

# Лекция 11

## II.

# Магнитные цепи и электромагнитные устройства

# Трансформатор

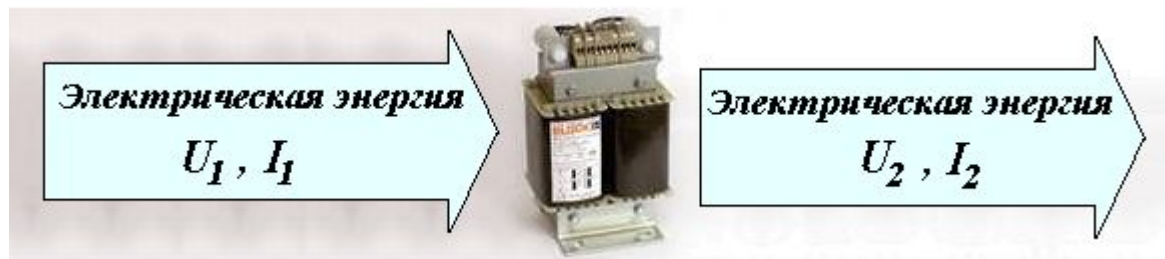


# Содержание

- 1. Основные понятия. Назначение, области применения трансформатора.**
- 2. Устройство, принцип действия трансформатора.**
- 3. Уравнения состояния трансформатора.**
- 4. Особенности реального трансформатора.**
- 5. Внешняя характеристика трансформатора.**
- 6. Режимы работы трансформатора.**

# 1. Основные понятия. Назначение, области применения трансформатора.

**Трансформатор** – это статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения



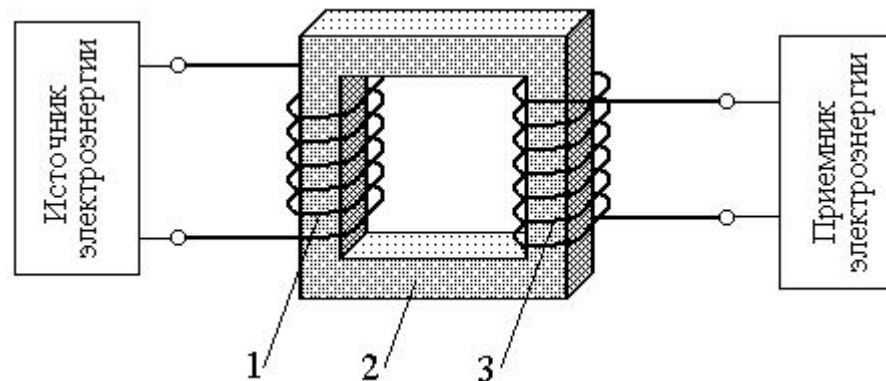
Силовые трансформаторы промышленных электрических сетей.  
Печные и сварочные трансформаторы.  
Измерительные трансформаторы  
Автотрансформаторы  
Силовые трансформаторы малой и средней мощности  
и др.



## 2. Устройство, принцип действия трансформатора.

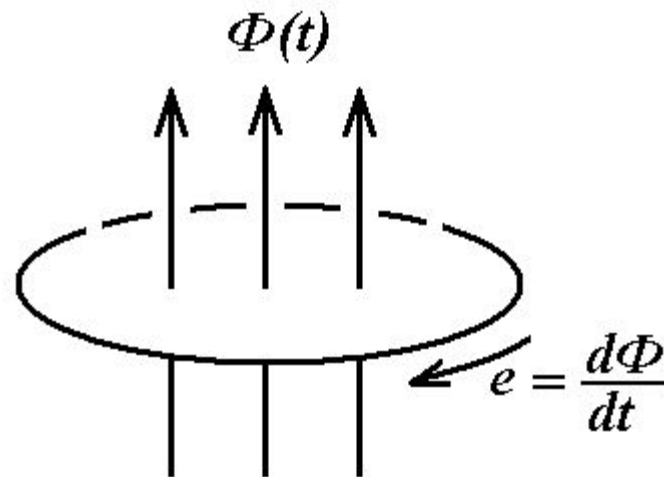
### Основные элементы конструкции трансформатора

- 1 - Первичная обмотка ( $w_1$ )
- 2 - Магнитопровод (ферромагнитный сердечник)
- 3 - Вторичная обмотка ( $w_2$ )



## 2. Устройство, принцип действия трансформатора.

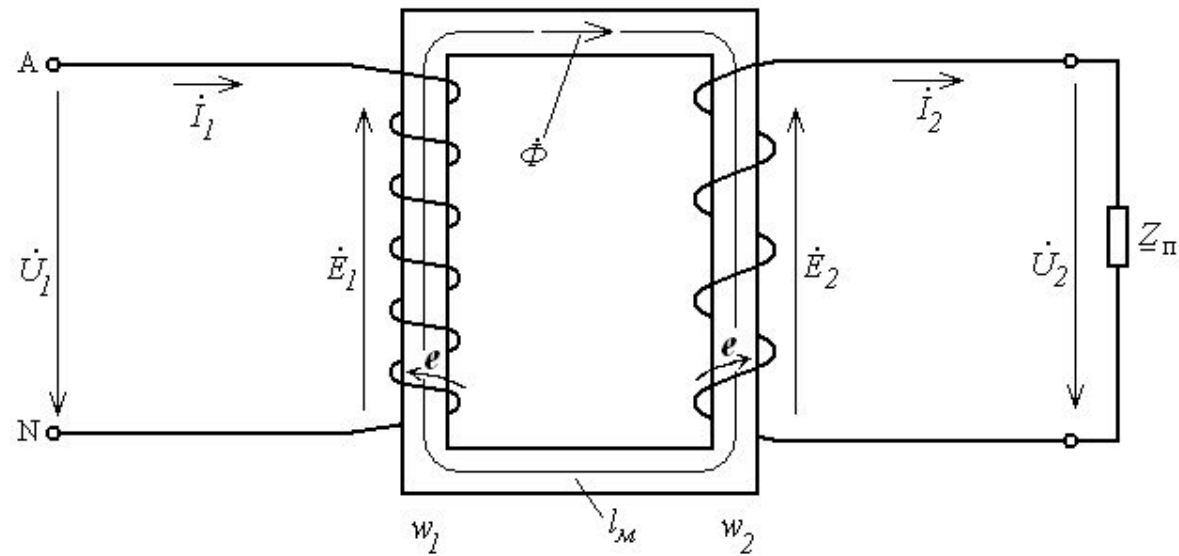
### Закон электромагнитной индукции Фарадея



ЭДС электромагнитной индукции  $e$  в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур

## 2. Устройство, принцип действия трансформатора.

Принцип действия (Идеальный трансформатор)



$$\dot{U}_1 \rightarrow \dot{I}_1 \rightarrow \dot{F} \rightarrow \dot{\Phi} \rightarrow \dot{e} = \frac{d\dot{\Phi}}{dt} \rightarrow \begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{e}w_1 \rightarrow \dot{U}_1 = \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 = \dot{e}w_2 \rightarrow \dot{U}_2 = \dot{E}_2 \rightarrow \dot{I}_2 \end{cases}$$

Коэффициент трансформации

$$k_T = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{ew_1}{ew_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

## 2. Устройство, принцип действия трансформатора.

Коэффициент трансформации

$$k_T = U_1 / U_2 = w_1 / w_2$$

$w_2 < w_1$ ;  $U_2 < U_1$ ;  $k_T > 1$  – понижающий трансформатор

$w_2 > w_1$ ;  $U_2 > U_1$ ;  $k_T < 1$  – повышающий трансформатор

$w_2 = w_1$ ;  $U_2 = U_1$ ;  $k_T = 1$  – разделительный трансформатор

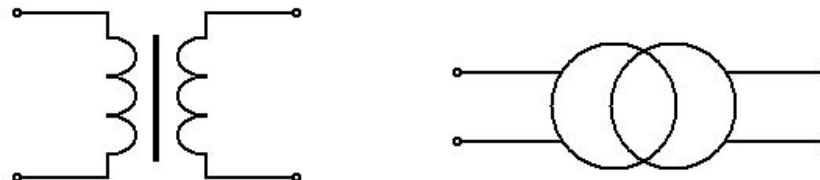
### Пример

Трансформатор, имеющий номинальное первичное напряжение  $U_{1ном} = 220\text{В}$ , число витков первичной обмотки  $w_1 = 1300$  витков и число витков вторичной обмотки  $w_2 = 213$  витков,

обладает коэффициентом трансформации  $k_T = 1300 / 213 = 6,1$   
(понижающий трансформатор)

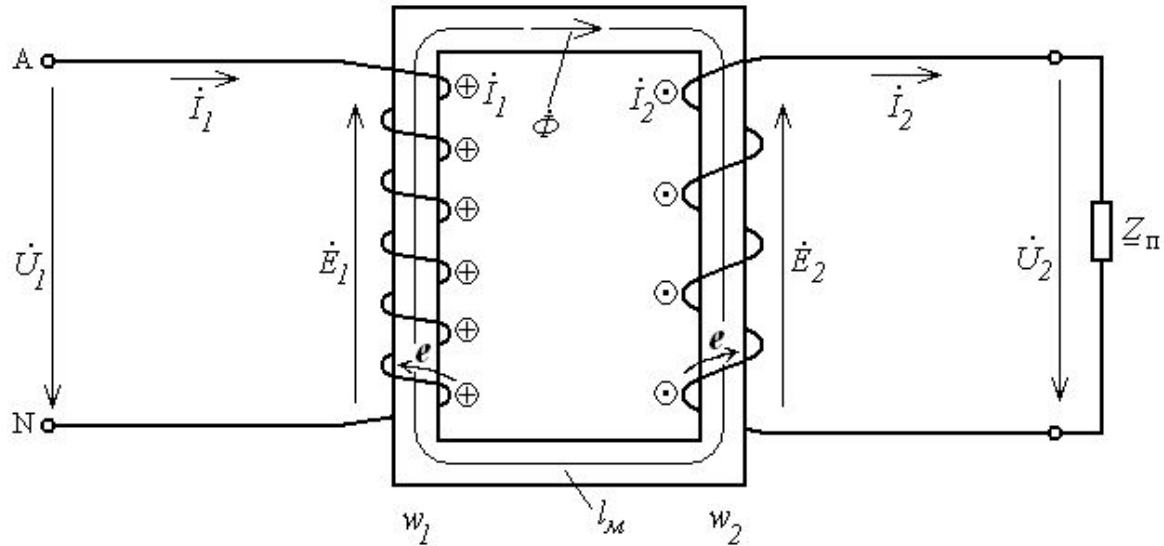
и создает вторичное напряжение  $U_2 = 220 / 6,1 = 36\text{В}$ .

Условное обозначение трансформатора в схемах электрических цепей



### 3. Уравнения состояния трансформатора.

#### Уравнение магнитного состояния трансформатора



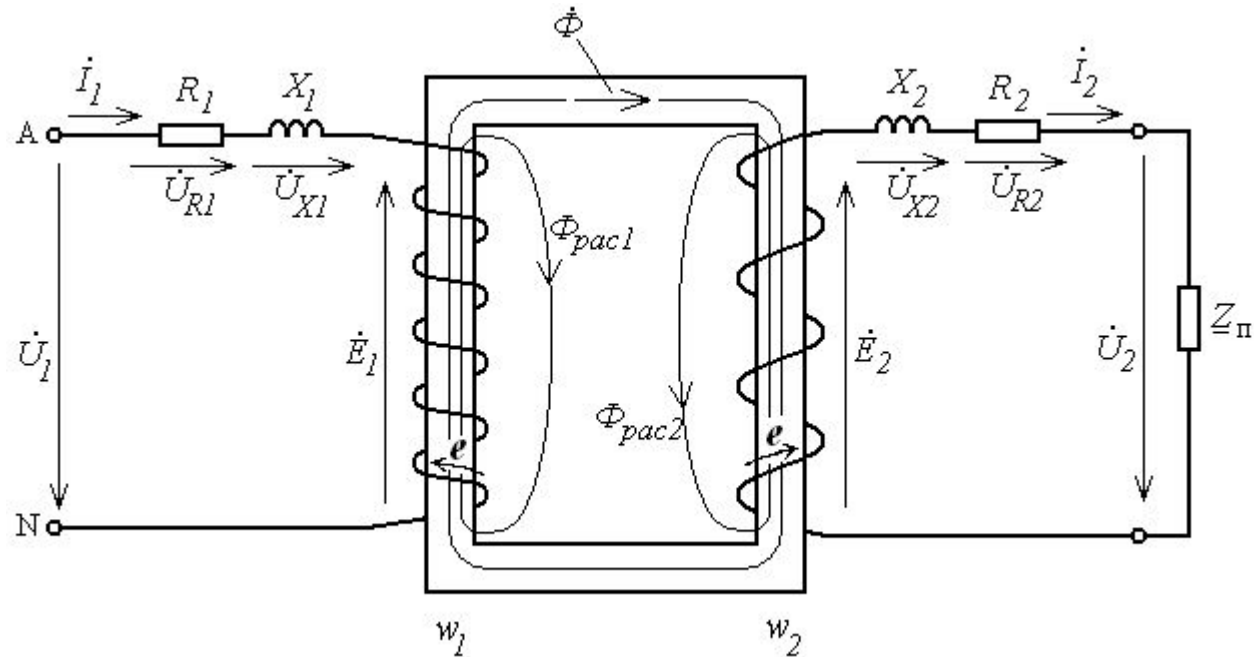
Закон полного тока для магнитной цепи трансформатора:  $\oint H_M = L_1 w_1 - L_2 w_2$  ;  
 $H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_0 \cdot S_M}$  ;  $\Phi = U_1 / (4,44 f w_1)$   
 Холостой ход:  $\oint H_M = L_0 w_1$

$$L_1 w_1 - L_2 w_2 = L_0 w_1$$

$$L_1 = L_0 + L_2 \left( \frac{w_2}{w_1} \right) ; \quad L_1 = L_0 + L_2 / k_T$$

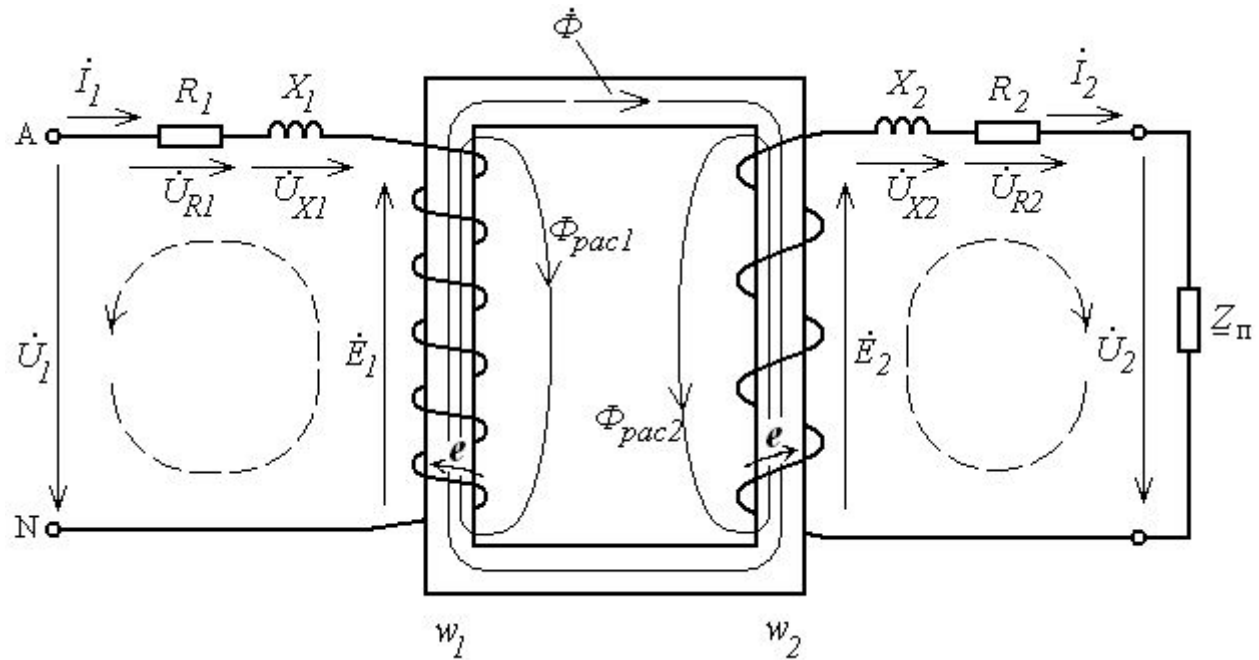


## 4. Особенности реального трансформатора.



1. Поток рассеяния первичной обмотки  $\Phi_{\text{pac1}} \rightarrow E_{\text{pac1}} \rightarrow X_1$   
Поток рассеяния вторичной обмотки  $\Phi_{\text{pac2}} \rightarrow E_{\text{pac2}} \rightarrow X_2$
2. Проводники обмоток обладают электрическим сопротивлением  $\rightarrow (R_1 \text{ и } R_2)$

## Уравнения электрического состояния



### II Закон

#### Кирхгофа:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{X1}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{U}_{R2} - \dot{U}_{X2}$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 X_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_1)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j \dot{I}_2 X_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (R_2 + jX_2)$$

## Уравнения электрического и магнитного состояния трансформатора

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2 / k_T$$

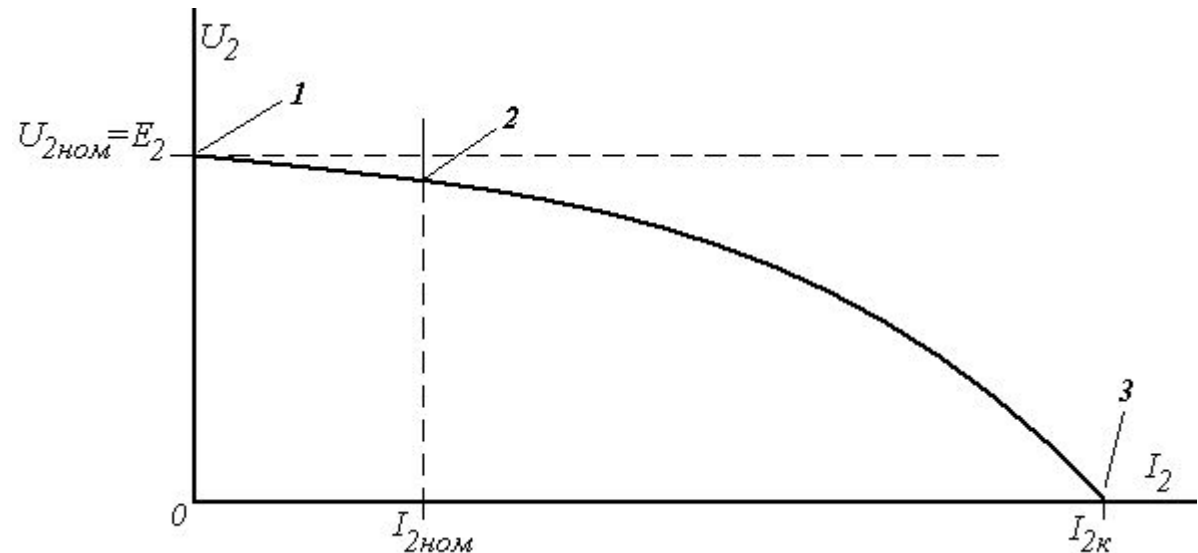
## 5. Внешняя характеристика трансформатора.

Вторичное напряжение трансформатора ( $U_2$ ) зависит от мощности нагрузки ( $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$ )

$U_2 = f(I_2)$  - внешняя характеристика трансформатора

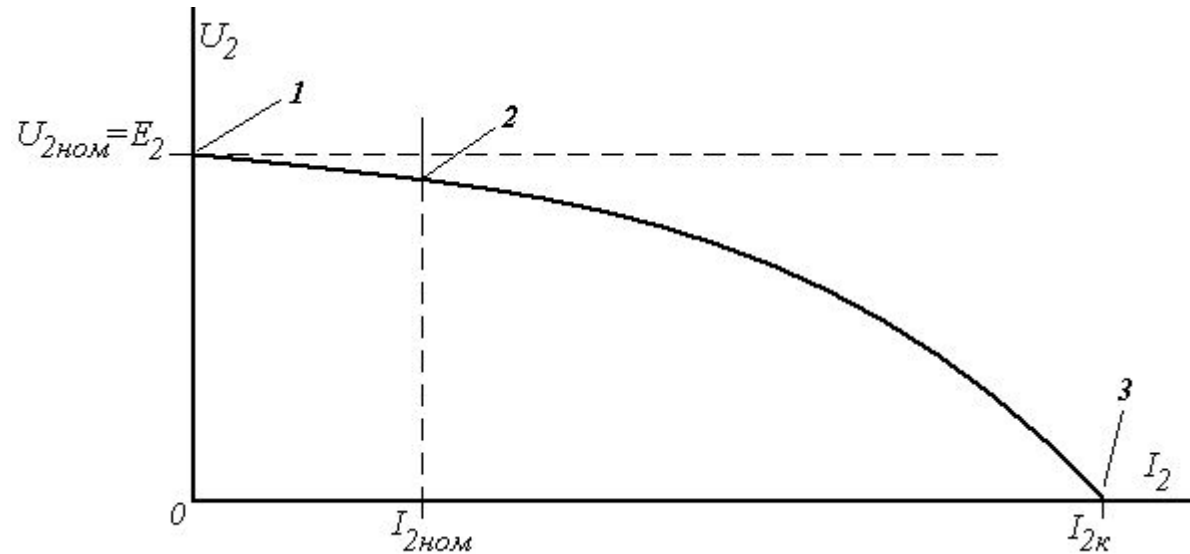
Из уравнения электрического состояния:  $\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2(R_2 + jX_2)$

С увеличением нагрузки ( $I_2$ ) вторичное напряжение трансформатора ( $U_2$ ) уменьшается



## 6. Режимы работы трансформатора

### Холостой ход

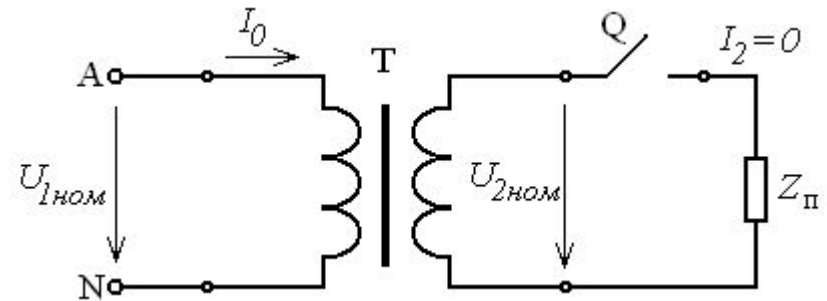


Холостой ход трансформатора –  
режим работы при  $I_2 = 0$  (Точка 1)

$$U_2 = U_{2ном} = E_2$$

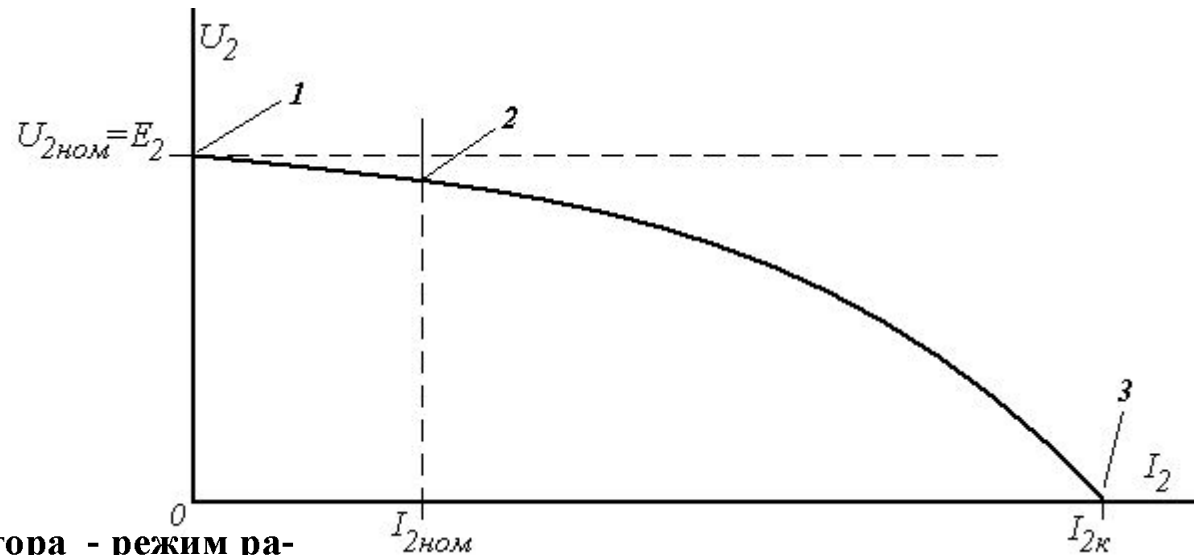
Ток холостого хода трансформатора

$$I_1 = I_0 \quad (\text{от } 2 \text{ до } 5 \%)$$



## 6. Режимы работы трансформатора (продолжение)

### Короткое замыкание



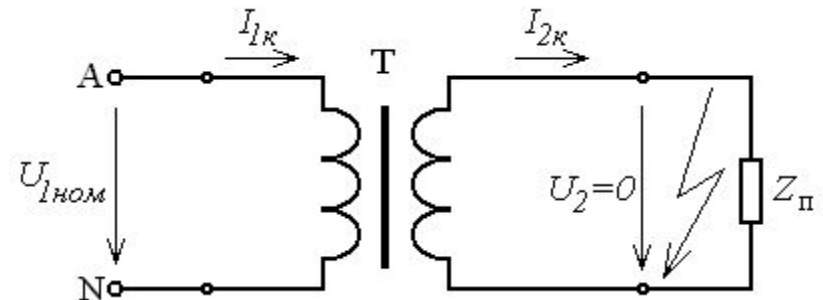
**Короткое замыкание** трансформатора - режим работы при замкнутых между собой зажимах вторичной обмотки (Точка 3).

$U_2 = 0$ .

Токи обмоток  $I_{1к}$  и  $I_{2к}$  во много раз превышают номинальные значения.

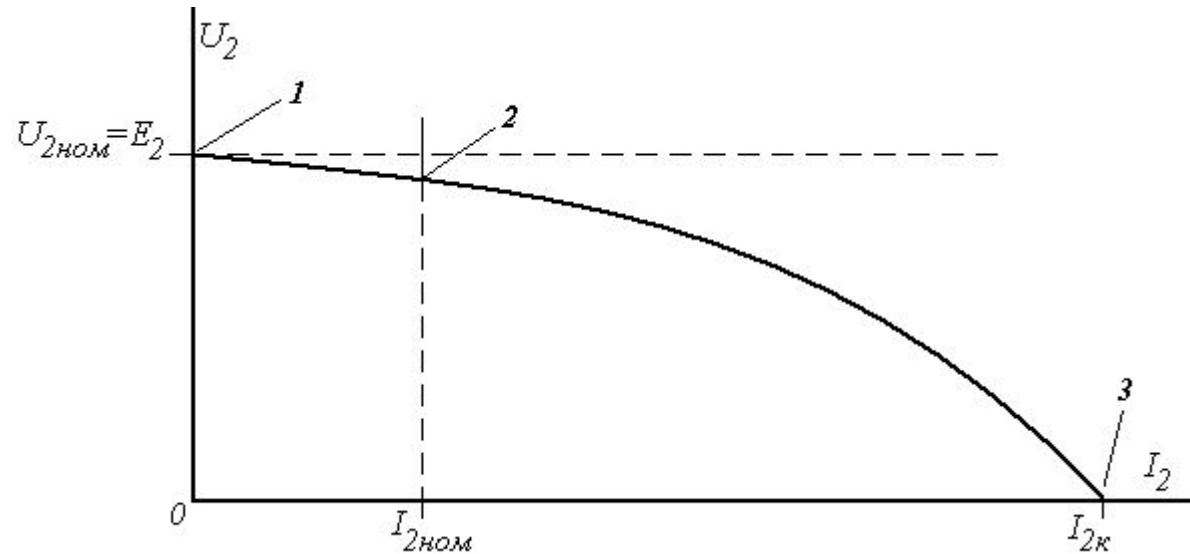
Ток первичной обмотки называется *током короткого замыкания* трансформатора  $I_{к}$

**Короткое замыкание** – аварийный режим, возникающий вследствие неисправностей в электрической цепи приемника электроэнергии, приводит к разрушению устройства.



## 6. Режимы работы трансформатора (продолжение)

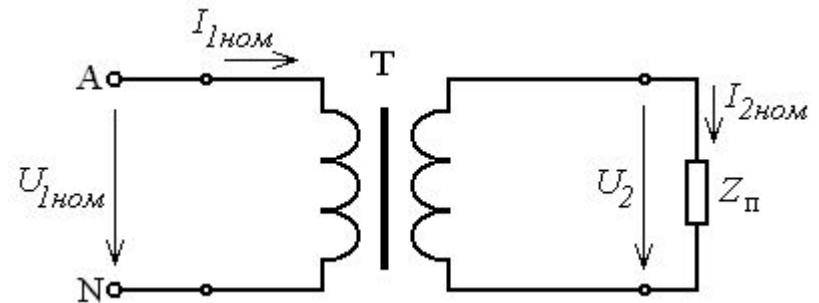
**Номинальный режим**



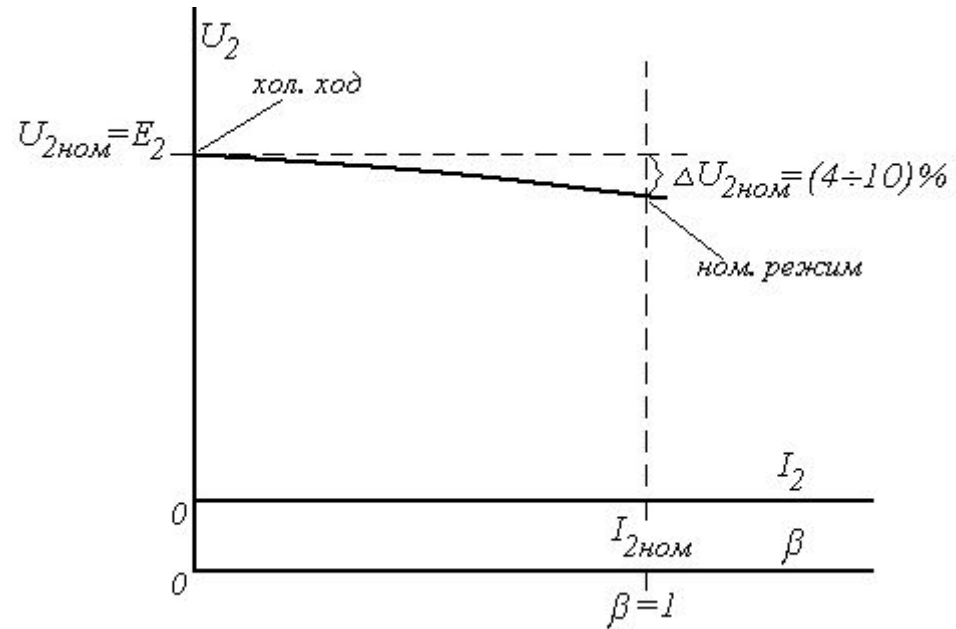
**Номинальный режим работы трансформатора:**

$$I_2 = I_{2ном} ; I_1 = I_{1ном} \text{ (Точка 2)}$$

**Рабочий диапазон режимов работы трансформатора определяется участком 1–2**



## Внешняя характеристика трансформатора (рабочий диапазон)



**Коэффициент нагрузки  $\beta$  характеризует величину нагрузки:**

$$\beta = I_2 / I_{2ном}$$

*Холостой ход:*  $I_2 = 0, \quad \beta = 0$

*Номинальный режим работы:*  $I_2 = I_{2ном}, \quad \beta = 1$

Внешняя характеристика  $U_2 = f(I_2) ; U_2 = f(\beta)$

*Изменение вторичного напряжения:*  $\Delta U_2 = U_{2ном} - U_2$

*В номинальном режиме  $\Delta U_{2ном}$  составляет от 4 до 10 %*



## Заключение

1. *Трансформатор* – это статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения.

2. В основе работы трансформатора лежит *явление электромагнитной индукции*.

3. Основой устройства трансформатора является *магнитная цепь*, которая представляет из себя магнитопровод с электрическими обмотками.

4. Соотношение по величине между первичным и вторичным напряжениями называется *коэффициентом трансформации*. Коэффициент трансформации идеального трансформатора определяется соотношением числа витков первичной и вторичной обмоток

$$k_T = U_1 / U_2 = w_1 / w_2$$

## Заключение

5. Для анализа реального трансформатора следует учитывать дополнительные особенности его работы, существенно влияющие на его характеристики. Первая особенность – наличие *дополнительных магнитных потоков* рассеяния. Вторая особенность – существенное влияние *активного сопротивления обмоток* трансформатора.

6. Для математического описания режимов работы трансформатора используют *уравнения электрического и магнитного состояния*.

## Заключение

7. Вторичное напряжение реального трансформатора зависит от величины его нагрузки. Эта зависимость называется *внешней характеристикой* трансформатора. С увеличением вторичного тока (увеличением нагрузки трансформатора) вторичное напряжение уменьшается.

8. *Холостой ход* трансформатора – режим работы при отключенном приемнике. При этом вторичное напряжение определяется величиной ЭДС и принимается за номинальное вторичное напряжение.

$$U_{2\text{НОМ}} = E_2$$

9. *Короткое замыкание* – аварийный режим работы при замкнутых между собой зажимах вторичной обмотки. Ток короткого замыкания существенно превышает допустимое значение.

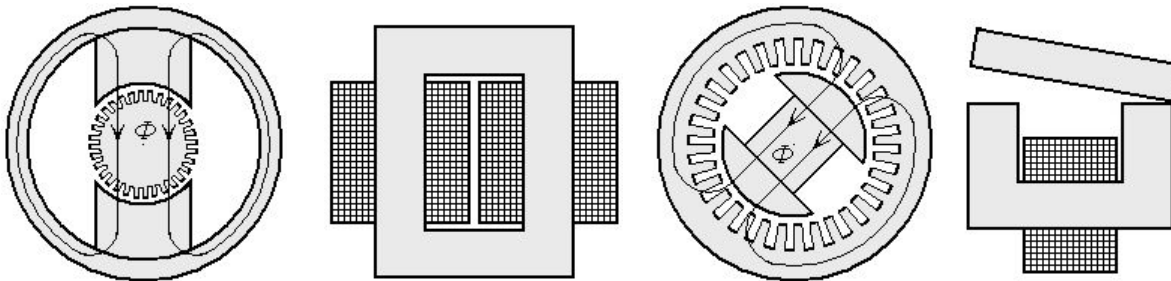
10. *Номинальный режим* – режим работы при значении тока, равном номинальному, определяющему допустимый нагрев трансформатора.

## Контрольные вопросы

### Что такое трансформатор?

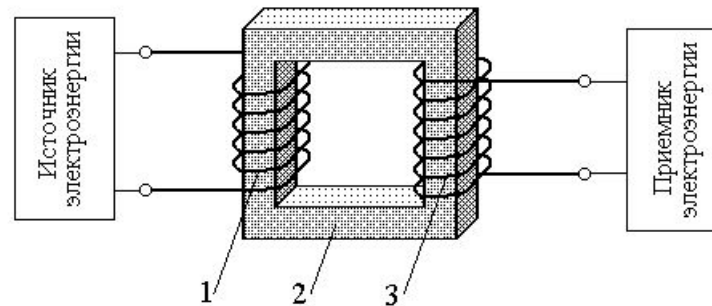
- Электромагнитное устройство, преобразующее электрическую энергию одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения.
- Электромагнитное устройство, преобразующее электрическую энергию переменного тока в электрическую энергию постоянного тока.
- Электромагнитное устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую, или наоборот.
- Электромагнитное устройство, преобразующее электрическую энергию в тепловую.

### Укажите магнитную цепь трансформатора:

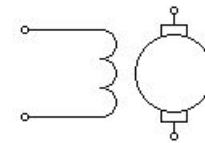
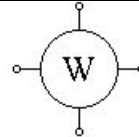
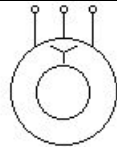
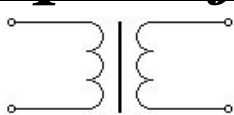


## Контрольные вопросы

**Назовите основные элементы конструкции трансформатора**



**Условное обозначение трансформатора в схемах :**



## Контрольные вопросы

### Коэффициент трансформации - это:

- Отношение номинального первичного напряжения к номинальному вторичному.
- Отношение номинального вторичного напряжения к номинальному первичному.
- Отношение активной мощности приемника на выходе трансформатора к активной мощности потребляемой трансформатором.
- Отношение потерь мощности в трансформаторе к потребляемой активной мощности.

Трансформатор имеет следующие параметры:  $U_{1ном} = 220 \text{ В}$ ,  $w_1 = 2000$  витков,  $w_2 = 200$  витков. Какова величина номинального вторичного напряжения  $U_{2ном}$  и коэффициент трансформации  $K_T$ ?

$$K_T = 10; U_{2ном} = 22 \text{ В}$$

$$K_T = 0,1; U_{2ном} = 22 \text{ В}$$

$$K_T = 10; U_{2ном} = 2200 \text{ В}$$

$$K_T = 200; U_{2ном} = 1,1 \text{ В}$$

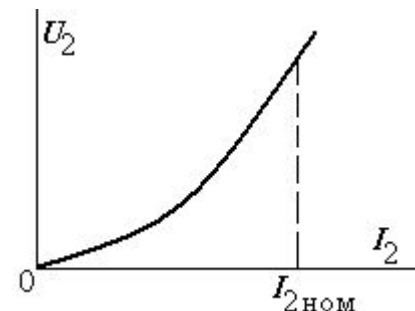
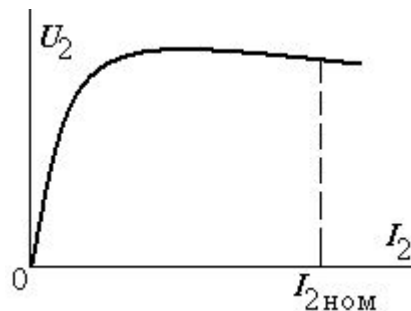
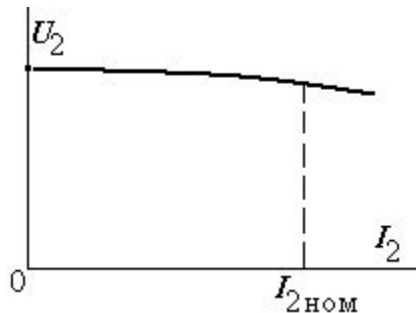
$$K_T = 10; U_{2ном} = 0,11 \text{ В}$$

## Контрольные вопросы

Что такое внешняя характеристика трансформатора?  
Зависимость вторичного напряжения от величины нагрузки.

- Зависимость КПД трансформатора от величины нагрузки.
- Номинальное напряжение и коэффициент трансформации.
- Коэффициент трансформации и номинальная

Указать график внешней характеристики трансформатора  
МОЩНОСТЬ



## Контрольные вопросы

Что такое холостой ход трансформатора ?

Что такое короткое замыкание трансформатора ?

- Режим работы трансформатора при разомкнутой вторичной цепи.
- Режим работы трансформатора при замкнутых между собой выводах вторичной обмотки.
- Режим работы, при котором первичная обмотка отключена от источника электроэнергии.
- Аварийный режим, возникающий при обрыве цепи первичной обмотки.