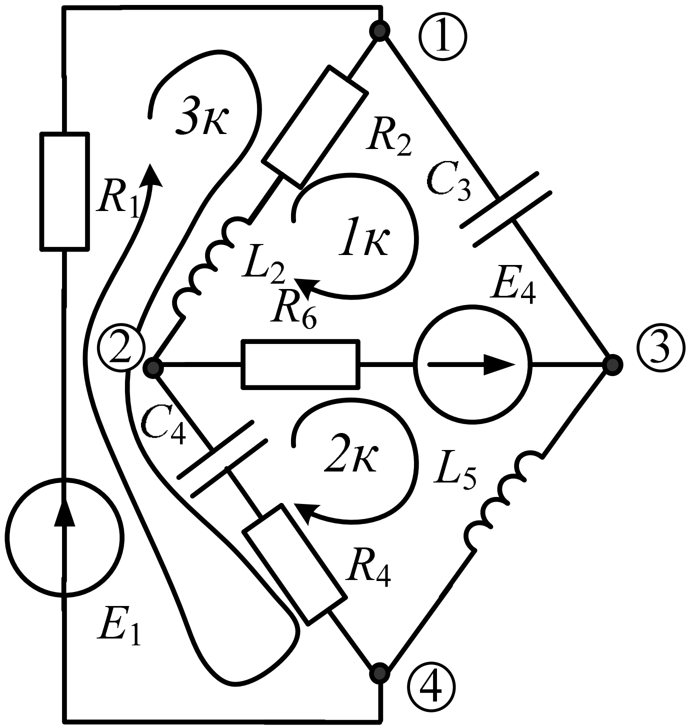
ОСНОВНЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ И СООТНОШЕНИЯ

Топология (геометрия) электрической цепи определяет способ соединения элементов цепи.



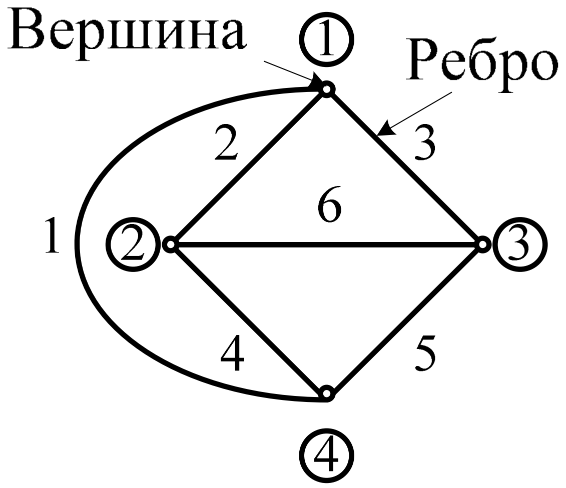
Ветвь – последовательность элементов, через которые проходит один и тот же ток ($n_в$=6).

Узел – место соединения трех и более ветвей ($n_у$=4). Независимых узлов $n_у$-1=3.

По первому закону Кирхгофа (1ЗК) составляют уравнения для независимых узлов.

Контур – замкнутый путь, состоящий из последовательности узлов и ветвей, причем каждый узел и ветвь входят в контур только один раз. Независимые контуры отличаются друг от друга хотя бы одной ветвью. Количество независимых контуров $N_{нез} = n_в - (n_у - 1)$.

По второму закону Кирхгофа (2ЗК) составляют уравнения для независимых контуров.

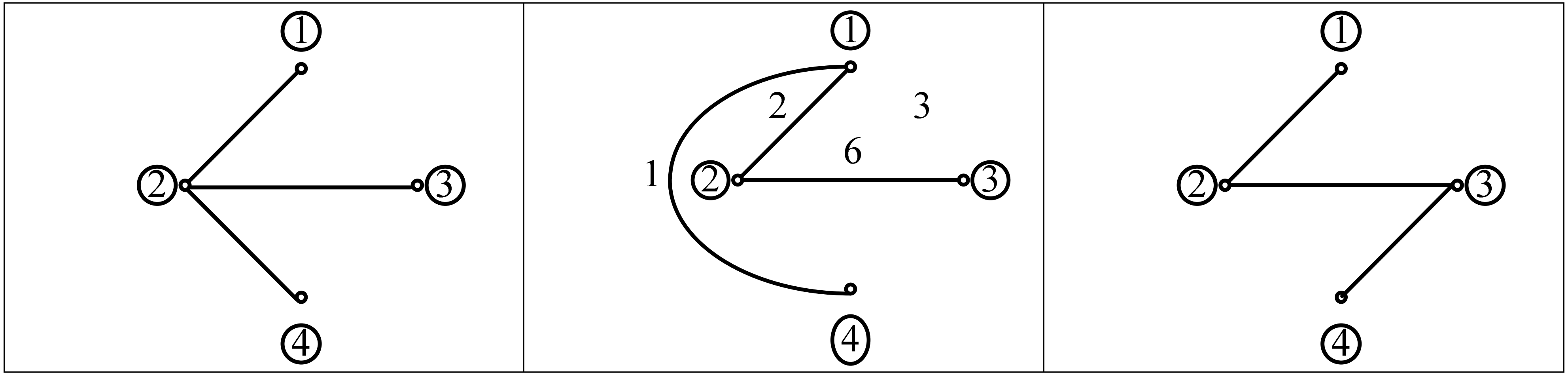


Геометрическая фигура, изображающая структуру цепи, называется графом цепи.

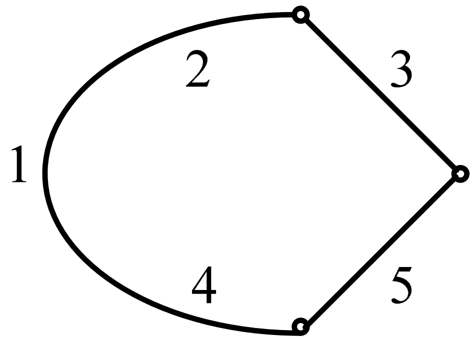
Граф это совокупность вершин, соединенных ребрами.

Контур – любая замкнутая линия, проходящая без разрыва через последовательность узлов и ветвей.

Дерево графа это совокупность ветвей, соединяющих все узлы, но не образующих контуры.



Количество деревьев: $C_6^3 = \dfrac{6!}{3!(6-3)!} - 3 = 17$



Дополнение дерева – множество ветвей графа, которые остаются, если удалить ветви дерева: $n_д = n_у - 1$.

Каждая ветвь дополнения дерева называется ветвью связи: $n_{св} = n_в - n_д$.

Главный контур содержит только одну ветвь связи. Остальные ветви главного контура являются ветвями дерева. Каждый главный контур отличается от других по крайней мере одной ветвью связи. Поэтому главные контуры являются независимыми.

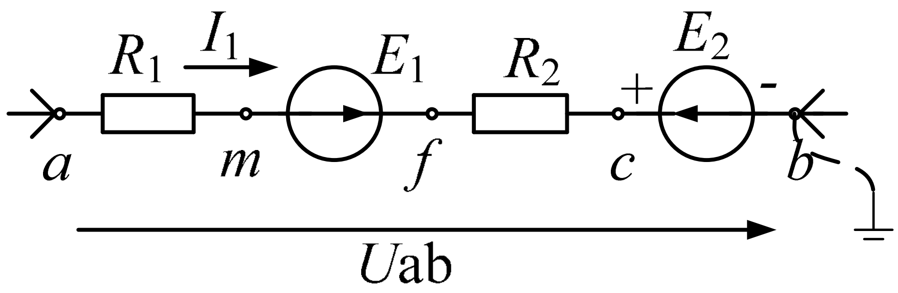
Правило дерева

Число независимых контуров равно числу ветвей связи, которые надо добавить в дерево, чтобы получить граф.

$$N_{\text{нез}} = n_{\text{св}} = n_{\text{в}} - n_{\text{д}} = n_{\text{в}} - (n_{\text{у}} - 1).$$

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Обобщенный закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС



Дано: E_1, E_2, U_{ab}, R_1, R_2.
Найти ток I.

$$\text{Пусть } \varphi_в = 0$$

$$\varphi_c = E_2$$

$$\varphi_f = E_2 + IR_2$$

$$\varphi_m = E_2 + IR_2 - E_1$$

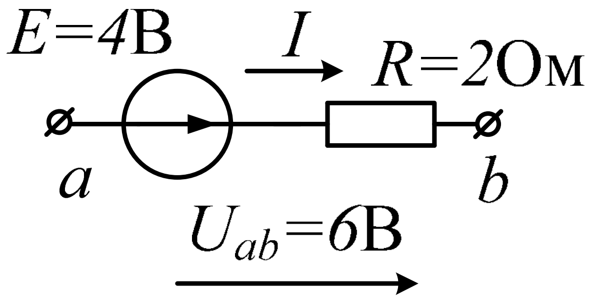
$$\varphi_a = E_2 + IR_2 - E + IR_1$$

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = E_2 + IR_2 - E_1 + IR_1$$

$$I = \frac{U_{ab} - E_2 + E_1}{R_1 + R_2}$$ - обобщённый закон Ома.

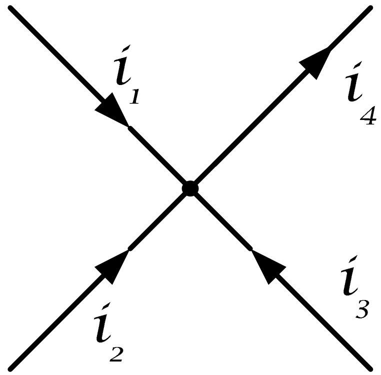
Ток на участке цепи равен напряжению на зажимах ветви, взятому по направлению тока плюс, минус источники ЭДС. С положительным знаком берут источники ЭДС совпадающие с положительным направлением тока.

Пример



Найти ток.

Первый закон Кирхгофа



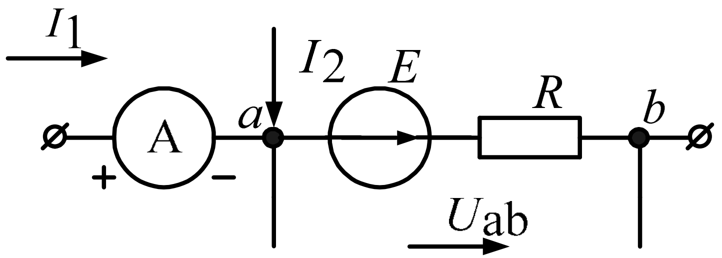
Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле в любой момент времени равна нулю.

$$\sum_{k=1}^{\infty} i_k = 0,$$

$$-i_1 - i_2 - i_3 + i_4 = 0$$

Со знаком + берут токи, выходящие из узла.

Пример.



Дано:

$$E = 9\,B, I_2 = 2\,A,$$

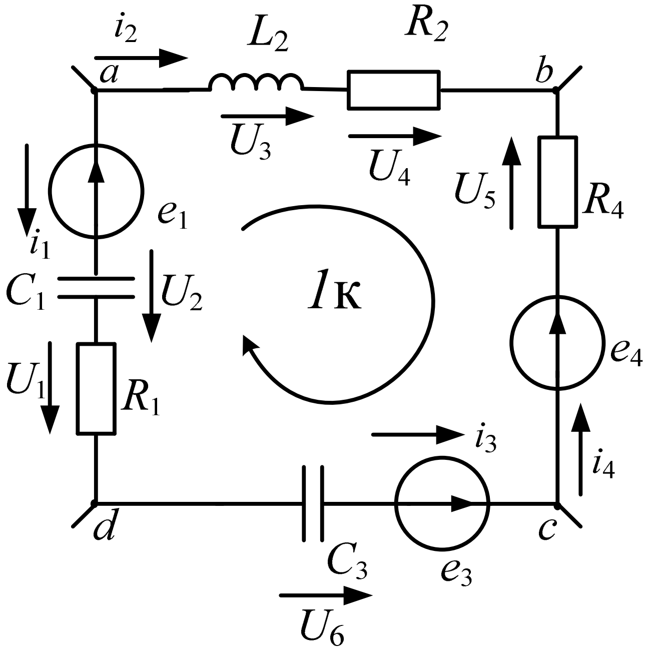
$$U_{ab} = 3\,B, R = 4\,Ом$$

Найти показания амперметра.

Вари-ант	1	2	3	4	5

I, A	-0,5	1	1,5	-2	-1

Второй закон Кирхгофа



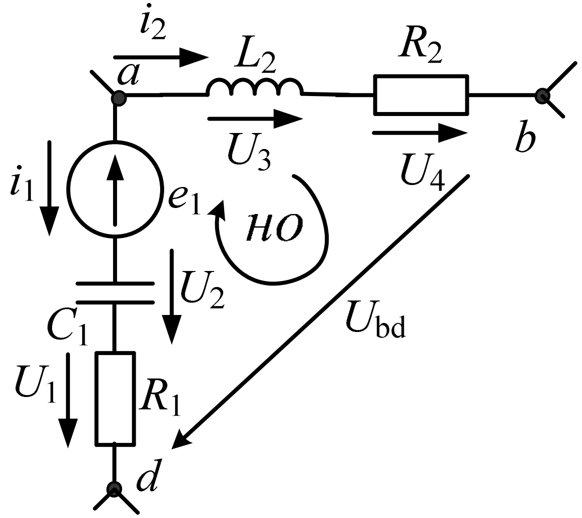
Выбираем направление обхода.

1. Выбираем условно положительные направления токов в ветвях.
2. Напряжения на пассивных элементах совпадают с направлением токов.

В любой момент времени алгебраическая сумма падений напряжений на пассивных элементах электрического контура равна алгебраической сумме источников напряжений, действующих в контуре. Со знаком плюс берут напряжения, которые совпадают с направлением обхода контура.

Уравнения в интегро-дифференциальной форме:

$$L_2\frac{di_2}{dt}+i_2R_2-i_4R_4-\frac{1}{C_3}\int i_3dt-i_1R_1-\frac{1}{C_1}\int i_1dt=e_1-e_3-e_4$$



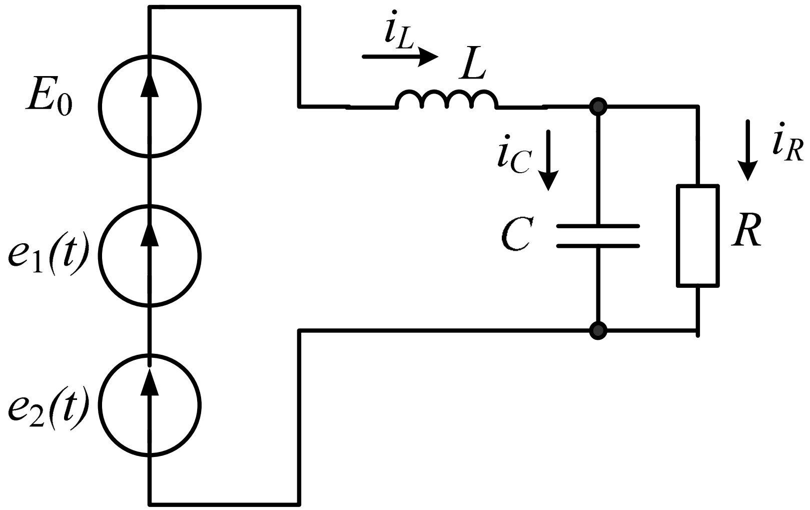
Найдем напряжение U_{bd}.

$$U_{bd}-i_1R_1-\frac{1}{C_1}\int i_1dt+L_2\frac{di_2}{dt}+i_2R_2=e_1$$

$$U_{bd}=e_1-i_1R_1+\frac{1}{C_1}\int i_1dt-L_2\frac{di_2}{dt}-i_2R_2$$

Принцип суперпозиции в линейной цепи

Процессы в линейной цепи описываются линейными интегро-дифференциальными или дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. В таких цепях действует принцип суперпозиции. Каждая составляющая тока или напряжения действует в цепи независимо от других и результирующую реакцию можно находить как сумму реакций на каждое воздействие в отдельности.



$$i_R = I_{(E)} + i_{(e_1)}(t) + i_{(e_2)}(t)$$

Виды сигналов

В реальных устройствах управления и связи сигналами могут быть любые физические процессы или состояния физических объектов, несущие информацию.

Реальные физические сигналы преобразуются в приемных преобразователях в электрические токи и напряжения.

Электромагнитная волна – антенна приёмника – электрические сигналы $u(t)$, $i(t)$.

Световое изображение – телекамера (сканер) – электрические сигналы $u(t)$, $i(t)$..

Тепловое изображение – преобразователь (ИК-приемник) – электрические сигналы $u(t)$, $i(t)$..

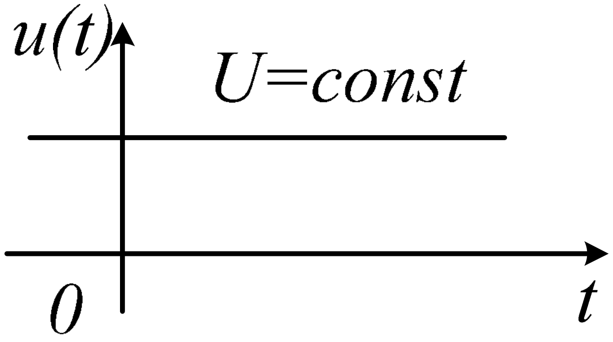
Звуковой сигнал – микрофон – электрические сигналы $u(t)$, $i(t)$.

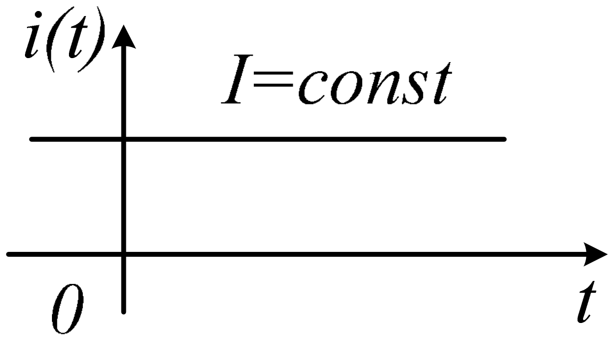
В расчетных моделях радиоэлектронных устройств, представляющих собой электрические цепи, входными сигналами являются электрические токи и напряжения.

Простейшие идеализированные сигналы

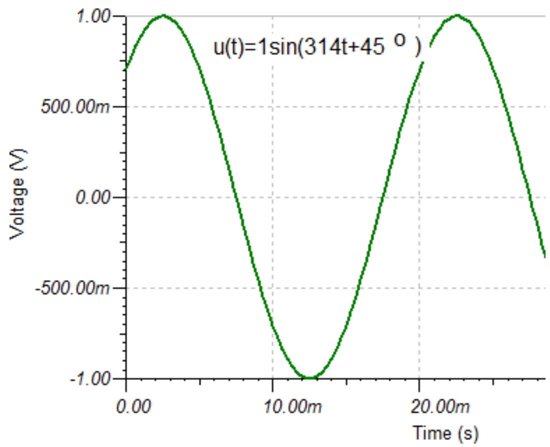
Позволяют представлять реальные сигналы в виде совокупности простейших.

1.Постоянное напряжение и ток (схемы)





2. Гармонические напряжения и ток



$$U(t) = U_m \sin(\omega_1 t + \phi)$$

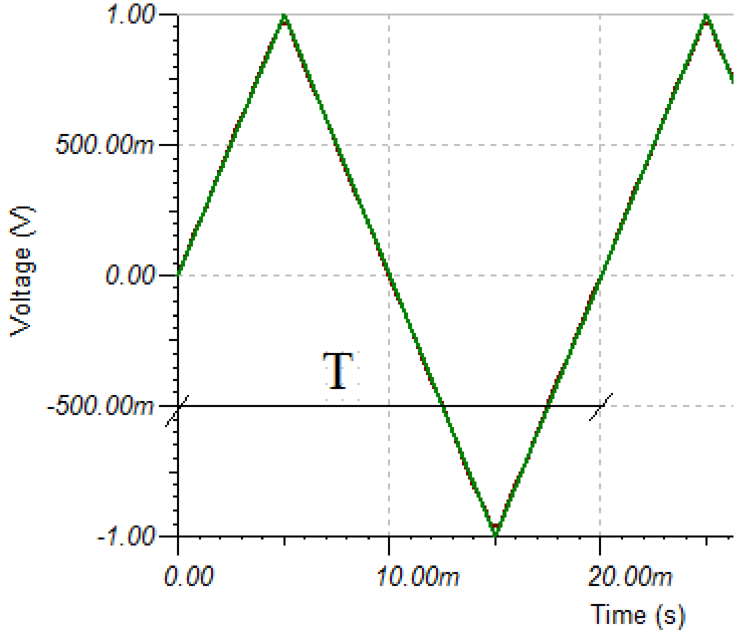
U_m - амплитуда гармонических сигналов

ω_1 - угловая частота

ϕ - начальная фаза, отсчитывают от ближайшего нуля с положительной производной;

$(\omega_1 t + \phi)$ - текущая фаза

3. Периодические негармонические сигналы



$$U(t+T)=U(t)$$

$$-\infty<t<+\infty$$

$$u(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos n\omega t+b_n\sin n\omega t)$$

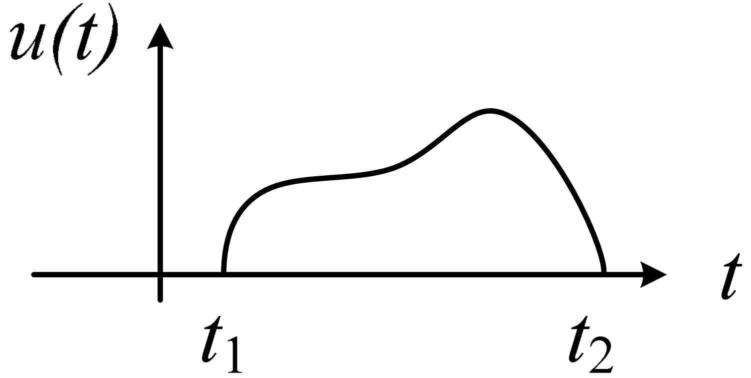
$$\omega=\frac{2\pi}{T}$$

$$\frac{a_0}{2}=\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T}u(t)dt$$

$$a_n=\frac{2}{T}\int_{t_0}^{t_0+T}u(t)\cos n\omega t dt$$

$$b_n=\frac{2}{T}\int_{t_0}^{t_0+T}u(t)\sin n\omega t dt$$

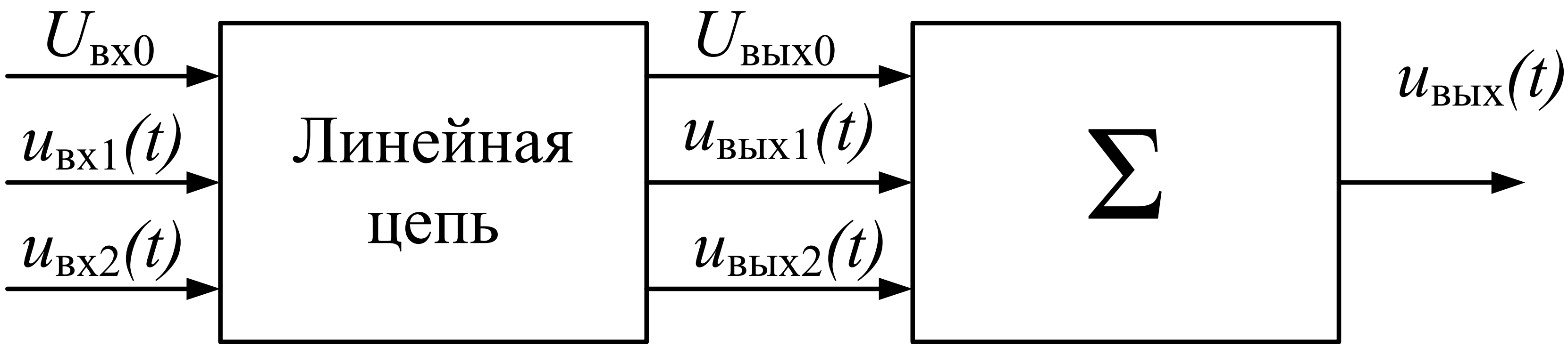
4.Непериодические сигналы



Можно представить множеством бесконечно малых гармонических составляющих.

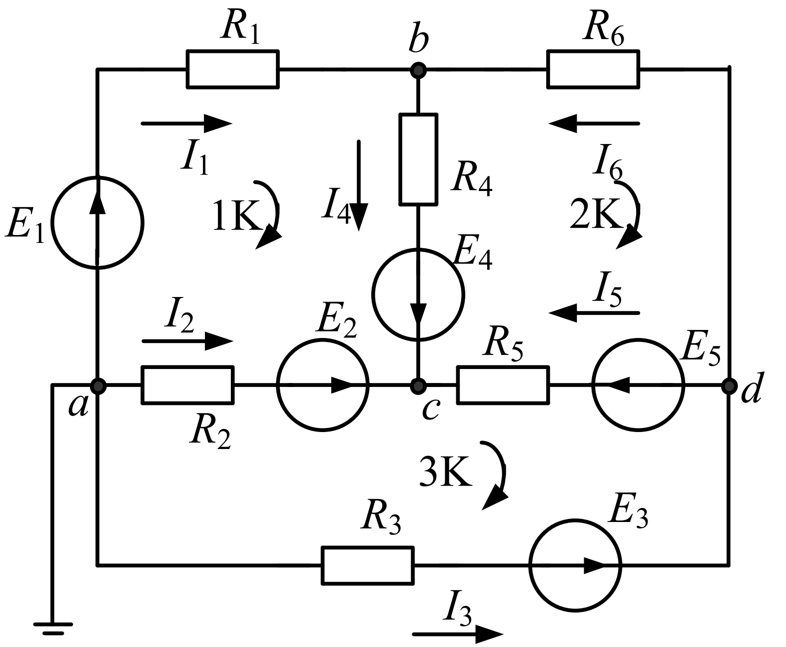
Вывод: Моделями реальных сигналов служат простейшие идеализированные сигналы, состоящие из постоянных и гармонических токов и напряжений.

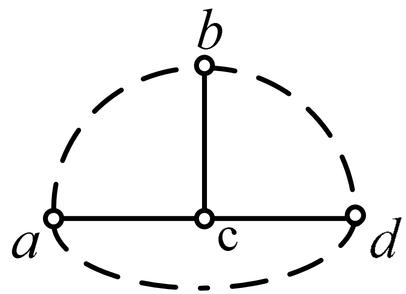
В линейных электрических цепях действует принцип суперпозиции (наложения), поэтому каждая частотная составляющая тока или напряжения не зависит от составляющих других частот и расчет линейной цепи можно проводить для каждой составляющей в отдельности, а результирующую реакцию находить как сумму реакций на каждое воздействие.


$U_{вх0}$
$u_{вх1}(t)$
$u_{вх2}(t)$
Линейная
цепь
$U_{вых0}$
$u_{вых1}(t)$
$u_{вых2}(t)$
Σ
$u_{вых}(t)$

Основные алгебраические методы расчёта цепей.

1. Составление уравнений по законам Кирхгофа





1. Выбираем произвольно условно положительные направления токов.

2. Строим граф схемы в виде дерева и ветвей связи.

3. Ветвей $n_{\text{в}}$=6, узлов $n_{\text{у}}$=4.

Независимых узлов $n_{\text{у}}$-1=3.

Независимых контуров

$N_{\text{нез.}}=n_{\text{в}}-(n_{\text{у}}-1)=3.$

4. Число неизвестных токов Т=$n_{\text{в}}$=6.

По первому закону Кирхгофа составляем 3 уравнения для токов в узлах:

$$Узел\, b: I_4 - I_1 - I_6 = 0;$$

$$Узел\, c: -I_2 - I_4 - I_5 = 0;$$

$$Узел\, d: I_5 + I_6 - I_3 = 0.$$

По второму закону Кирхгофа составляем 3 уравнения для напряжений в независимых контурах:

$$1K: I_1R_1 + I_4R_4 - I_2R_2 = E_1 + E_4 - E_2;$$

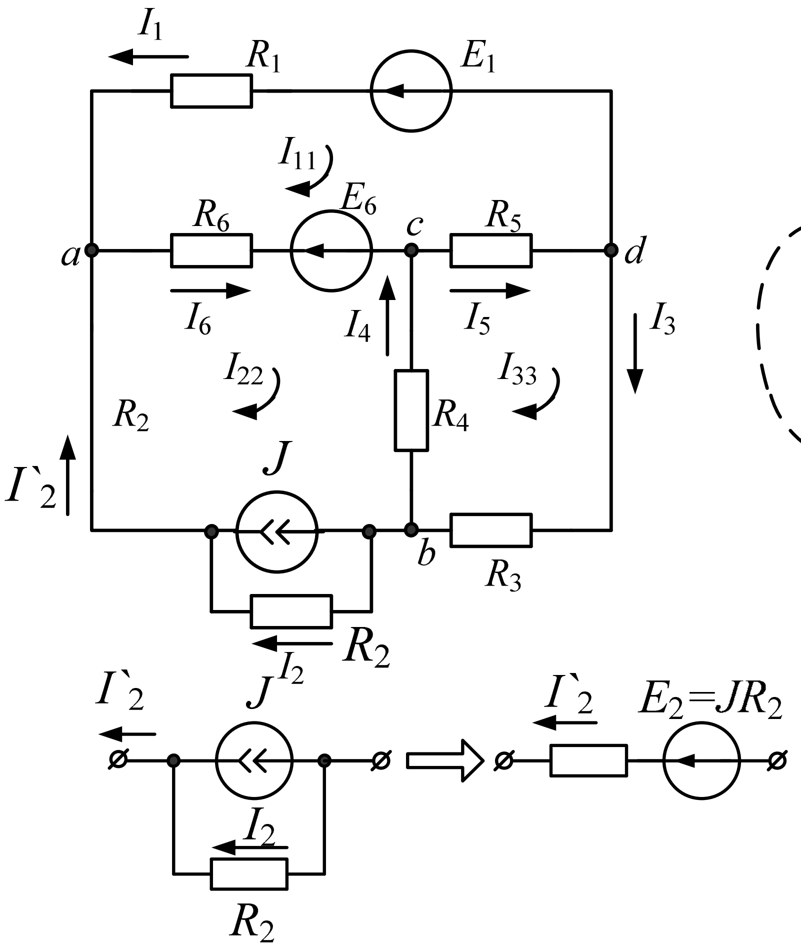
$$2K: -I_6R_6 + I_5R_5 - I_4R_4 = E_5 - E_4;$$

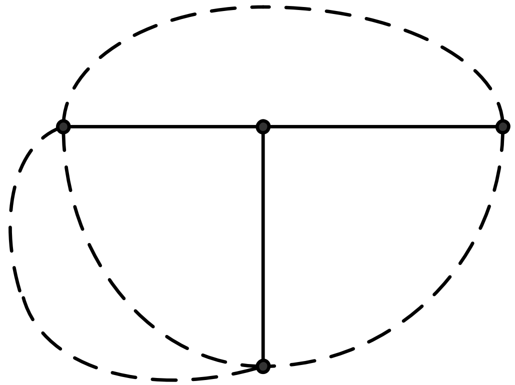
$$3K: I_2R_2 - I_5R_5 - I_3R_3 = E_2 - E_5 - E_3$$

Общее число уравнений: $n_у - 1 + n_в - (n_у - 1) = n_в = T$.

По второму закону Кирхгофа следует составлять уравнения для контуров, не содержащих источников тока или преобразовывать их в источники напряжения.

Метод контурных токов (МКТ)

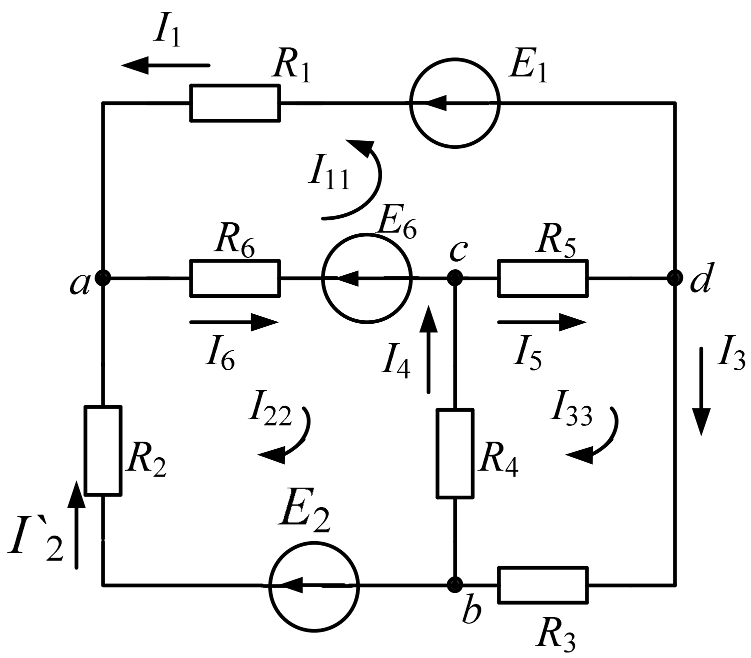




$n_у$=4, $N_{нез}$=$n_{св}$=4.

Вначале сократим число независимых контуров. Для этого заменяем источник тока на источник напряжения.

Истинный ток в R_2: $I_2 = -J + I_2'$



Считаем, что в каждом контуре существует расчетный контурный ток, совпадающий с направлением тока в ветви связи графа.

Таблица токов

$$I_1 = I_{11} \qquad I_4 = I_{33} - I_{22}$$

$$I_2' = I_{22} \qquad I_5 = I_{11} + I_{33}$$

$$I_3 = I_{33} \qquad I_6 = I_{11} + I_{22}$$

Каноническая форма системы уравнений по МКТ

$$R_{11}I_{11}+R_{12}I_{22}+I_{13}R_5=E_{11}$$

$$R_{21}I_{11}+R_{22}I_{22}+\ R_{23}I_{33}=E_{22}$$, где:

$$R_{31}I_{11}+R_{32}I_{22}\ \ +R_{33}I_{33}=E_3$$

$$R_{11}=R_1+R_5+R_6$$

$$R_{22}=R_2+R_4+R_6$$

$$R_{33}=R_3+R_4+R_5$$

\- **собственные сопротивления** каждого контура:

$$R_{12}=R_6$$

$$R_{13}=R_5$$

$$R_{21}=R_6=R_{12}$$

$$R_{23}=-R_4=R_{32}$$

$$R_{31}=R_{13}=R_5$$

\- **общие сопротивления смежных контуров**, взятые со знаком «+», если контурные токи в них совпадают, и со знаком «-», если токи противоположны.

Уравнения симметричны относительно главной диагонали.

$$E_{11} = R_1 - R_6$$
$$E_{22} = E_2 - E_6$$
$$E_{33} = 0$$

-**контурные ЭДС**, равные алгебраической сумме всех ЭДС данного контура. Со знаком «+» берут направления для ЭДС, которые совпадают с направлением тока, со знаком «-» для ЭДС противоположного направления.

Матричная форма уравнений МКТ:

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{bmatrix}$$

$$(R^{(k)})(I) = (E)$$

$$(I) = (R^{(k)})^{-1}(E)$$

Решение уравнений при помощи определителей:

$$I_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} E_{11} & R_{12} & R_{13} \\ E_{22} & R_{22} & R_{23} \\ E_{33} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}}, \quad I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad I_{33} = \frac{\Delta_3}{\Delta}$$

По Таблице токов находим токи в ветвях.

Ток $I_2 = -J + I_2'$**.**

Выразим ток I_{11} так:

$$I_{11} = E_{11}\frac{\Delta_{11}}{\Delta} + E_{22}\frac{\Delta_{21}}{\Delta} + E_{33}\frac{\Delta_{31}}{\Delta}$$

Где Δ_{ik} - алгебраическое дополнение к элементу R_{ik} определителя, получаемое вычёркиванием i строки и k столбца, и помноженного на элемент $(-1)^{i+k}$.

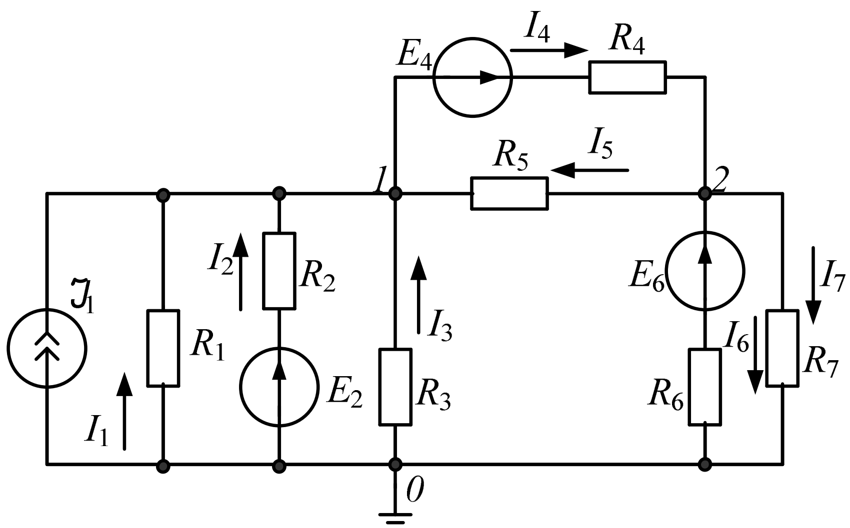
В общем виде:

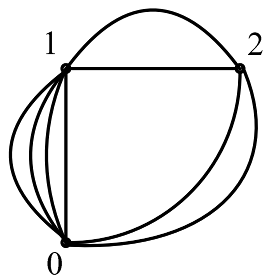
$$I_{kk} = \frac{\Delta_{1k}}{\Delta} E_{11} + \ldots + \frac{\Delta_{in}}{\Delta} E_{ii} + \ldots + \frac{\Delta_{nk}}{\Delta} E_{nn}.$$

Контурный ток представляется как сумма составляющих, вызванных действием каждого контурного ЭДС в отдельности.

Метод узловых напряжений (МУН)

МУН основан на применении первого закона Кирхгофа и закона Ома. Сводится к нахождению напряжений в узлах схемы и последующему нахождения токов по закону Ома.





Имеем:

$n_у = 3;$

$n_{унез} = 3 - 1 = 2;$

$n_в = 8;$

$n_{ит} = 1.$

Неизвестных токов Т=7. По ЗК надо 7 уравнений.

По методу контурных токов (МКТ) число независимых контуров:

$N_{нез} = n_{св} - n_{ит} = 6 - 1 = 5$. Требуется система из 5 уравнений.

Неизвестных узлов два. Если найти напряжение в узлах 1 и 2 относительно третьего узла: $U_1 = U_1 - U_0, U_2 = U_2 - U_0$, то по закону Ома можно рассчитать токи во всех узлах по Таблице токов. Примем U_0 =0:

$$I_1 = -U_1 G_1 = -U_1 G_1$$

$$I_2 = (-U_1 + E_2)G_2 = (E_2 - U_1)G_2$$

$$I_3 = -U_1 G_3$$

$$I_4 = (U_1 - U_2 + E_4)G_4$$

$$I_5 = (U_2 - U_1)G_5$$

$$I_6 = (U_2 - E_6)G_6$$

$$I_7 = U_2 G_7$$

Каноническая форма уравнений МУН

$$\begin{cases} G_{11}U_1 + G_{12}U_2 = J_{11} \\ G_{21}U_1 + G_{22}U_2 = J_{22} \end{cases},$$

где:

$$G_{11} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5$$

$$G_{22} = G_4 + G_5 + G_6 + G_7$$

- сумма проводимости ветвей присоединенных к узлам 1 и 2;

$G_{12} = G_{21} = -(G_4 + G_5)$ - взятая со знаком «-» сумма проводимости ветвей, соединяющих узлы 1 и 2;

$$J_{11} = J + E_2G_2 - E_4G_4$$

$$J_{22} = E_4G_4 + E_6G_6$$

- узловые токи, равные алгебраической сумме источников тока и умноженных на проводимости ветвей источников напряжения, подключенных к узлам 1 и 2.

Причём положительные знаки берут у источников, направленных к узлам.

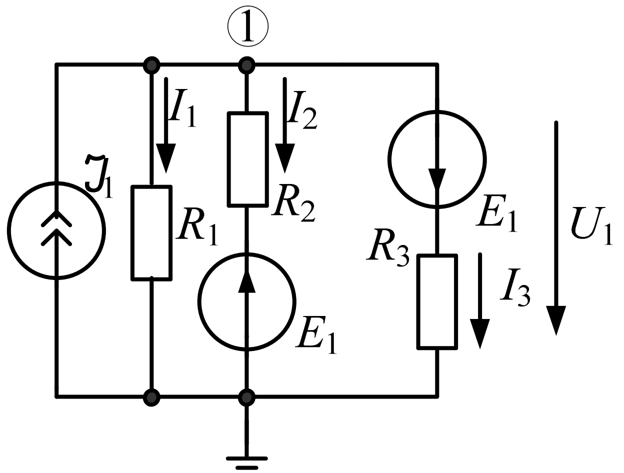
МУН широко применяют для расчёта электрических схем. После расчёта напряжения в узлах, токи находят по закону Ома по Таблице токов.

Матричная форма:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix}; \left[U^{(y)}\right] = \left[G^{y}\right]^{-1} \cdot [J]$$

Метод двух узлов

Частный случай МУН



$$\text{Дано: } \begin{array}{ll} J_1 = 6\text{А} & R_1 = 3\text{Ом} \\ E_1 = 12\text{В}\ , & R_2 = 6\text{Ом} \\ E_2 = 8\text{В} & R_3 = 2\text{Ом} \end{array}$$

По МУН для U_1 имеем одно уравнение:

$$(G_1 + G_2 + G_3 +)U_1 = J_1 + E_1G_2 - E_2G_3;$$

$$U_1 = \frac{J_1 + E_1G_2 - E_2G_3}{G_1 + G_2 + G_3}.$$

Проводим вычисления:

$$U_1 = \frac{6 + {}^{12}\!/_{6} - {}^{8}\!/_{2}}{{}^{1}\!/_{6} + {}^{1}\!/_{2} + {}^{1}\!/_{3}} = 4B,$$

$$I_1 = \frac{4-12}{6} = 6, I_2 = \frac{4+8}{2} = 6, I_3 = \frac{4}{3}.$$

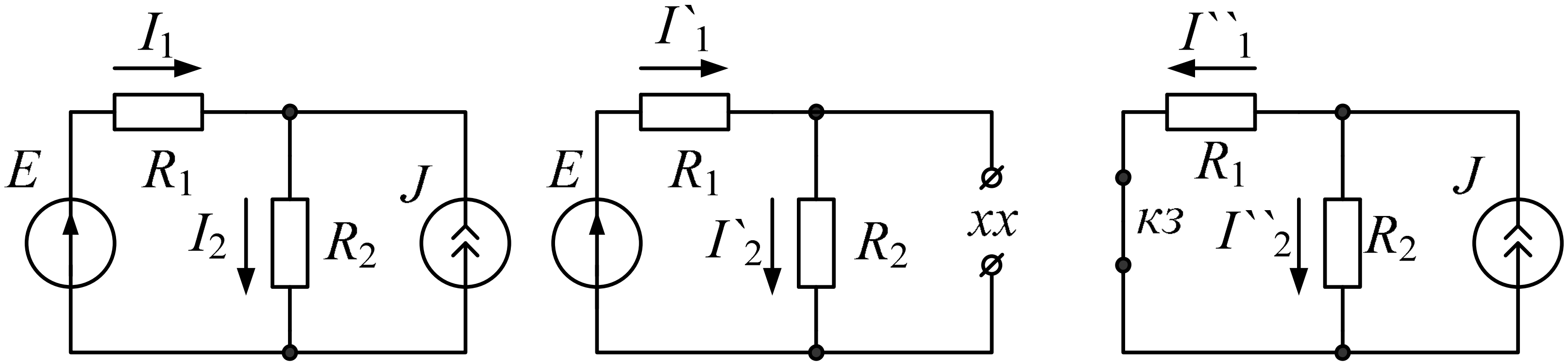
Проверка по первому закону Кирхгофа:

$$J_1 = I_1 + I_2 + I_3$$

$$6 = -\frac{4}{3} + 6 + \frac{4}{3} = 6$$ - верно.

Основные теоремы теории цепей

Принцип наложения



Дано: $E = 6\text{В}, J = 2\text{А}, R_1 = R_2 = 1\text{Ом}.$

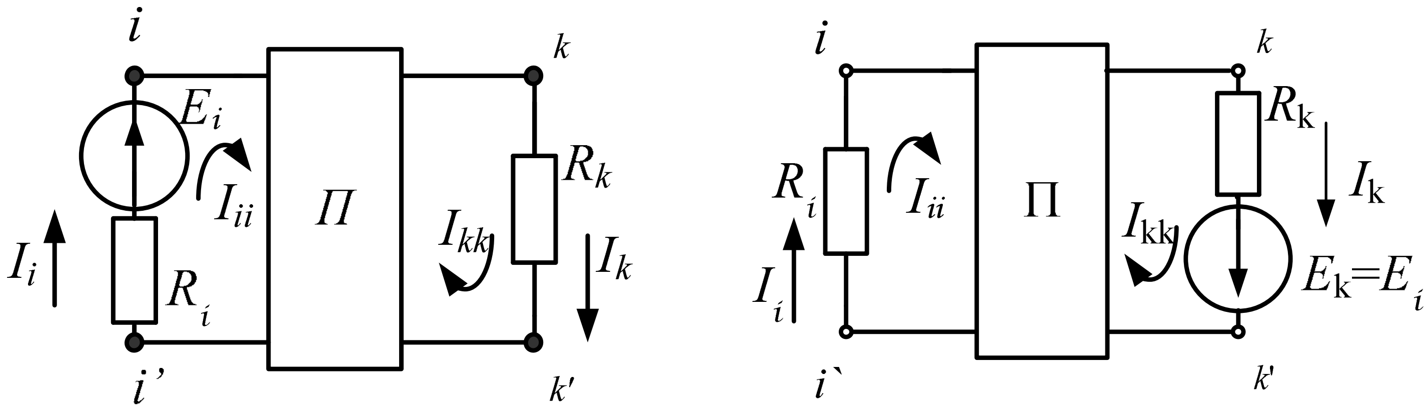
Найти ток I_2.

$I`_2$=3А, $I``_2$=1А, I_2=4А

В линейных электрических цепях действует принцип наложения:

ток в любой ветви равен алгебраической сумме частичных токов, обусловленных действием каждого источника в отдельности при отсутствии остальных. При расчете частичных токов, вместо исключённых источников надо оставить их сопротивления: $R_{ин} = 0, R_{ит} = \infty$.

Теорема взаимности



1. Поместим E_i в ветвь ii'. Так как источник напряжения один

$$I_k = I_{kk} = \frac{\Delta_{ik}}{\Delta} E_i$$

2. Поместим E_k=E_i в ветвь kk'. $I_i = I_{ii} = \dfrac{\Delta_{ki}}{\Delta} E_k$.

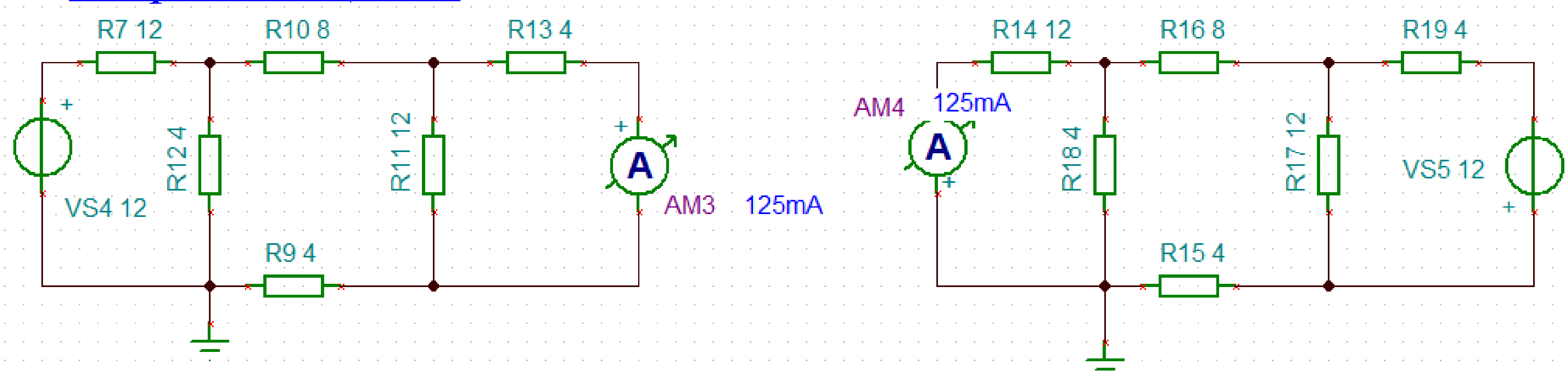
В линейной цепи определитель Δ симметричен относительно главной диагонали. Следовательно: $\Delta_{ik} = \Delta_{ki}$ и так как E_k=E_i получим: $I_k = I_i$. Если $E_i \neq E_k$, то $I_i / E_k = I_k / E_i$.

Формулировка теоремы взаимности

Если источник E действует в ветви i и вызывает в ветви k ток I_k, то тот же источник, помещенный в ветвь k, вызывает в ветви i ток $I_i = I_k$ (с точностью до знака).

Электрические цепи, удовлетворяющие теореме взаимности, называются обратимыми (или взаимными). Все линейные цепи с независимыми источниками являются обратимыми. К необратимым цепям относятся нелинейные цепи и линейные цепи с зависимым источником.

Теоремы ЛЦ.TSC



Модель для теоремы взаимности

Входные и взаимные проводимости и сопротивления ветвей

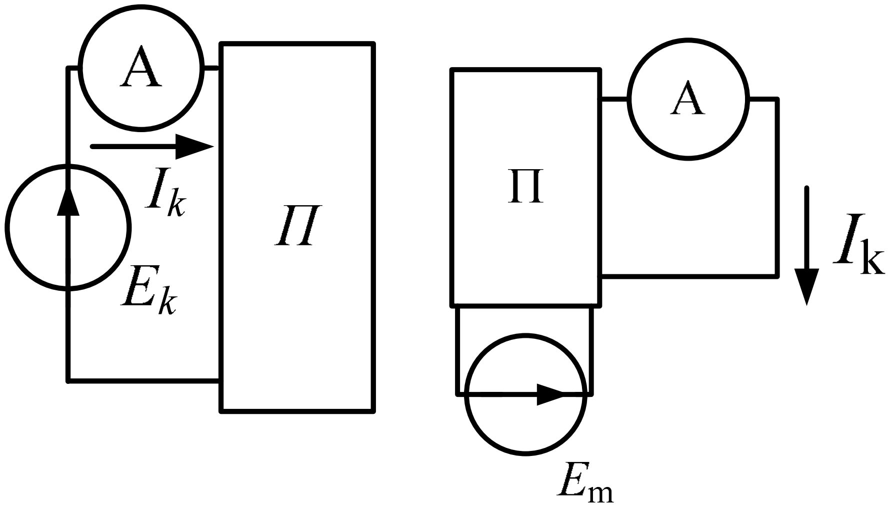
По принципу наложения ток в любой ветви есть сумма токов, обусловленная действием каждого источника в отдельности:

$$I_k = G_{k1}E_1 + G_{k2}E_2 + \ldots + G_{kk}E_k + \ldots + G_{kn}E_n$$

Эти коэффициенты называются входными и взаимными проводимостями.

Входная Взаимная проводимость

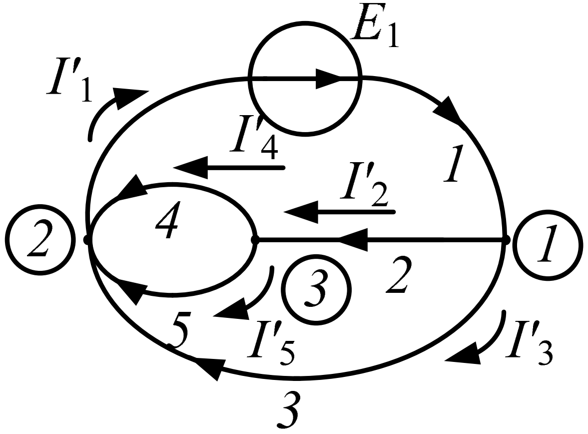
$$G_{kk} = \frac{I_k}{E_k} \qquad G_{km} = \frac{I_k}{E_m}$$



По принципу взаимности в линейной обратимой цепи: $G_{km} = G_{mk}$, $R_{km} = R_{mk}$. Входные и взаимные проводимости положительны, а составляющие токов могут иметь разные знаки, в зависимости от выбранных направлений.

Связь между входными и взаимными проводимостями.

По 1ЗК для узла 1: $I_1' = I_2' + I_3' = I_4' + I_5' + I_6'$.



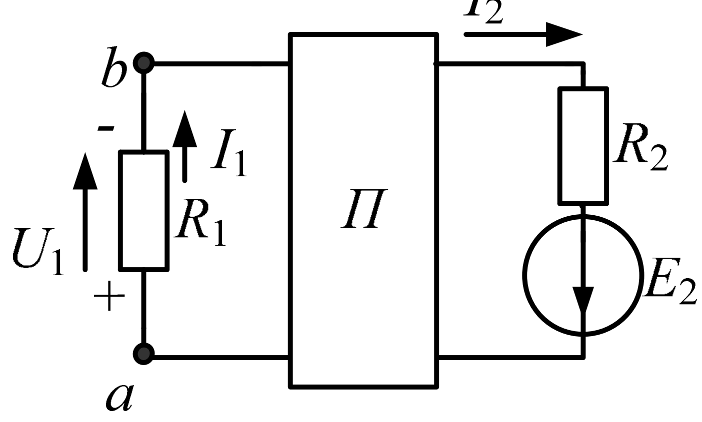
Делим на E_1:

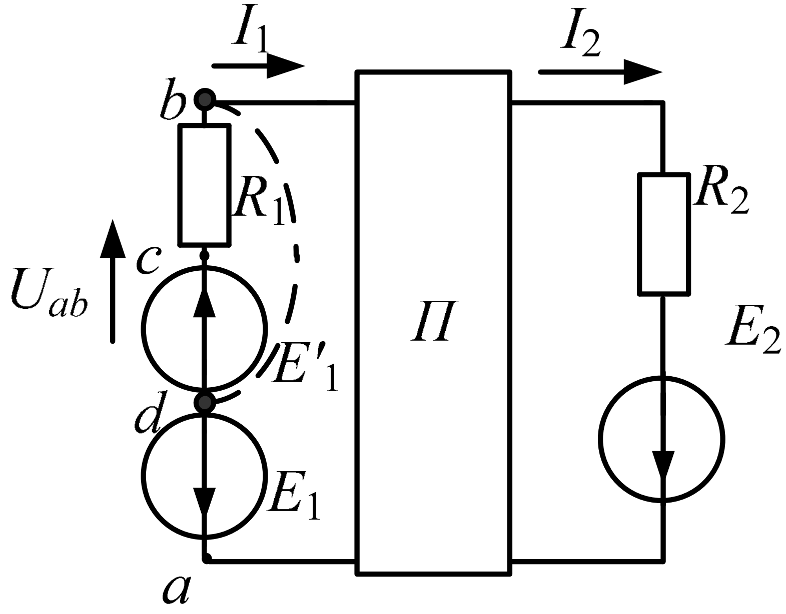
$$\frac{I_1'}{E_1} = \frac{I_2'}{E_1} + \frac{I_3'}{E_1} = \frac{I_4'}{E_1} + \frac{I_5'}{E_1} + \frac{I_3'}{E_1}$$

$$G_{11} = G_{21} + G_{31} = G_{41} + G_{51} + G_{31}.$$

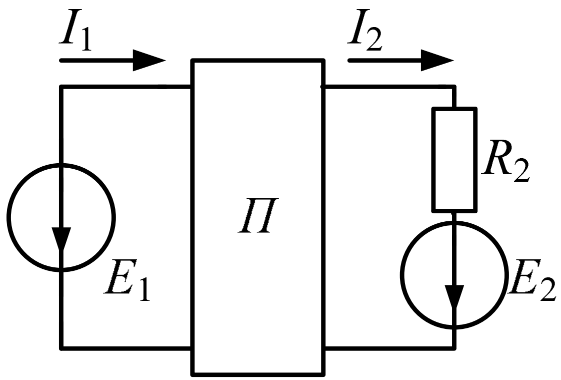
Входная проводимость ветви равна сумме взаимных проводимостей данной ветви и каждой из остальных ветвей, присоединённых к одному из двух узлов, к которым присоединена эта ветвь.

Теорема о компенсации



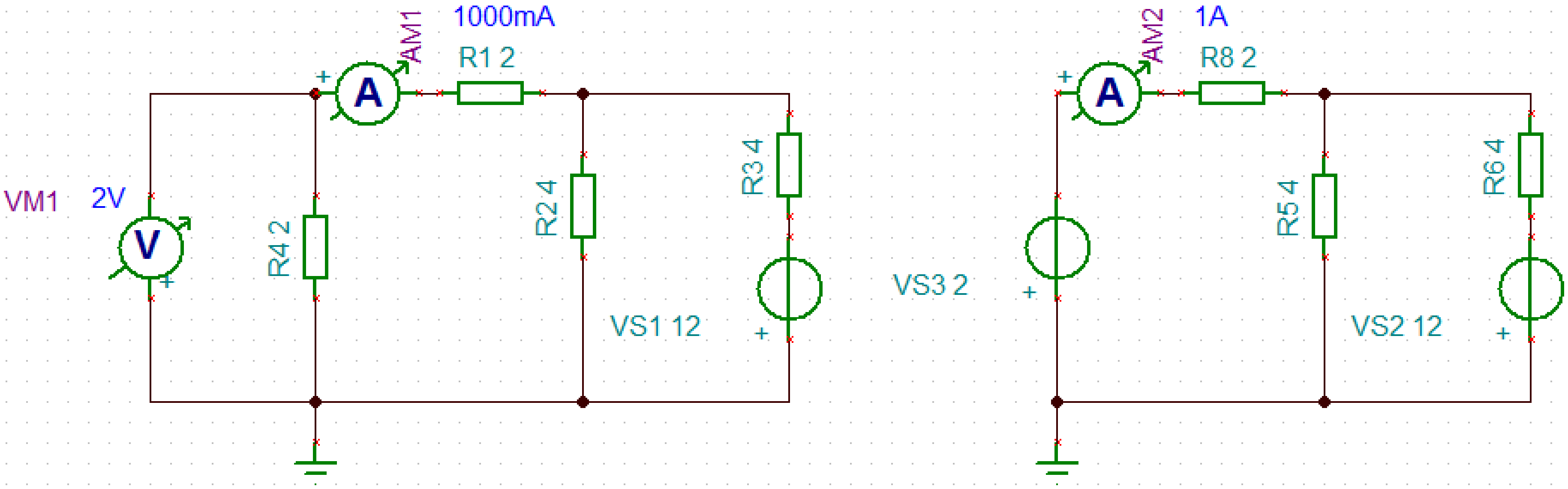


Пусть $E_1 = E_1' = U_1 = I_1 R_1. \quad U_{db} = U_d - U_b = I_1 R_1 - E_1' = 0.$



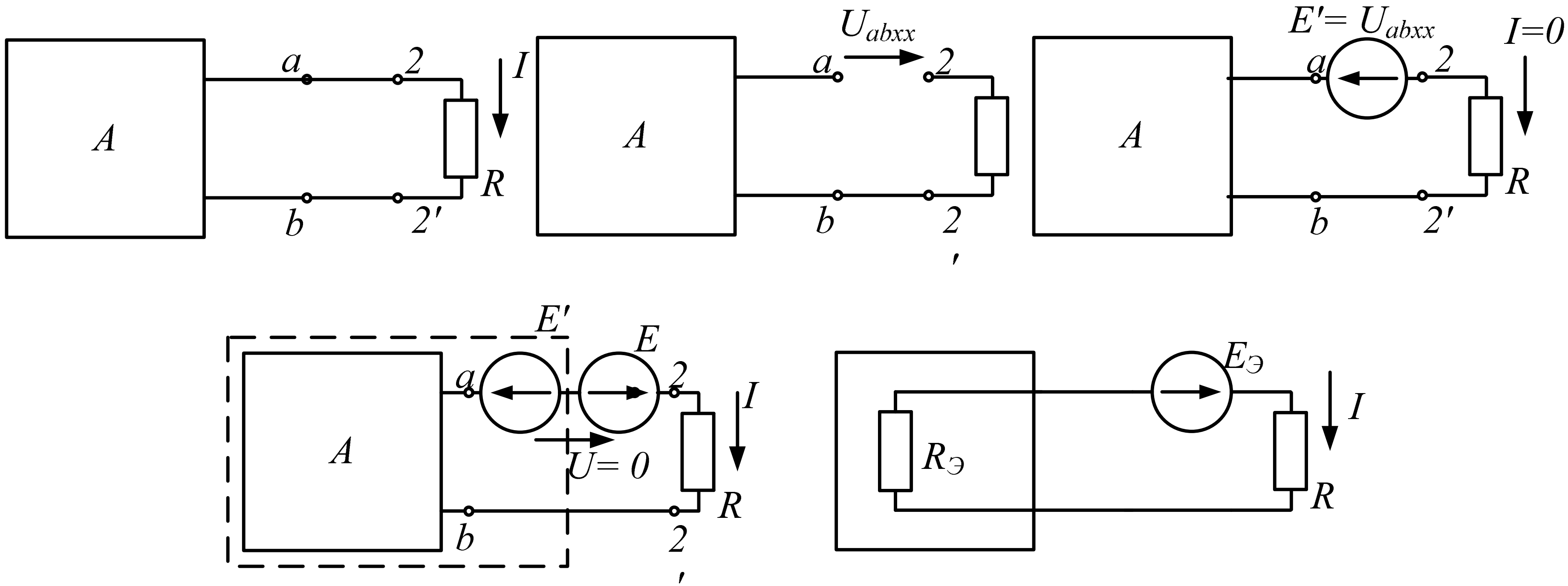
Любое сопротивление можно заменить источником ЭДС, направленным встречно току и равным напряжению на этом сопротивлении (или источником тока равным току ветви и совпадающему с ним по направлению).

Теоремы ЛЦ.TSC



Модель компенсации

Теорема об эквивалентном генераторе.



1. Разомкнем цепь между «а-2» и найдем напряжение холостого хода U_{abxx}.
2. Включим между «а-2» Е' = U_{abxx}. Получим I=0.
3. Включим E= E' противоположно к E'. Получим схему, эквивалентную исходной. Ток равен исходному.

4. Активный двухполюсник вместе с E' становится пассивным и заменен $R_Э$=$R_{вхab}$.

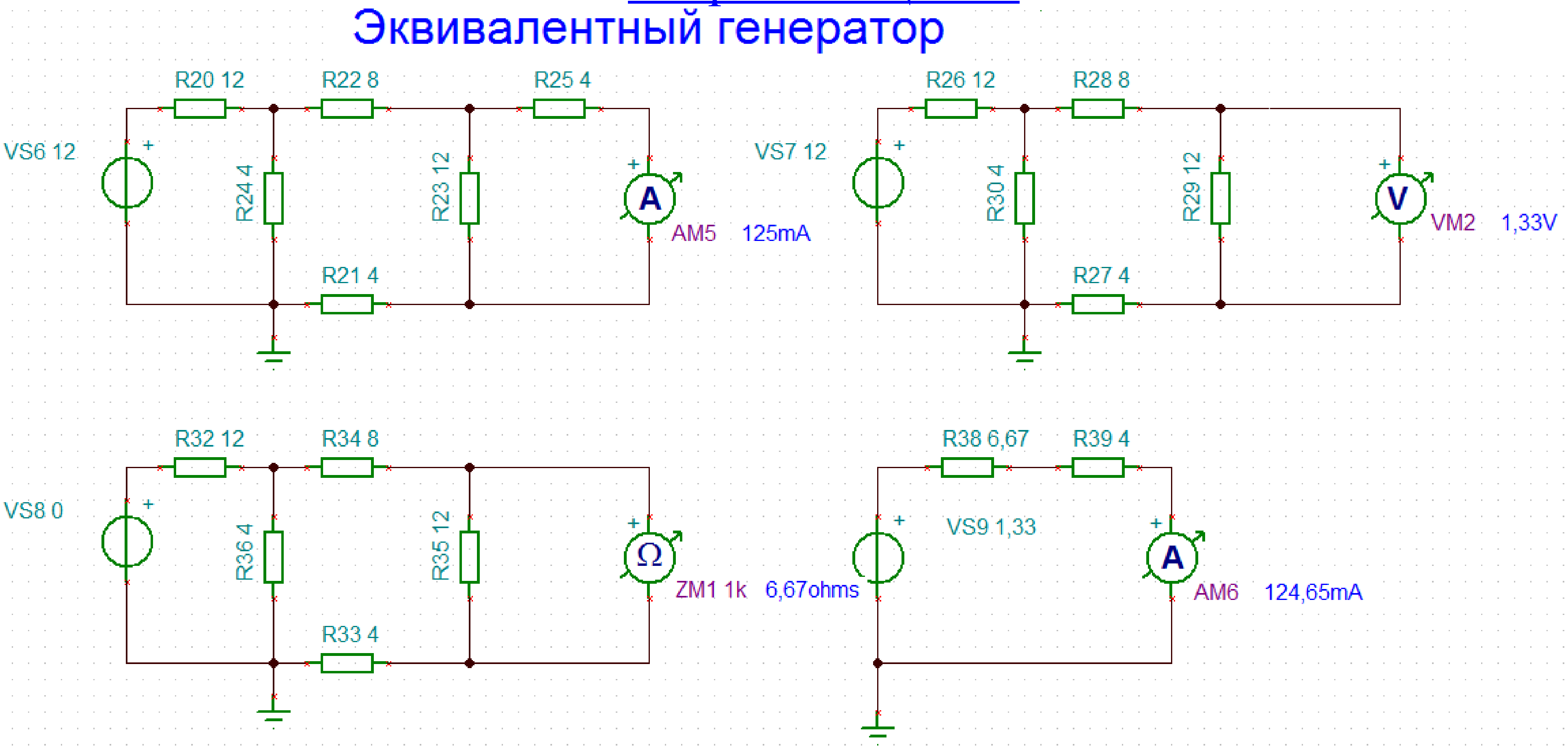
$$I=\frac{E_э}{R+R_э}=\frac{U_{авхх}}{R+R_{вхав}}$$

Теорема

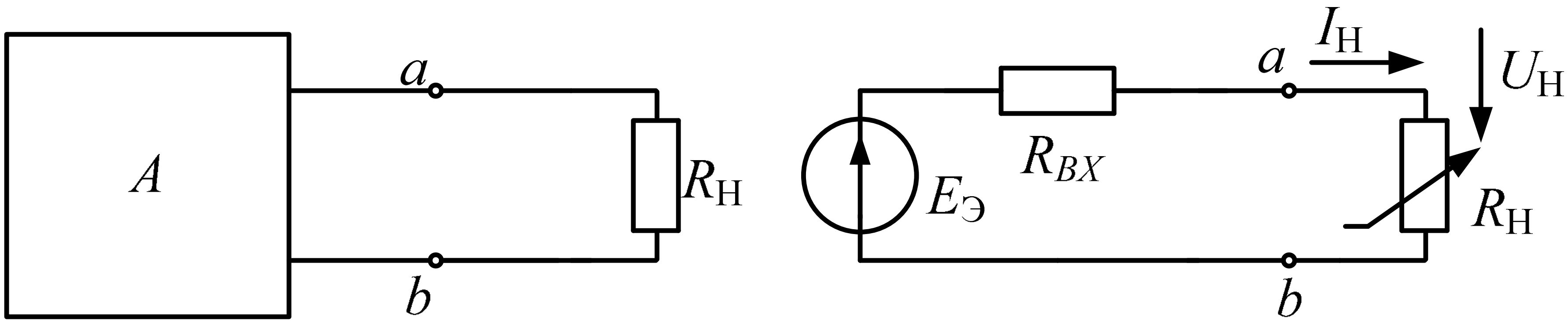
Любой активный двухполюсник можно заменить эквивалентным генератором, у которого ЭДС равна напряжению холостого хода на зажимах активного двухполюсника, а внутреннее сопротивление равно входному сопротивлению двухполюсника при равных нулю источниках напряжения и отключенных источниках тока.

Модель эквивалентного генератора

Теоремы ЛЦ.TSC



Передача энергии от активного двухполюсника к нагрузке, согласование нагрузки с генератором



Любой активный двухполюсник можно заменить эквивалентным генератором.

$E_Э = I_н R_н + I_н R_{вх}$. Умножим на $I_н$: $E_Э I_н = I_н^2 R_н + I_н^2 R_{вх}$.

Мощности: $P_г = P_н + P_{вн}$ ($P_г$-мощность генератора; $P_н$-мощность нагрузки; $P_{вн}$ - потери мощности внутри генератора).

Определим ток, при котором $P_н = P_{мах}$.

$$P_{\text{н}} = E_{\text{Э}} I_{\text{н}} - I_{\text{н}}^2 R_{\text{вх}}; \ \frac{dP_{\text{н}}}{dI} = E_{\text{Э}} - 2 I_{\text{н}} R_{\text{вх}} = 0; \ I_{\text{н}} = \frac{E_{\text{Э}}}{2R_{\text{вх}}}.$$

Но $I_{\text{н}} = \dfrac{E_{\text{Э}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{н}}}$. Следовательно: $R_{\text{вх}} = R_{\text{н}}$ - **условие согласования нагрузки с генератором**, при котором в нагрузке выделяется максимальная мощность.

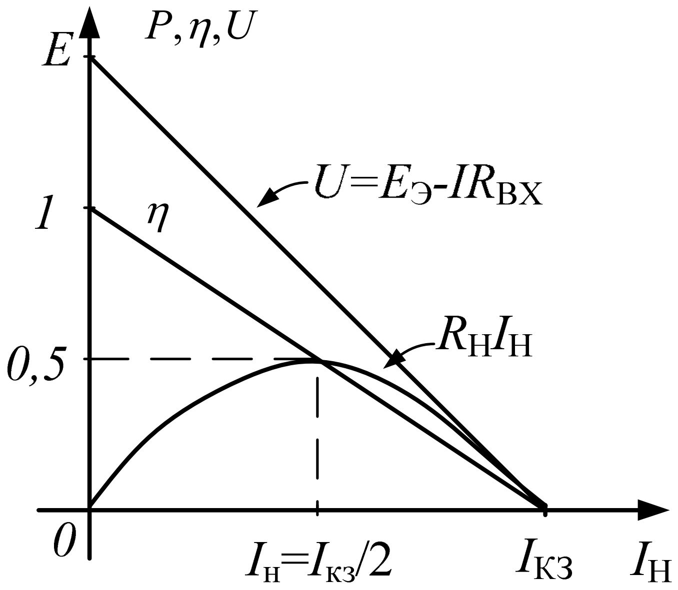
$$P_{\text{мах}} = I_{\text{н}}^2 R_{\text{н}} = \frac{E_{\text{Э}}^2}{(2R_{\text{вх}})^2} R_{\text{вх}} = \frac{E_{\text{Э}}^2}{4R_{\text{вх}}}.$$

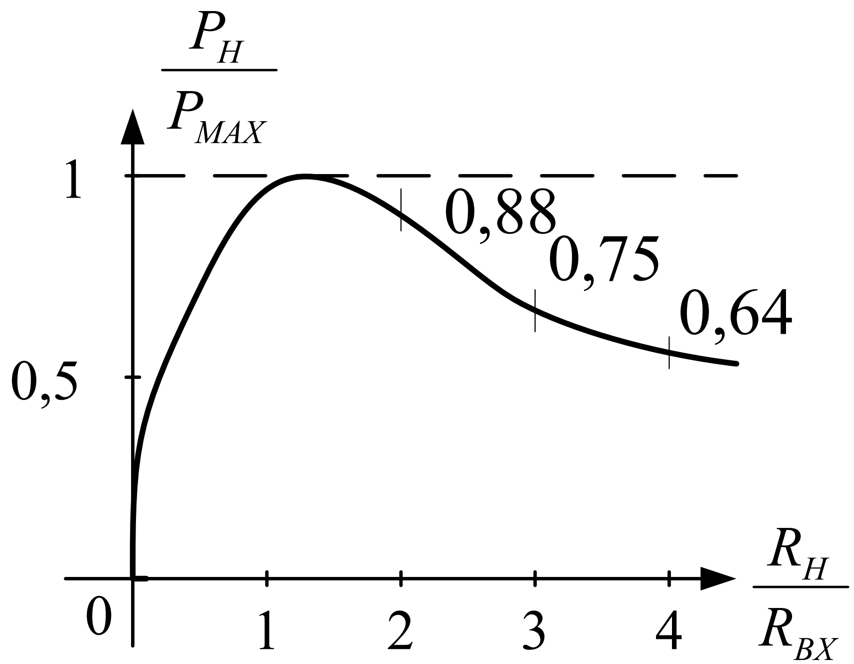
Коэффициентом полезного действия (КПД) активного двухполюсника называется отношение мощности отдаваемой в нагрузку к мощности, развиваемой эквивалентным генератором.

$$\eta=\frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{г}}}=\frac{E_{\text{э}}I_{\text{н}}-I_{\text{н}}^2R_{\text{вх}}}{E_{\text{э}}I_{\text{н}}}=1-\frac{R_{\text{вх}}I_{\text{н}}}{E_{\text{э}}}=1-\frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{кз}}}=$$

$$\frac{I_{\text{н}}^2R_{\text{н}}}{I_{\text{н}}^2(R_{\text{вх}}+R_{\text{н}})}=\frac{R_{\text{н}}/R_{\text{вх}}}{1+R_{\text{н}}/R_{\text{вх}}}.$$

$$\frac{P_{н}}{P_{\text{мах}}}=\frac{4\,R_{\text{н}}/R_{\text{вх}}}{\left(1+R_{\text{н}}/R_{\text{вх}}\right)^2}$$





Модель согласования нагрузки с генератором

Мощность.TSC

Оптимальная нагрузка