ТРАНСФОРМАТОРЫ

Назначение и области применения

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно-связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

Трансформаторы широко используются в промышленности и быту для различных целей:

1. Для передачи и распределения электрической энергии

2. Для обеспечения нужной схемы включения вентилей в преобразовательных устройствах и согласования напряжения на выходе и входе преобразователя. *Трансформаторы, применяемые для этих целей, называются преобразовательными.*

3. Для различных технологических целей: сварки (сварочные трансформаторы), питания электротермических установок (электропечные трансформаторы) и др.

4. Для питания различных цепей радиоаппаратуры, электронной аппаратуры, устройств связи и автоматики, электробытовых приборов, для разделения электрических цепей различных элементов указанных устройств, для согласования напряжения и пр.

5. Для включения электроизмерительных приборов и некоторых аппаратов (реле и др.) в электрические цепи высокого напряжения или же в цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности. *Трансформаторы, применяемые для этих целей, называются измерительными.*

Классификацию трансформаторов можно произвести по нескольким признакам:

1. **По назначению** трансформаторы разделяют на силовые общего и специального применения.

Силовые трансформаторы общего применения используются в линиях передачи и распределения электроэнергии.
Для режима их работы характерна частота переменного тока 50 Гц и очень малые отклонения первичного и вторичного напряжений от номинальных значений.

К ***трансформаторам специального назначения*** относятся силовые специальные (печные, выпрямительные, сварочные, радиотрансформаторы), измерительные и испытательные трансформаторы, трансформаторы для преобразования числа фаз, формы кривой ЭДС, частоты и т.д.

НТ-12 трансформатор силовой сухой для испытаний токовых расцепителей автоматических выключателей

ОМ трансформатор силовой масляный для питания аппаратуры железнодорожной блокировки

2. **По виду охлаждения** – с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением.

3. **По числу фаз на первичной стороне** – однофазные и трёхфазные.

4. **По форме магнитопровода** – стержневые, броневые, тороидальные.

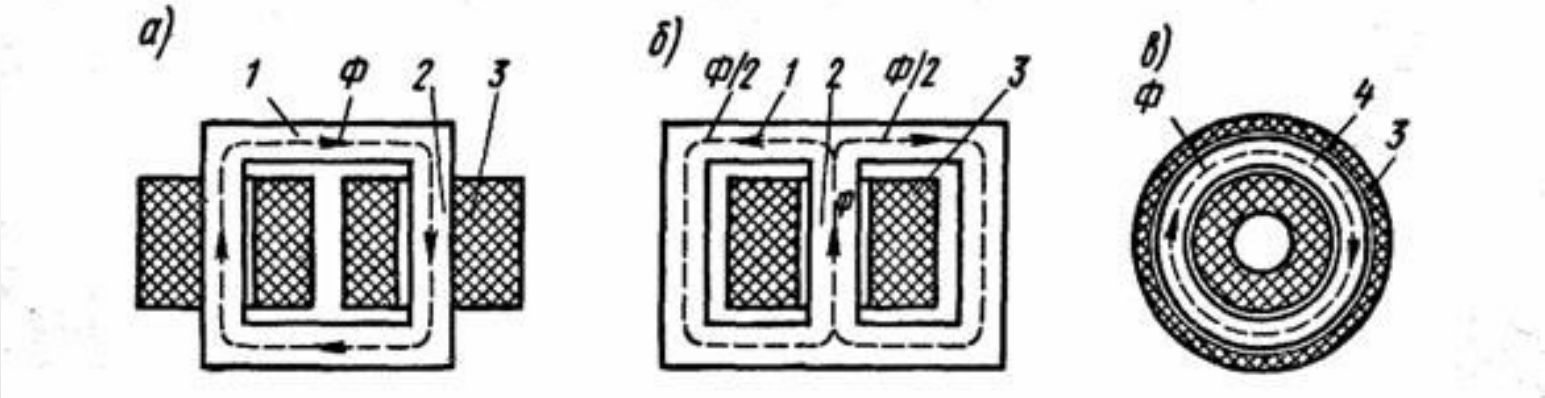
5. **По числу обмоток на фазу** – двухобмоточные, трёхобмоточные, многообмоточные (более трёх обмоток).

6. **По конструкции обмоток** – с концентрическими и чередующимися (дисковыми) обмотками.

Устройство трансформаторов

Магнитная система. В зависимости от конфигурации магнитной системы, трансформаторы подразделяют на стержневые (а), броневые (б) и тороидальные (в).

Стержнем называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки (2). Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называют ***ярмом*** (1). Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия



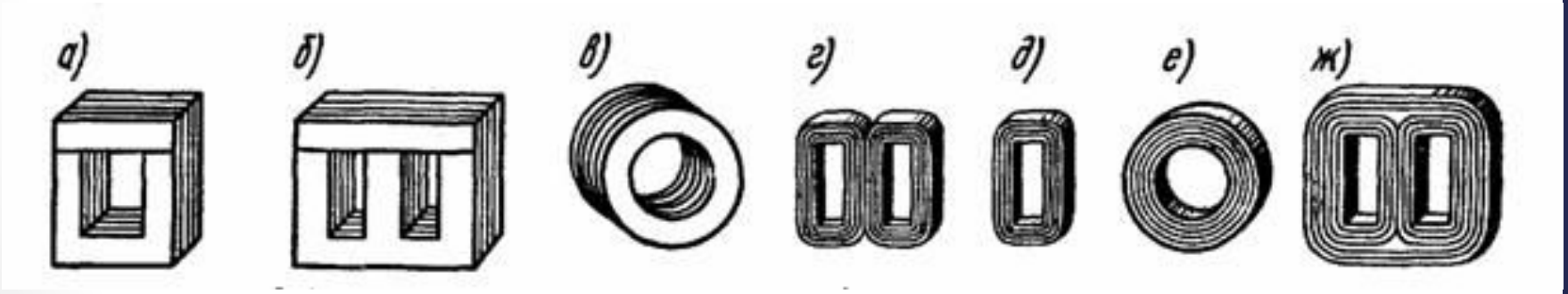
Для уменьшения потерь от вихревых токов, магнитопроводы трансформаторов собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,28-0,5 мм при частоте 50 Гц.

Трансформаторы малой мощности и микротрансформаторы часто выполняют броневыми, так как они имеют более низкую стоимость по сравнению со стержневыми трансформаторами из-за меньшего числа катушек и упрощения сборки и изготовления.

Применяют также и маломощные трансформаторы стержневого типа с одной или двумя катушками (3). Преимущество тороидальных трансформаторов – отсутствие в магнитной системе (4) воздушных зазоров, что значительно уменьшает магнитное сопротивление магнитопровода.

В трансформаторах малой мощности магнитопровод собирают из штамповых пластин П-, Ш- и О- образной формы (а, б, в).

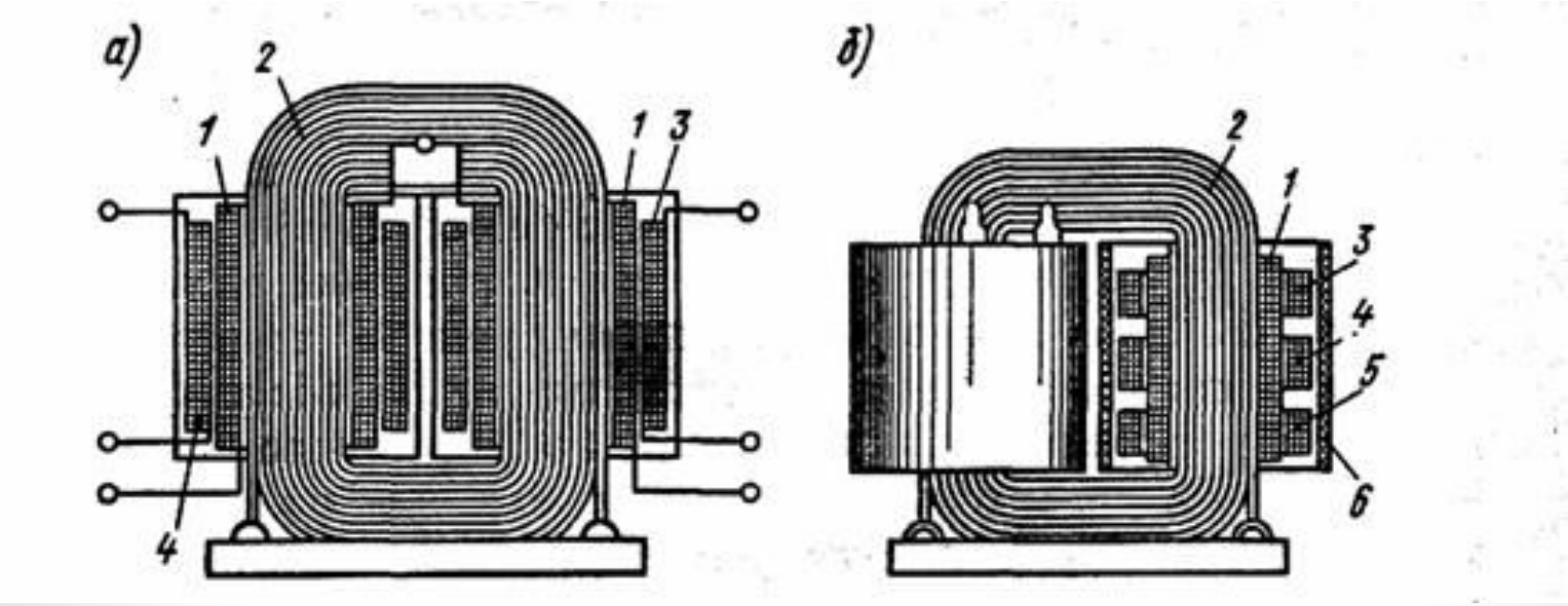
Широкое применение получили магнитопроводы, навитые из узкой ленты электротехнической стали или из специальных железоникелевых сплавов типа пермаллой. Их можно использовать для стержневых, броневых, тороидальных и трёхфазных трансформаторов (г, д, е, ж).



Монолитность конструкции ленточного магнитопровода обеспечивается путём применения клеящих лаков и эмалей.

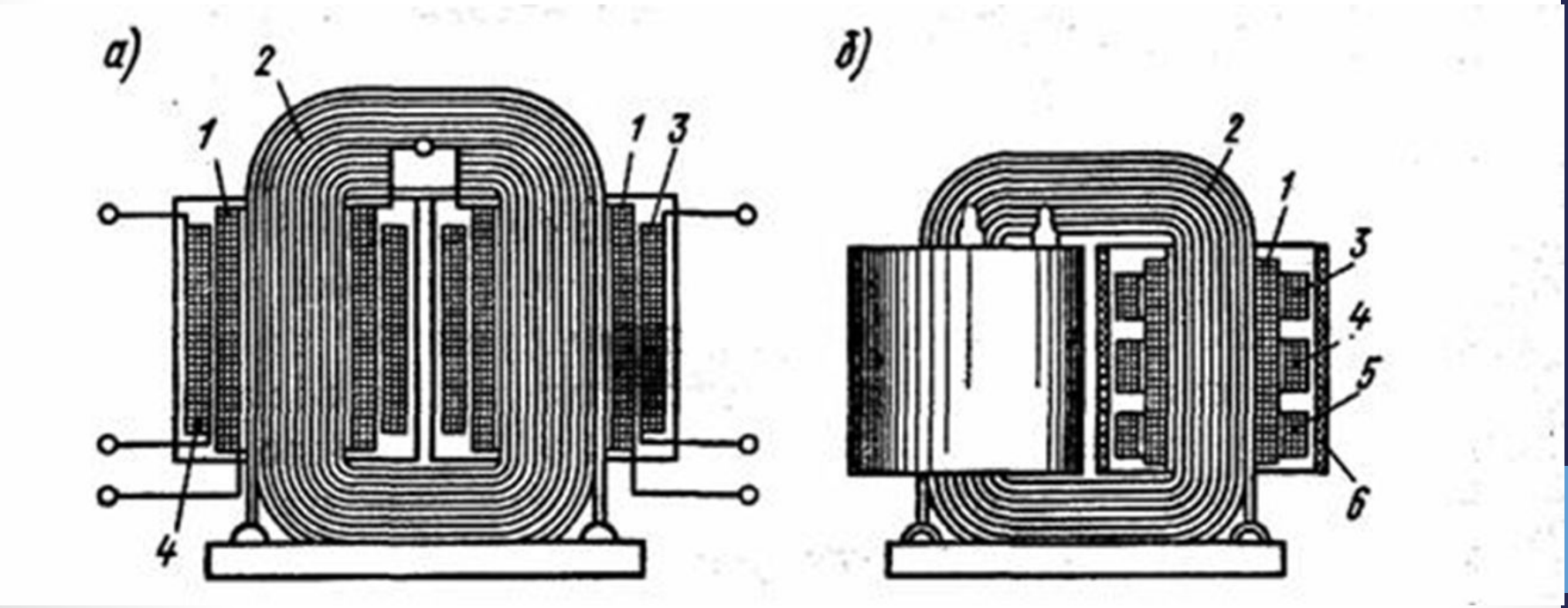
Для трансформаторов, работающих при частоте 400 и 500 Гц, магнитопроводы выполняют из специальных сортов электротехнической стали с малыми удельными потерями при повышенной частоте, а также из железоникелевых сплавов типа пермаллой, которые имеют большие начальную и максимальную магнитные проницаемости и позволяют получить магнитные поля с большой индукцией при сравнительно слабой напряжённости. Толщина листов составляет 0.2; 0,15; 0.1 и 0.08 мм. При частотах более 10-20 кГц магнитопроводы прессуют из порошковых материалов (магнитодиэлектриков и ферритов).

Обмотки. В современных трансформаторах первичную (1) и вторичную (3, 4, 5) обмотки стремятся расположить для лучшей магнитной связи как можно ближе одну к другой. При этом на каждом стержне магнитопровода (2) размещают обе обмотки либо концентрически – одну поверх другой (а), либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующиеся по высоте стержня (б).



В первом случае обмотки называют *концентрическими*, во втором – *чередующимися*.

В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причём ближе к стержням располагают обмотку НН, требующей меньшей изоляции относительно остова трансформатора, а снаружи – обмотку ВН.



В трансформаторах малой мощности и микротрансформаторах используют однослойные и многослойные обмотки из круглого провода с эмалевой или хлопчатобумажной изоляцией, которые наматывают на гильзу или на каркас из электрокартона; между слоями проводов прокладывают изоляцию из кабельной бумаги или ткани.

В микротрансформаторах часто выполняют из алюминиевой фольги толщиной 30-20 мкм. Изоляцией здесь служит окисная плёнка фольги, которая обладает достаточной теплоёмкостью, теплопроводностью и может выдерживать рабочее напряжение до 100 В.

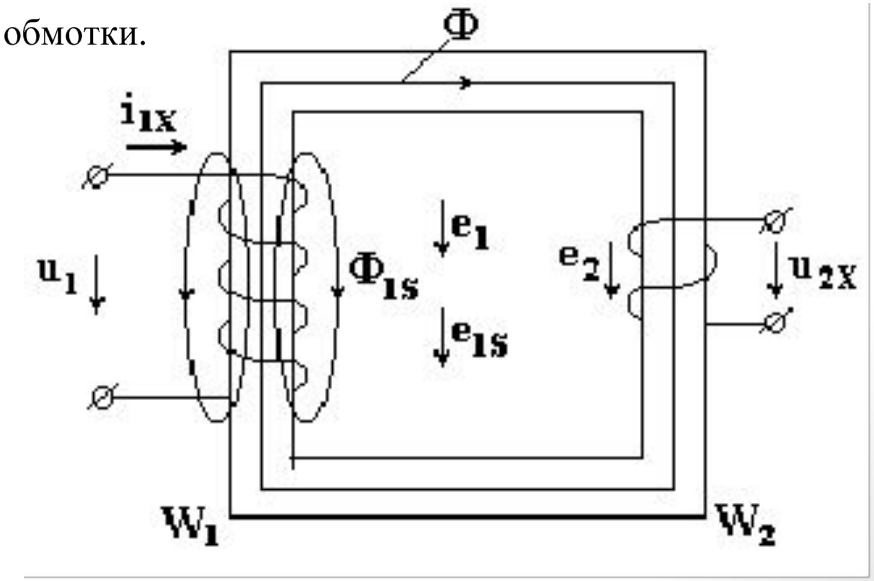
Работа трансформатора в режиме холостого хода

Под холостым ходом трансформатора понимается режим его работы при разомкнутой вторичной обмотке.

Первичная обмотка трансформатора подключена к источнику переменного напряжения. Ток i_{1X} первичной обмотки создает переменное магнитное поле, намагничивающее сердечник трансформатора.

Магнитный поток в трансформаторе разделим на две части: основной магнитный поток Φ, замыкающийся в сердечнике, и поток рассеяния Φ_{1S}, замыкающийся частично по воздуху.

W_1 - число витков первичной обмотки; W_2 - число витков вторичной обмотки; R_1 - активное сопротивление первичной обмотки.



Определим ЭДС, индуктированную в первичной обмотке трансформатора основным магнитным потоком.

$$e_1 = -W_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}.$$

Основной магнитный поток изменяется по синусоидальному закону

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t,$$

где Φ_m - максимальное или амплитудное значение основного магнитного потока; $\omega = 2\pi f$ - угловая частота; f - частота переменного напряжения.

Мгновенное значение ЭДС

$$e = -W_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t = W_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega t - 90^{\circ})$$

Максимальное значение

$$E_{1m} = W_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m = 2\pi \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_m.$$

Действующее значение ЭДС в первичной обмотке

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_m = 4.44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_m.$$

Для вторичной обмотки можно получить аналогичную формулу

$$E_2 = 4.44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \Phi_m .$$

Электродвижущие силы E_1 и E_2, индуктированные в обмотках трансформатора основным магнитным потоком, называются трансформаторными ЭДС.

Трансформаторные ЭДС отстают по фазе от основного магнитного потока на 90°. Магнитный поток рассеяния индуктирует в первичной обмотке ЭДС рассеяния

$$e_{1S} = -L_{1S} \cdot \frac{di_{1X}}{dt},$$

где L_{1S} - индуктивность рассеяния в первичной обмотке.

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для первичной обмотки

$$e_1 + e_{1S} = -U_1 + i_{1X} \cdot R_1,$$

откуда

$$U_1 = -e_1 - e_{1S} + i_{1X} \cdot R_1 = -e_1 + i_{1X} \cdot R + L_{1S} \frac{di_{1X}}{dt}. \quad (1)$$

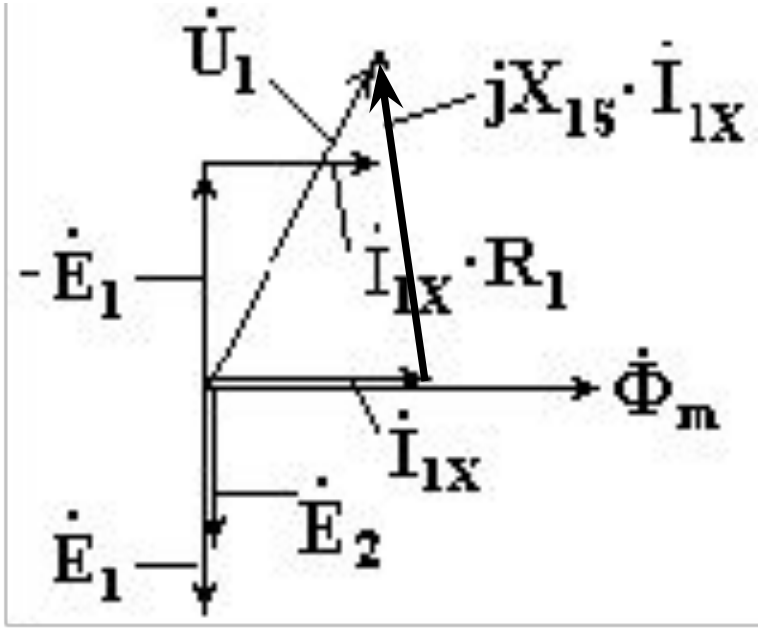
Напряжение на первичной катушке имеет три слагаемых: падение напряжения, напряжение, уравновешивающее трансформаторную ЭДС, напряжение, уравновешивающее ЭДС рассеяния.

Запишем уравнение (1) в комплексной форме

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{1X} \cdot R_1 + j\omega L_{1S} \cdot \dot{I}_{1X} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{1X} \cdot R_1 + jX_{1S} \cdot \dot{I}_{1X}. \quad (2)$$

где $X_{1S} = \omega \cdot L_{1S}$ - индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки.

На рисунке изображена векторная диаграмма трансформатора, работающего в режиме холостого хода.



Векторы трансформаторных ЭДС $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ отстают на 90° от вектора основного магнитного потока Φ_m. Вектор напряжения $\dot{I}_{1X} \cdot R$ параллелен вектору тока $\dot{I}_{1X}$, а вектор $jX_{1S} \cdot \dot{I}_{1X}$ опережает вектор тока $I \cdot_{1X}$ на 90°. Вектор напряжения на зажимах первичной обмотки трансформатора $\dot{U}_1$ равен геометрической сумме векторов - $\dot{E}_1$, $\dot{I}_{1X} \cdot R_1$, $jX_{1S} \cdot \dot{I}_{1X}$.

На данном рисунке изображена схема замещения трансформатора, соответствующая уравнению (2).

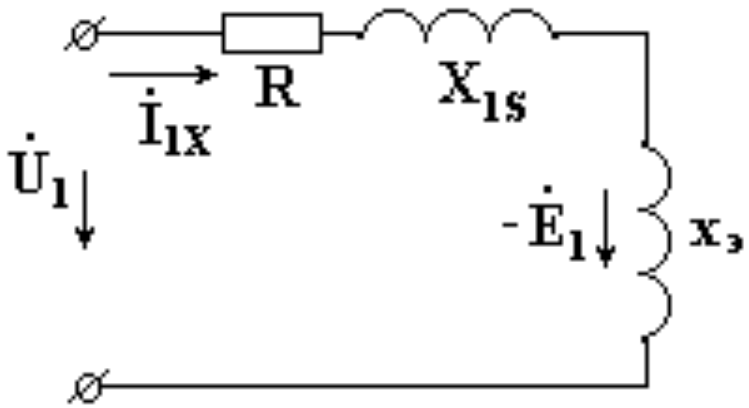
$X_Э$ - индуктивное сопротивление, пропорциональное реактивной мощности, затрачиваемой на создание основного магнитного потока.

В режиме холостого хода

$$U_{2X} = E_2, \quad U_1 \approx E_1.$$

Коэффициент трансформации

$$K_T = \frac{E_1}{E} = \frac{W_1}{W} \approx \frac{U_1}{U}.$$



Коэффициент трансформации экспериментально определяется из опыта холостого хода.

Работа трансформатора под нагрузкой

Если к первичной обмотке трансформатора подключить напряжение U_1, а вторичную обмотку соединить с нагрузкой, в обмотках появятся токи I_1 и I_2.

Эти токи создадут магнитные потоки Φ_1 и Φ_2, направленные навстречу друг другу. Суммарный магнитный поток в магнитопроводе уменьшается.

Вследствие этого индуктированные суммарным потоком ЭДС E_1 и E_2 уменьшаются. Действующее значение напряжения U_1 остается неизменным.

Уменьшение E_1, согласно (2), вызывает увеличение тока I_1. При увеличении тока I_1 поток Φ_1 увеличивается ровно настолько, чтобы скомпенсировать размагничивающее действие потока Φ_2.

Вновь восстанавливается равновесие при практически прежнем значении суммарного потока.

В нагруженном трансформаторе, кроме основного магнитного потока, имеются потоки рассеяния Φ_{1S} и Φ_{2S}, замыкающиеся частично по воздуху. Эти потоки индуктируют в первичной и вторичной обмотках ЭДС рассеяния.

$$\dot{E}_{1S} = -jX_{1S} \cdot \dot{I}_1, \quad \dot{E}_{2S} = -jX_{2S} \cdot \dot{I}_2 ,$$

где X_{2S} - индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки.

Для первичной обмотки можно записать уравнение

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_1 + jX_{1S} \cdot \dot{I}_1 \qquad (3)$$

Для вторичной обмотки

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_1 \cdot R_2 + jX_{2S} \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_2 \cdot Z_H , \qquad (4)$$

где R_2 - активное сопротивление вторичной обмотки; Z_H - сопротивление нагрузки.

Трансформаторная ЭДС E_1, пропорциональная основному магнитному потоку, приблизительно равна напряжению на первичной катушке U_1.

Действующее значение напряжения постоянно.
Поэтому основной магнитный поток трансформатора остается неизменным при изменении сопротивления нагрузки от нуля до бесконечности.

Если $\Phi_m = const$, то и сумма магнитодвижущих сил трансформатора

$$\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2 = const = \dot{I}_{1X} \cdot W_1 \quad \dot{E}_{1S} = -jX_{1S} \cdot \dot{I}_1. \qquad (5)$$

Уравнение (5) называется ***уравнением равновесия магнитодвижущих сил***.
Уравнения (3), (4), (5) называются ***основными уравнениями трансформатора***.

Из уравнения (5) получим формулу

$$\dot{I}_1 = I_{1X} - \dot{I}_2 \cdot \frac{W_2}{W_1} = \dot{I}_{1X} - \dot{I}_2 \cdot \frac{1}{K_T}. \qquad (6)$$

Согласно формуле (6), ток в первичной обмотке складывается из тока холостого хода, или намагничивающего тока, и тока, компенсирующего размагничивающее действие вторичной обмотки.

Умножим левую и правую части уравнения (4) на коэффициент трансформации K_T

$$\dot{E}_2 \cdot K_T = \dot{E}_1 = K_T \cdot \dot{I}_2 \cdot R_2 + j \cdot K_T \cdot X_{2S} \cdot \dot{I}_2 + K_T \cdot \dot{I}_2 \cdot Z_H =$$

$$= K_T^2 \cdot R_2 \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + j \cdot K_T^2 \cdot X_{2S} \frac{\dot{I}_2}{K_T} + K_T^2 \cdot Z_H \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} = \qquad . \qquad (7)$$

$$= R'_2 \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + jX'_{2S} \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + Z'_H \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T}$$

где $R'_2 = K_2^T \cdot R_2$ приведенное активное сопротивление вторичной обмотки;

$X'_{2S} = K_T^2 \cdot X_{2S}$ приведенное индуктивное сопротивление вторичной обмотки;

$U'_2 = K_T \cdot \dot{I}_2 \cdot Z_H = K_T \cdot \dot{U}_2$ приведенное напряжение на нагрузке;

$Z'_H = K_T^2 \cdot Z_H$ приведенное сопротивление нагрузки.

Величиной намагничивающего тока можно пренебречь, так как она мала по сравнению с током первичной обмотки трансформатора в нагрузочном режиме $\dot{I}_{1X} \approx 0$, тогда $\dot{I}_1 = -\frac{1}{K_T} \cdot \dot{I}_2$.

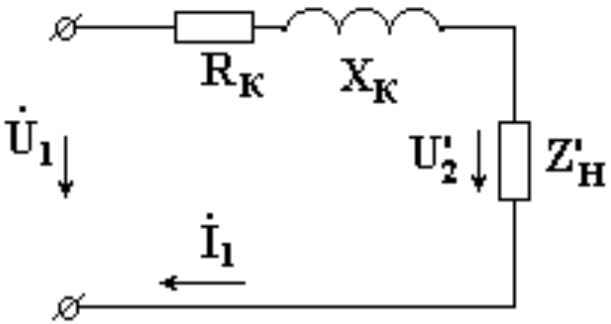
Подставим уравнение (7) в уравнение (3). Получим

$$\dot{U}_1 = -\frac{\dot{I}_2}{K_T} \cdot R'_2 - j\frac{\dot{I}_2}{K_T} \cdot X'_{2S} - \frac{\dot{I}_2}{K_T} \cdot Z'_H + \dot{I}_1 \cdot R_1 + j \cdot X_{1S} \cdot \dot{I}_1 =$$

$$= \dot{I}_1 \cdot R'_2 + j\dot{I}_1 \cdot X'_{2S} + \dot{U}'_2 + \dot{I}_1 \cdot R_1 + j \cdot X_{1S} \cdot \dot{I}_1 = \qquad (8)$$

$$= \dot{I}_1(R_1 + R'_2) + j \cdot \dot{I}_1 \cdot (X_{1S} + X'_{2S}) + \dot{U}'_2$$

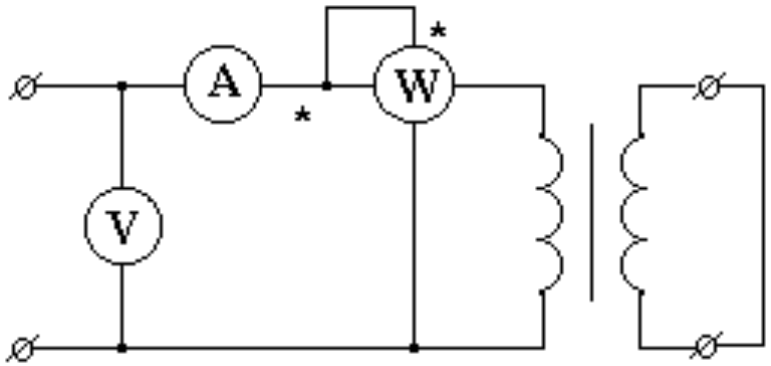
Уравнению (8) соответствует упрощенная схема замещения трансформатора, изображенная на рисунке:



$R_K = R_1 + R'_2 = R_1 + R_2 \cdot K_T^2$ активное сопротивление короткого замыкания трансформатора, $X_K = X_{1S} + X'_{2S} = X_{1S} + X_{2S} \cdot K_T^2$ индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Параметры упрощенной схемы замещения определяются из опыта короткого замыкания.

Для этого собирается схема:



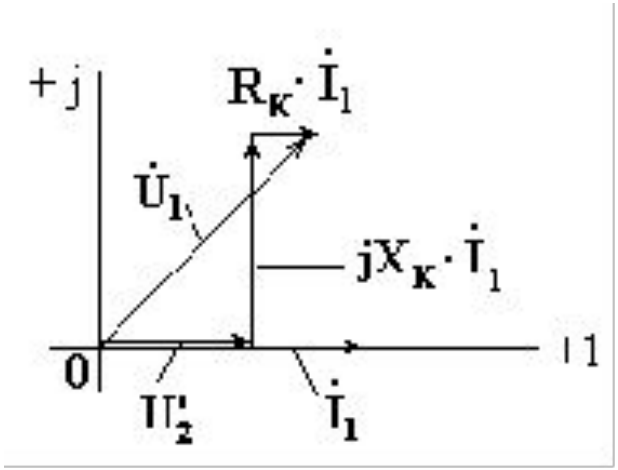
Зажимы вторичной обмотки замыкаются накоротко. Измеряют напряжение, ток и мощность: U_{1K}, I_{1K}, P_K. Опыт короткого замыкания осуществляется при пониженном напряжении на первичной обмотке.

Затем вычисляют

$$R_K = \frac{P_K}{I_{2K}^2}, \quad Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},.$$

где Z_K - полное сопротивление короткого замыкания.

На рисунке изображена векторная диаграмма трансформатора, соответствующая упрощенной схеме замещения. Нагрузкой трансформатора является активное сопротивление $R_Н$.



Вектор тока $\dot{I}_1$ совмещен с вещественной осью комплексной плоскости. Вектор напряжения на сопротивлении нагрузки совпадает с вектором тока по направлению. Вектор напряжения на индуктивном сопротивлении $jX_K \cdot \dot{I}_1$ перпендикулярен, а вектор напряжения $R_K \cdot \dot{I}_1$ параллелен вектору тока. Вектор напряжения на входе трансформатора равен сумме трех векторов напряжения.

Упрощенная схема используется для расчета цепей, содержащих трансформаторы.