ТРАНСФОРМАТОРЫ

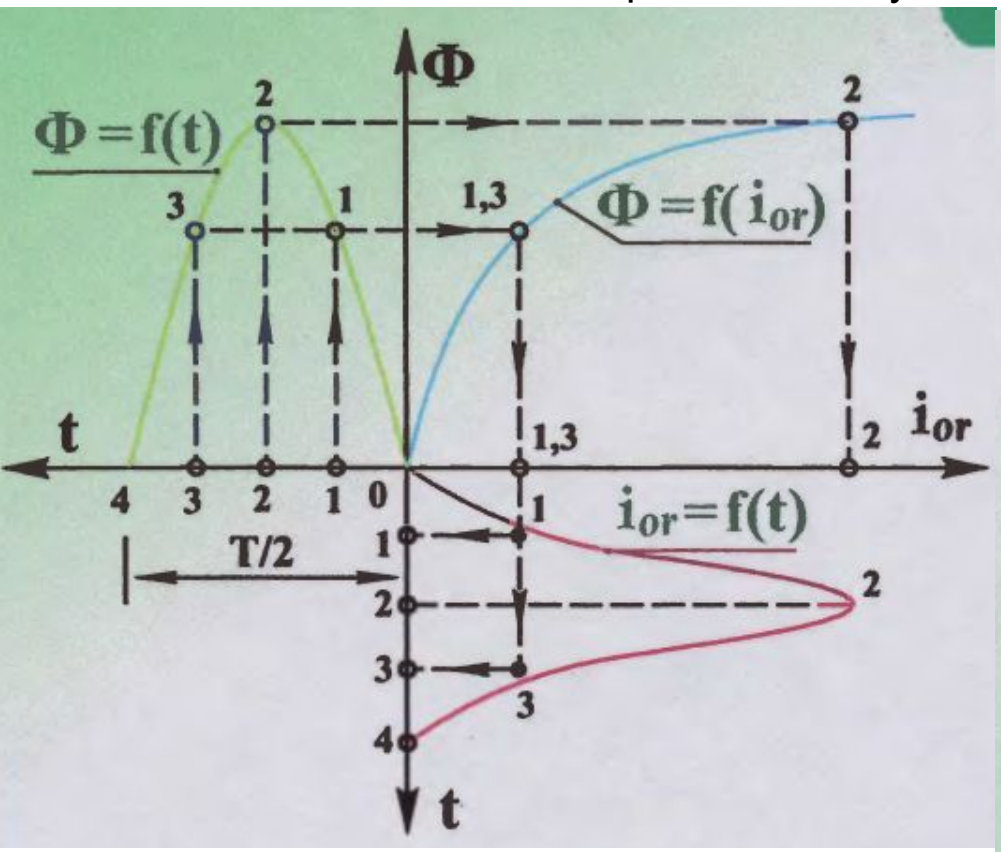
ЛЕКЦИЯ 2_1

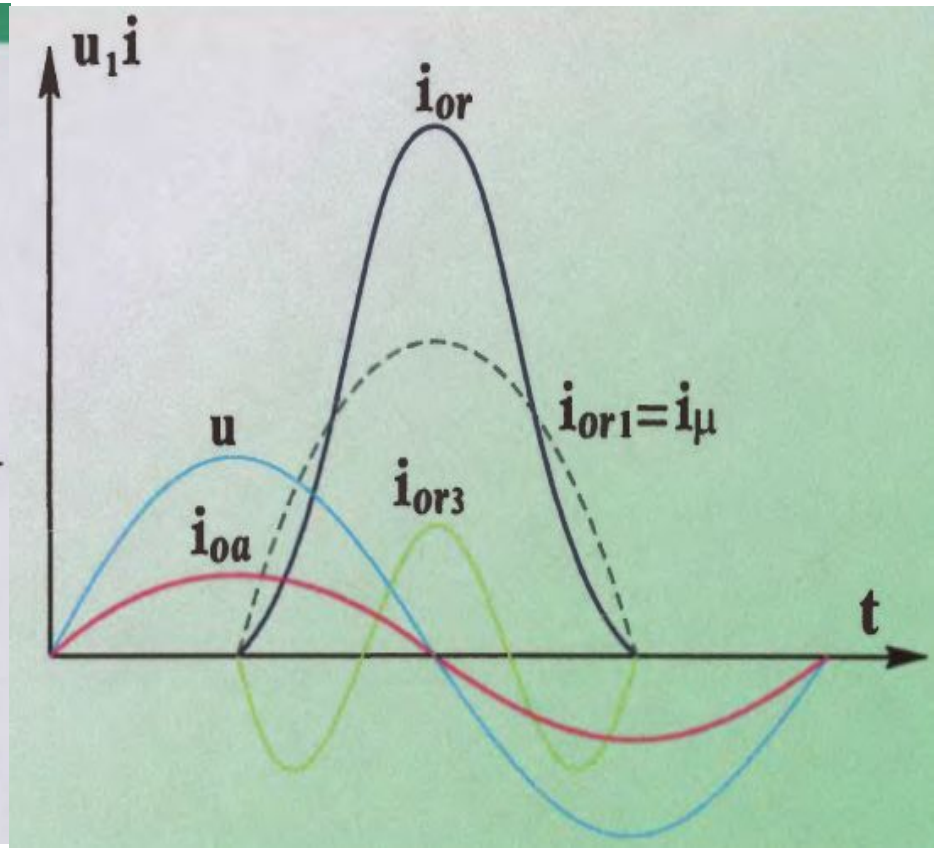
Намагничивание сердечников трансформаторов.
Приведение вторичной обмотки к первичной.
Схема замещения.

Намагничивание сердечников трансформаторов

При намагничивании сердечников трансформаторов из-за насыщения магнитной цепи при питании синусоидальным напряжением возникает несинусоидальный намагничивающий ток, содержащий нечетные гармоники.

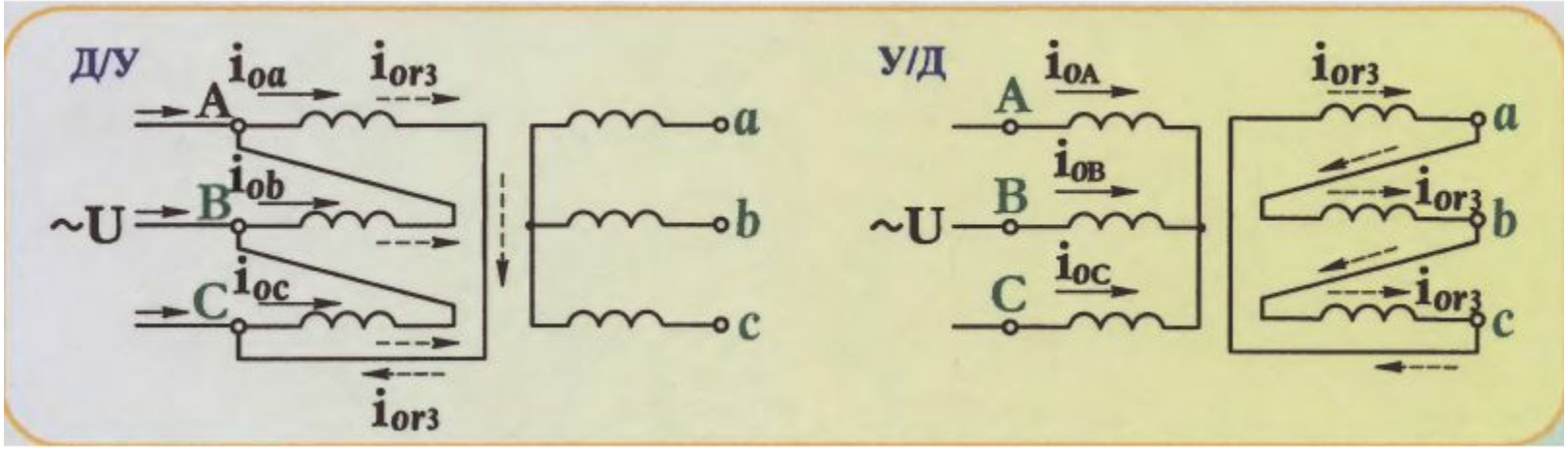
Так как магнитный поток определяется напряжением (см. лекцию 1, соотношения э. д.с. и напряжения в идеальном трансформаторе), то магнитный поток при синусоидальном напряжении должен быть синусоидален. Тогда форма намагничивающего тока определяется путем графических построений:



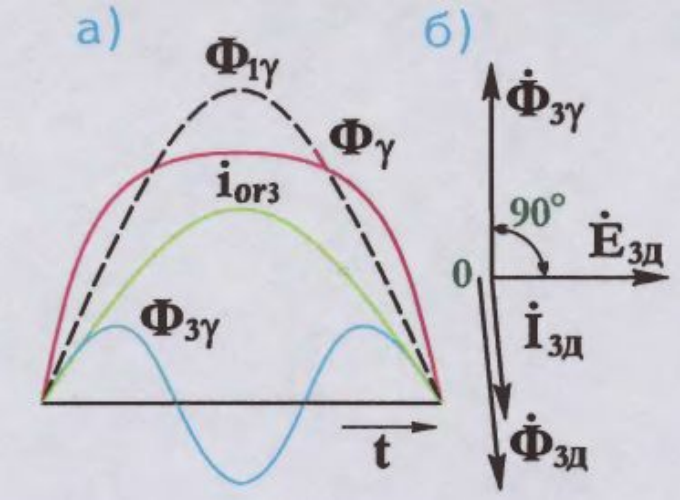


Намагничивание сердечников трансформаторов

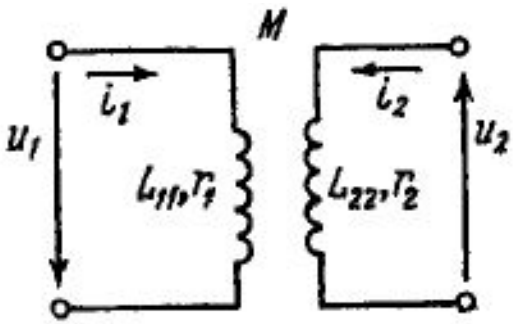
Для предотвращения несинусоидальности э.д.с. в трехфазных трансформаторах предпочтительно соединять обмотки по схеме звезда/треугольник или треугольник/ звезда.



Форма кривой потока в магнитопроводе трёхфазного трансформатора с соединением обмоток по способу У/Д (*а*) и векторная диаграмма потоков и токов третьей гармоники (*б*)



Уравнения напряжения трансформатора



Первичное напряжение u_1 является приложенным, расходуется на падение напряжения $r_1 i_1$ и уравновешивание э. д. с. первичной обмотки

$$e_1 = -\left(L_{11}\frac{di_1}{dt} + M\frac{di_2}{dt}\right)$$

и состоит поэтому из двух составляющих: $r_1 i_1$ и $-e_1$.

Вторичное напряжение u_2 возникает вследствие индуктирования во вторичной обмотке э. д. с.

$$e_2 = -\left(L_{22}\frac{di_2}{dt} + M\frac{di_1}{dt}\right),$$

и поэтому

$$u_2 = e_2 - r_2 i_2,$$

$$\boxed{\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1\dot{I}_1 + jx_{11}\dot{I}_1 + jx_{12}\dot{I}_2; \\ -U_2 &= r_2\dot{I}_2 + jx_{22}\dot{I}_2 + jx_{12}\dot{I}_1, \end{aligned}}$$

$$\boxed{\begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + L_{11}\frac{di_1}{dt} + M\frac{di_2}{dt}; \\ u_2 &= -r_2 i_2 - L_{22}\frac{di_2}{dt} - M\frac{di_1}{dt}. \end{aligned}}$$

$$x_{11} = \omega L_{11}; \quad x_{22} = \omega L_{22}; \quad x_{12} = \omega M$$

Приведение вторичной обмотки к первичной

Представим себе, что реальная вторичная обмотка трансформатора с числом витков w_2 заменена воображаемой, или приведенной, обмоткой с числом витков $w_2' = w_1$. При этом число витков вторичной обмотки изменится в

$$\boxed{k = \frac{w_2'}{w_2} = \frac{w_1}{w_2}}$$

раз. Величина k называется коэффициентом приведения или трансформации.

В результате такой замены, или приведения, э. д. с. E_2' и напряжение U_2' приведенной обмотки также изменяются в k раз по сравнению с величинами E_2 и U_2 реальной вторичной обмотки:

$$\boxed{\dot{E}_2' = k\dot{E}_2; \quad \dot{U}_2' = k\dot{U}_2.}$$

Чтобы мощности приведенной и реальной обмоток при всех режимах работы были равны, необходимо соблюдать равенство

$$\dot{U}_2'\dot{I}_2' = \dot{U}_2\dot{I}_2,$$

где I_2' — приведенный вторичный ток. Отсюда

$$\boxed{I_2' = \dot{I}_2/k.}$$

Приведение вторичной обмотки к первичной

сделаем в уравнениях напряжения трансформатора подстановки:

$$\dot{U}_2 = U_2'/k, \quad \dot{I}_2 = k\dot{I}_2',$$

что в математическом отношении соответствует переходу от исходных реальных переменных U_2, $\dot{I}_2$ к новым (приведенным) переменным U_2', $\dot{I}_2'$. Умножив при этом второе из уравнений на k, получим

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1\dot{I}_1 + jx_{11}\dot{I}_1 + jkx_{12}\dot{I}_2'; \\ -U_2' &= k^2 r_2 \dot{I}_2' + jk^2 x_{22}\dot{I}_2' + jkx_{12}\dot{I}_1. \end{aligned}\right\}$$

При переходе к электрической связи двух цепей в соответствующей схеме замещения должна появиться общая для обеих цепей ветвь, которая обтекается суммой токов обеих цепей $\dot{I}_1 + \dot{I}_2'$. Соответственно этому в уравнениях напряжений этих цепей должны появиться одинаковые члены с множителями $(\dot{I}_1 + \dot{I}_2')$. Из уравнений видно, что для получения в них таких членов нужно прибавить к первому из этих уравнений и вычесть из него член $jkx_{12}\dot{I}_1$ и прибавить ко второму и вычесть из него член $jkx_{12}\dot{I}_2'$. При этом получим

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= r_1\dot{I}_1 + j(x_{11} - kx_{12})\dot{I}_1 + jkx_{12}(\dot{I}_1 + \dot{I}_2'); \\ -U_2' &= k^2 r_2 \dot{I}_2' + j(k^2 x_{22} - kx_{12})\dot{I}_2' + jkx_{12}(\dot{I}_1 + \dot{I}_2'). \end{aligned}\right\}$$

Приведение вторичной обмотки к первичной

Введем следующие наименования и обозначения:

1) приведенное активное сопротивление вторичной обмотки

$$\boxed{r_2' = k^2 r_2,}$$

2) приведенное взаимное индуктивное сопротивление

$$\boxed{x_{12}' = k x_{12};}$$

3) индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки

$$\boxed{x_1 = x_{11} - k x_{12};}$$

Уравнения напряжений приведенного трансформатора

$$x_1 = x_{11} - kx_{12};$$

4) приведенное индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки

$$x_2' = k^2 x_{22} - kx_{12} = x_{22}' - x_{12}' = k^2 x_2,$$

где

$$x_2 = x_{22} - \frac{x_{12}}{k}$$

представляет собой неприведенное индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки.

Введя перечисленные приведенные величины в уравнения, получим уравнения напряжения приведенного трансформатора:

$$\dot{U}_1 = r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1 + jx_{12}' (\dot{I}_1 + \dot{I}_2');$$
$$-\dot{U}_2' = r_2' \dot{I}_2' + jx_2' \dot{I}_2' + jx_{12}' (\dot{I}_1 + \dot{I}_2').$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1 \;;$$
$$\dot{U}_2^1 = \dot{E}_2^1 - \dot{I}_2^1 r_2^1 - j\dot{I}_2^1 x_2^1 \;;$$

Схема замещения двухобмоточного трансформатора без учета магнитных потерь

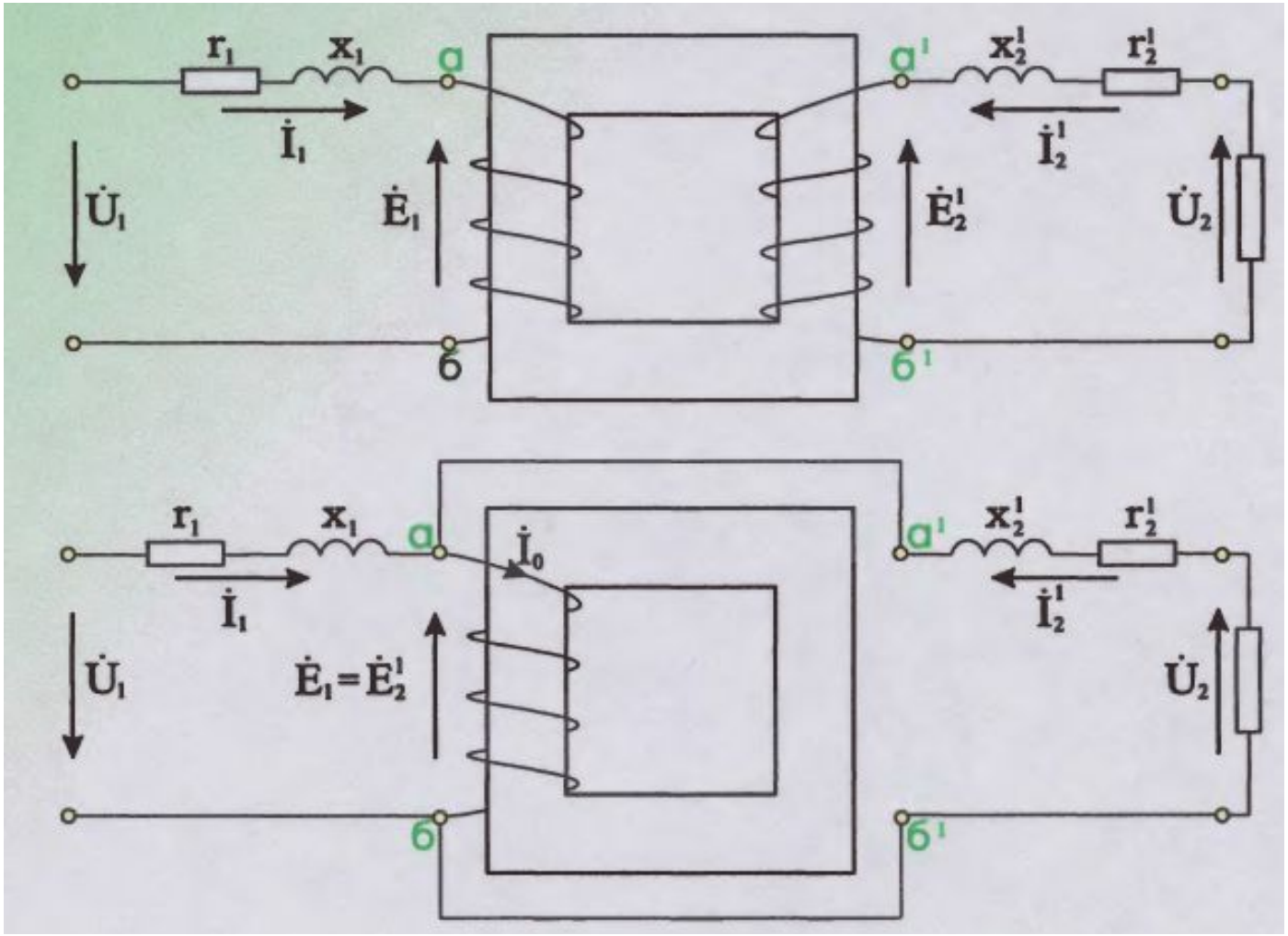
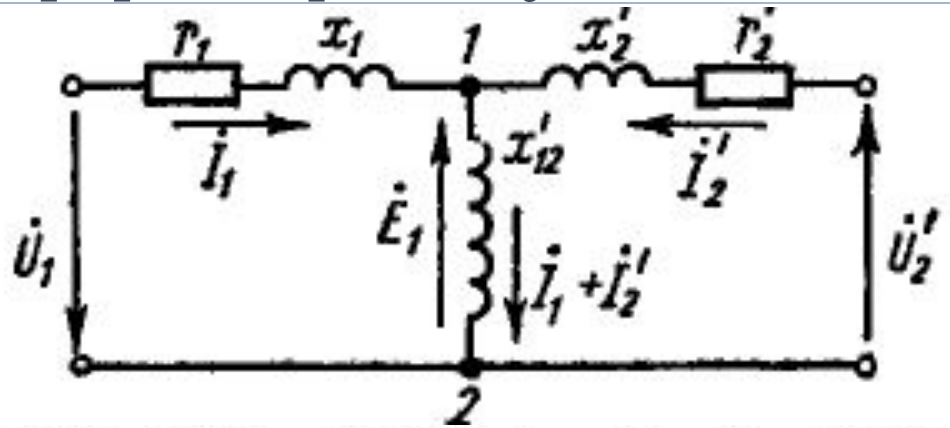


Схема замещения двухобмоточного трансформатора без учета магнитных потерь



$$\dot{U}_1 = r_1\dot{I}_1 + jx_1\dot{I}_1 + jx_{12}'(\dot{I}_1 + \dot{I}_2');$$
$$-\dot{U}_2' = r_2'\dot{I}_2' + jx_2'\dot{I}_2' + jx_{12}'(\dot{I}_1 + \dot{I}_2').$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1$$

$$\dot{U}_2^1 = \dot{E}_2^1 - \dot{I}_2^1 r_2^1 - j\dot{I}_2^1 x_2^1$$

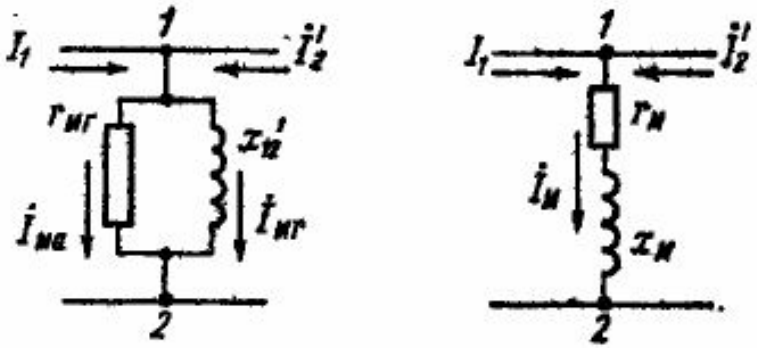
$$\dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}_2^1$$

Схема замещения двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь

Схема замещения с учетом магнитных потерь. Потери в стали сердечника $p_{мг}$ при заданной частоте пропорциональны следующим величинам:

$$p_{мг} \sim B_c^2 \sim \Phi_c^2 \sim E_1^2.$$

Таким образом, потери $p_{мг}$ пропорциональны квадрату напряжения U_{12} на зажимах *1—2* намагничивающей цепи схемы замещения.



Намагничивающая цепь схемы замещения с учетом магнитных потерь

Если к этим зажимам параллельно x_{12}' подключить активное сопротивление $r_{мг}$, как показано на рис.

то потери в этом сопротивлении также будут пропорциональны U_{12}^2. Величину сопротивления $r_{мг}$ можно подобрать так, чтобы потери в нем равнялись магнитным потерям:

$$p_{мг} = \frac{m_1 U_{12}^2}{r_{мг}} = \frac{m_1 E_1^2}{r_{мг}}.$$

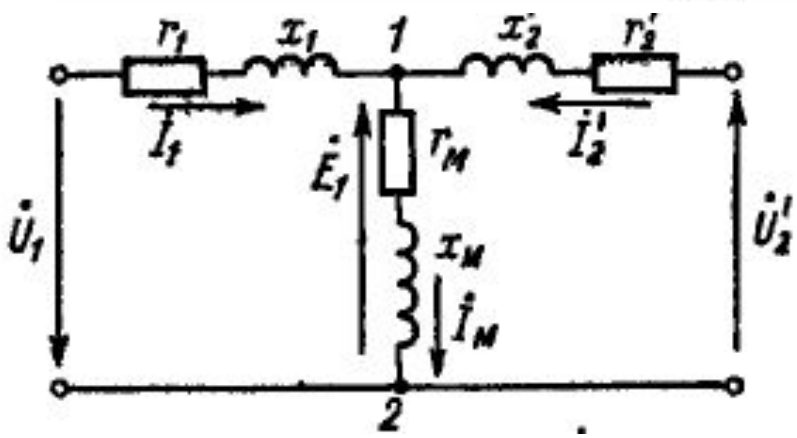
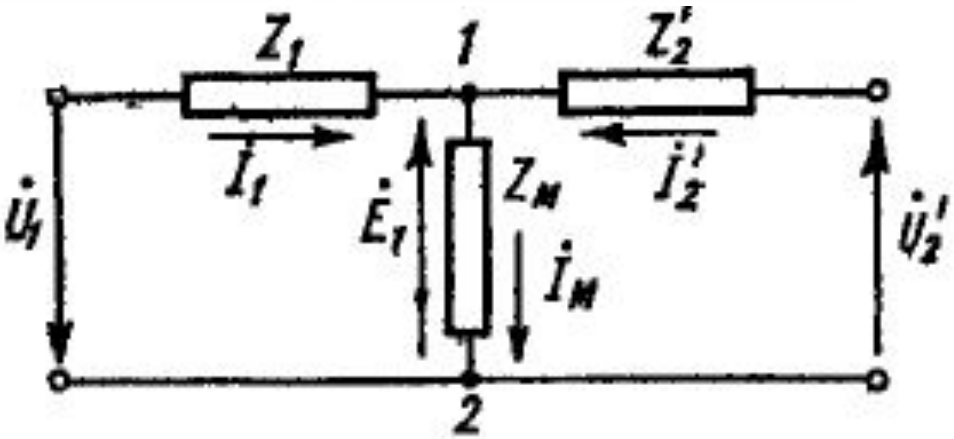
Отсюда

$$r_{мг} = \frac{m_1 E_1^2}{p_{мг}}.$$

Схема замещения двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь

Схема с двумя параллельными ветвями намагничивающей цепи хорошо согласовывается с реальными физическими явлениями. Однако расчеты на основе схемы замещения вести удобнее, если объединить две параллельные ветви схемы в одну общую ветвь Тогда сопротивление этой ветви

$$Z_м = \frac{r_{мг} j x'_{12}}{r_{мг} + j x'_{12}} = \frac{r_{мг} x'^2_{12}}{r^2_{мг} + x'^2_{12}} + j \frac{r^2_{мг} x'_{12}}{r^2_{мг} + x'^2_{12}} = r_м + j x_м$$

Так как $r_{мг} \gg x'_{12}$, то

$$r_м \approx \frac{x'^2_{12}}{r_{мг}}; \quad x_м \approx x'_{12}$$