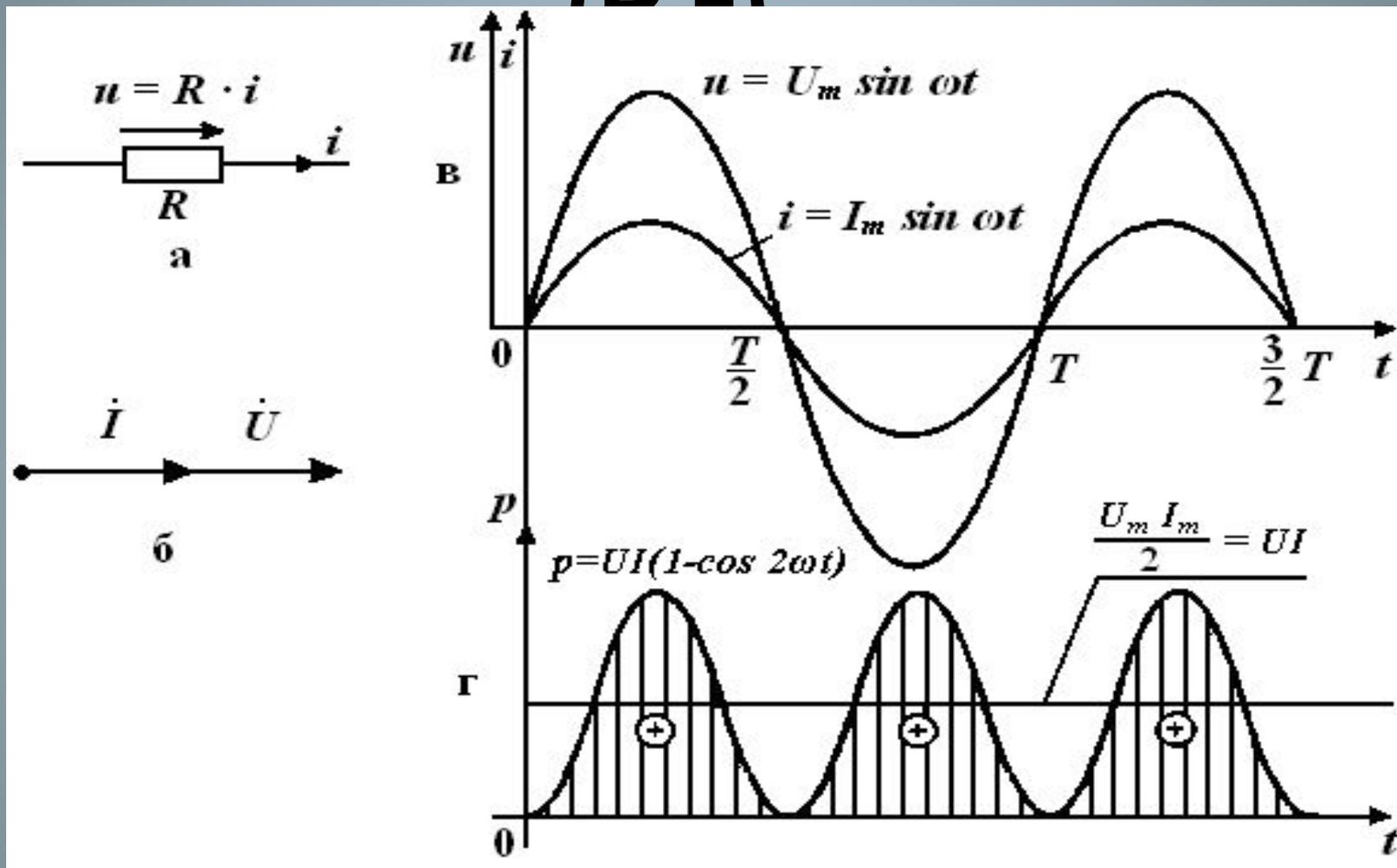


Рис. 2.4. Резистивный элемент: а) изображение на схеме; б) векторы тока и напряжения; в) графики тока и напряжения; г) график мгновенной мощности

# 2.2.2 Индуктивный элемент.

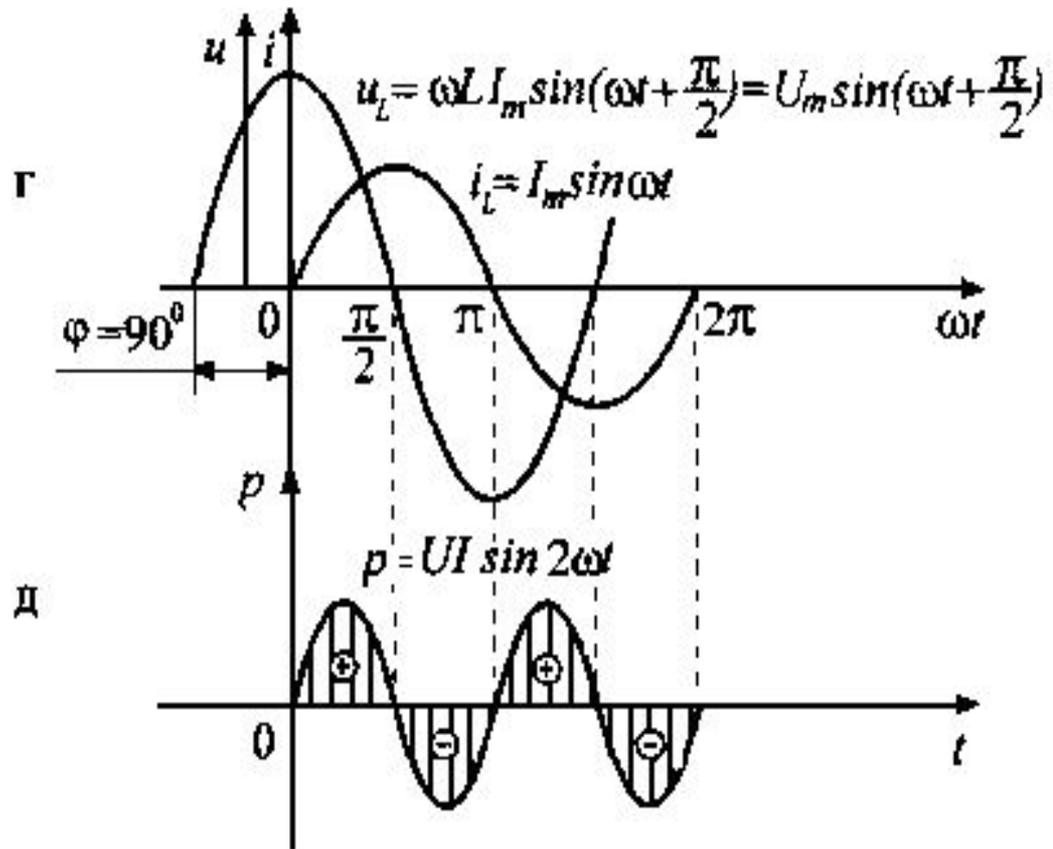
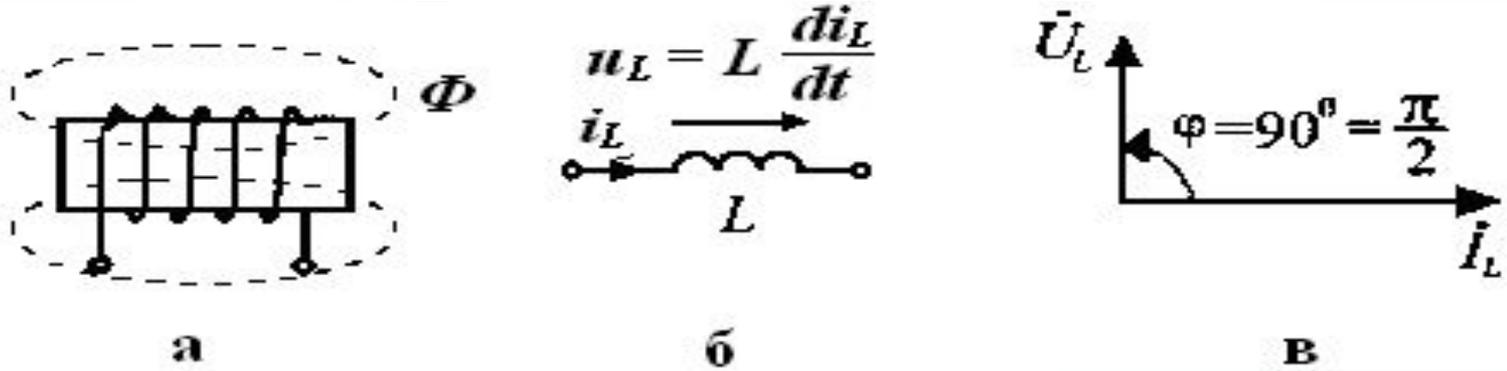


Рис. 2.5. Индуктивный элемент: а) схема конструкции катушки индуктивности; б) изображение ИЭ на схеме; в) векторы тока и напряжения; г) графики тока и напряжения; д) график мгновенной мощности

## 2.2.3 Емкостный элемент.

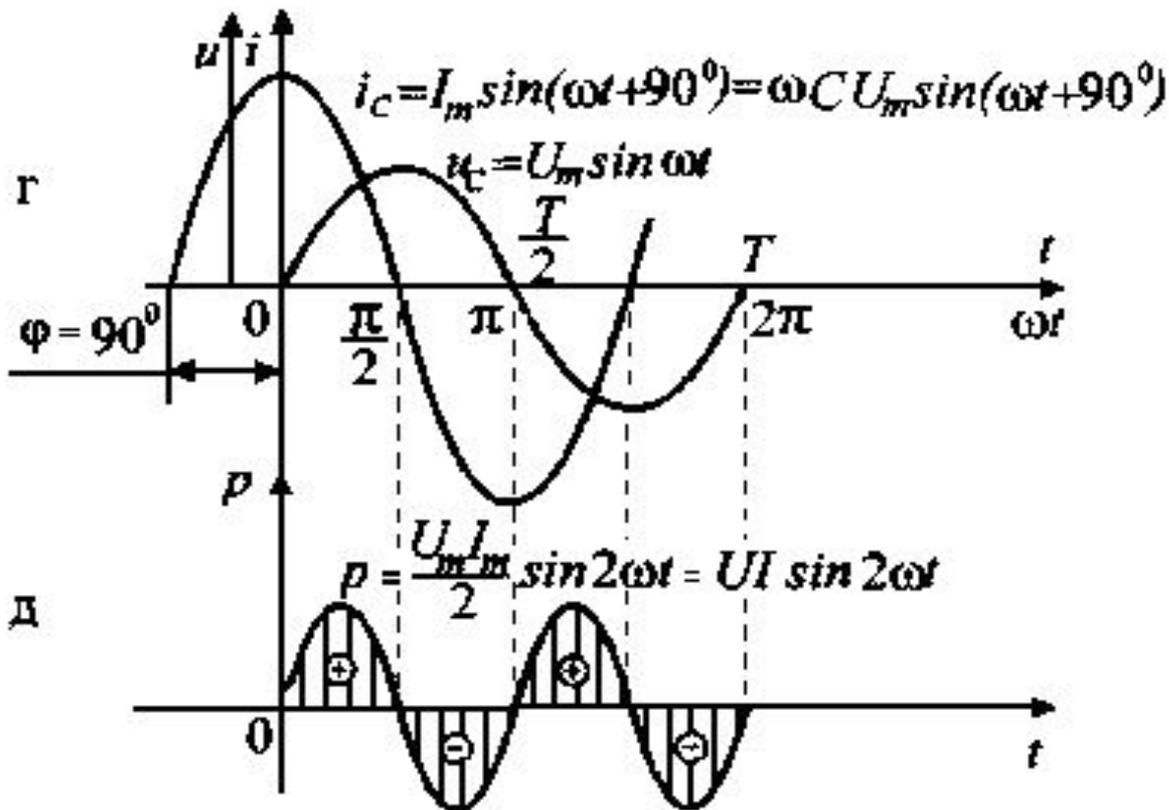
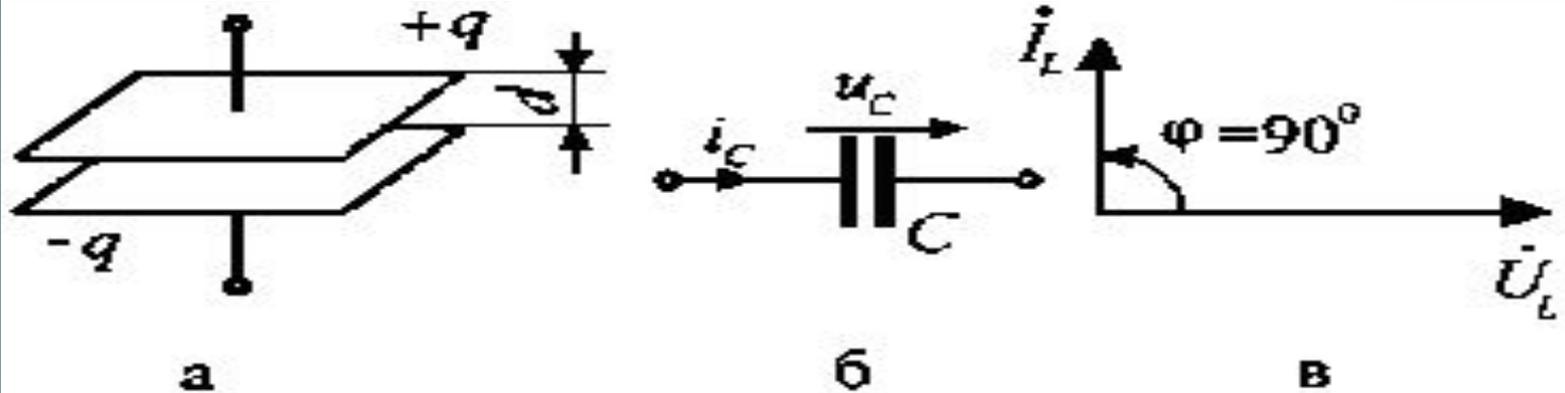


Рис. 2.6. Емкостный элемент: а) схема конструкции плоского конденсатора; б) изображение емкостного элемента на схеме; в) векторы тока и напряжения на емкостном элементе; г) графики мгновенных значений тока и напряжения; д) график мгновенной мощности

## 2.3 Расчет неразветвленной электрической цепи синусоидального тока

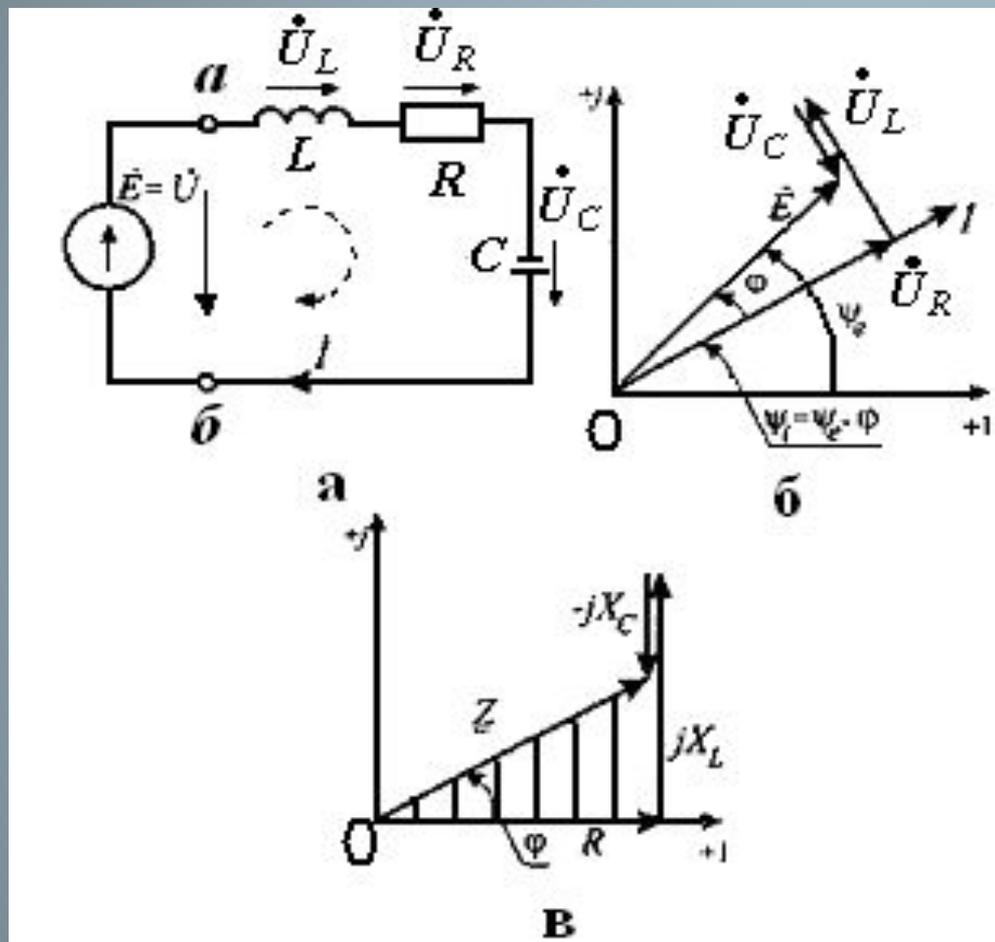


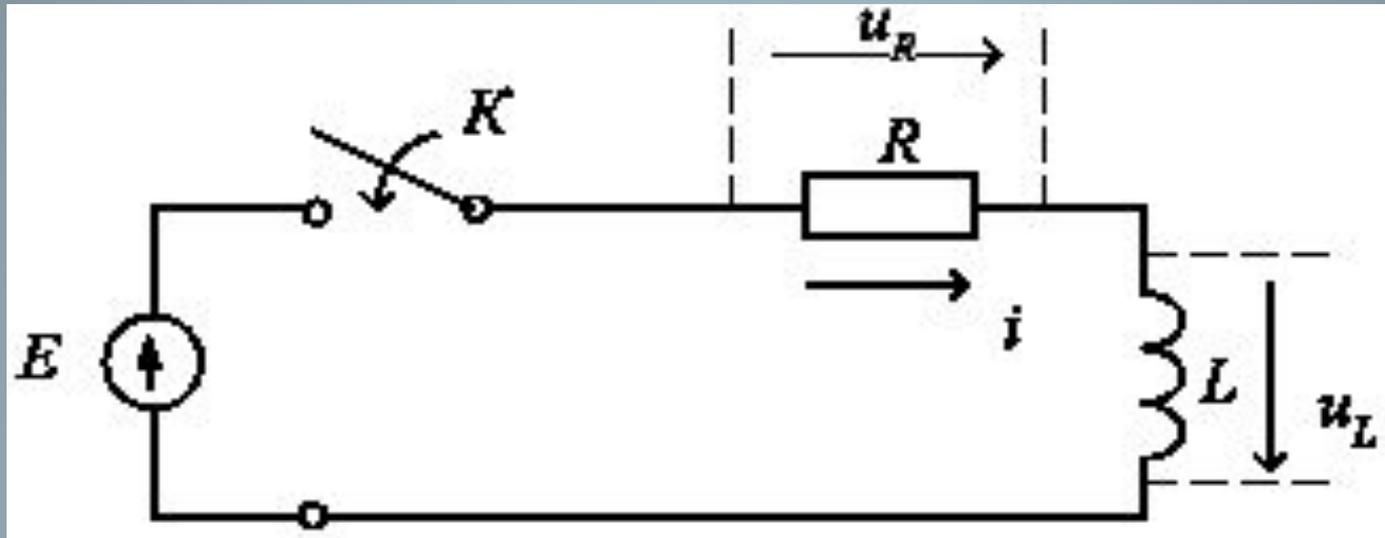
Рис. 2.7. Расчет неразветвленной электрической цепи синусоидального тока: а) схема электрической цепи; б) векторная диаграмма тока и напряжений; в) изображение комплексных сопротивлений на комплексной плоскости

## 2.4 Мощность в линейных цепях синусоидального тока

В линейных цепях синусоидального тока различают три вида мощности:

- активная, измеряемая в Вт или кВт;
- реактивная, измеряемая в варах и квартах;
- полная, измеряемая в ВА и кВА.

## 2.5 Переходные процессы в электрических цепях



Подключение простейшей цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора с сопротивлением  $R$  и катушки с индуктивностью  $L$ , к источнику постоянной ЭДС  $E$  (рис. 2.8).

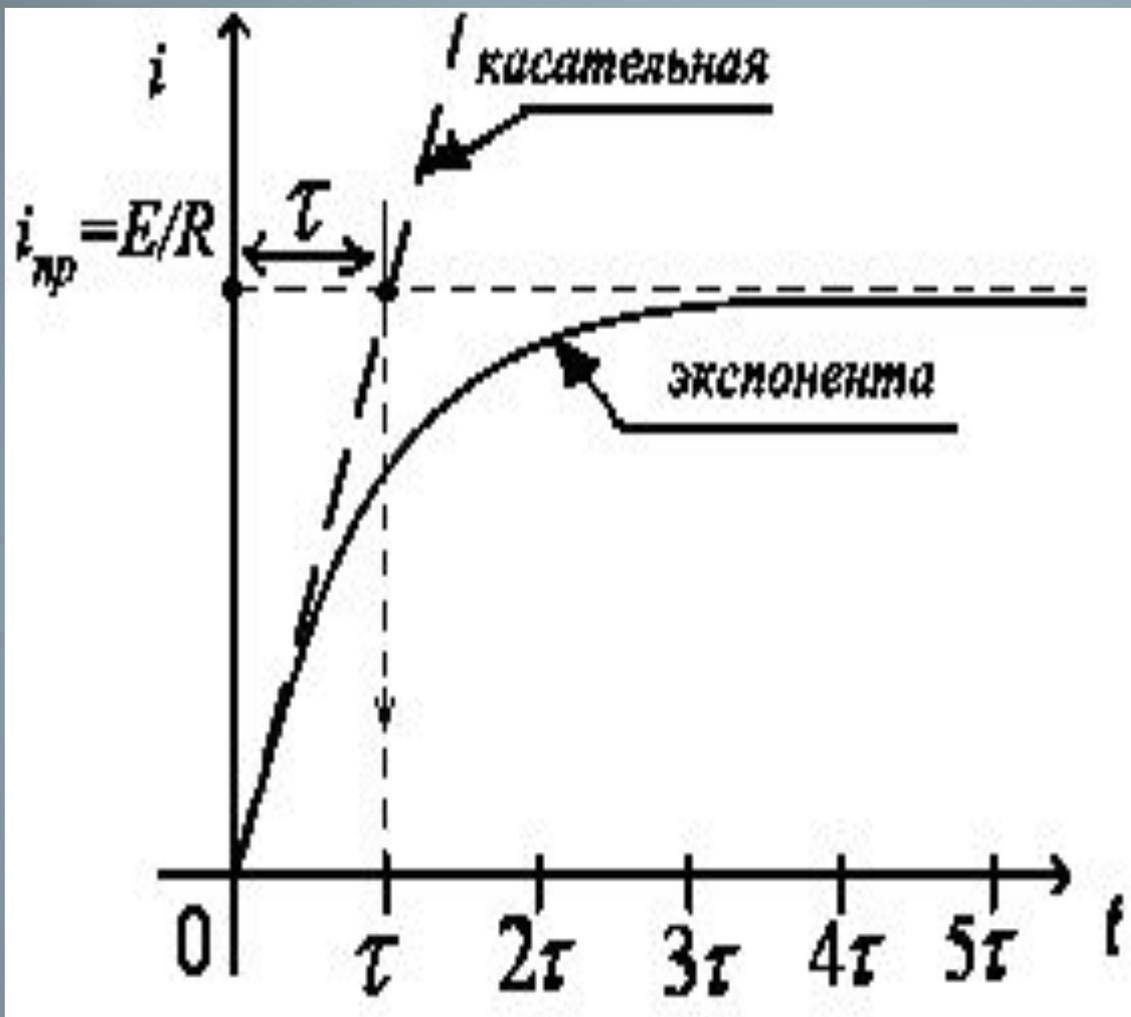


График переходного процесса для тока в цепи

