

# Лекция 12

## II.

### Магнитные цепи и электромагнитные устройства

### Трансформатор (продолжение)

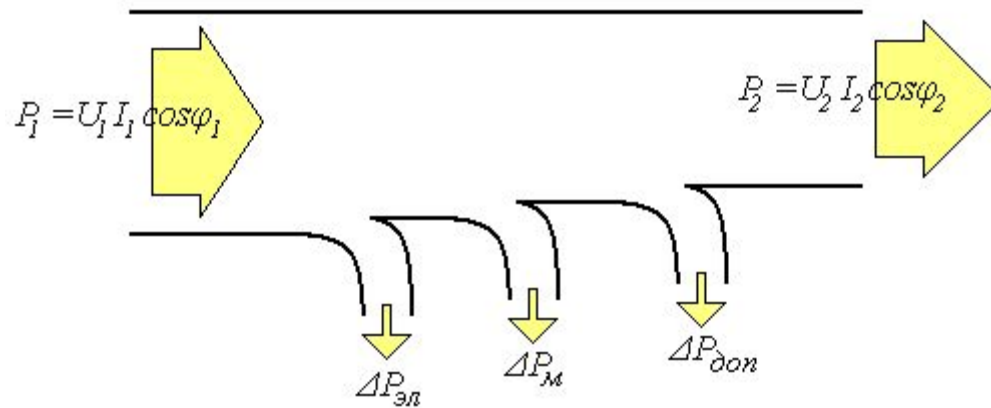
# Содержание



- 1. Потери энергии, КПД трансформатора**
- 2. Паспортные данные трансформатора**
- 3. Экспериментальное определение паспортных данных трансформатора**
- 4. Построение характеристик трансформатора по паспортным данным**
- 5. Особенности конструкции трансформаторов**

# 1. Потери энергии, КПД трансформатора

Энергетическая диаграмма трансформатора



$\Delta P_{эл}$  – электрические потери  
(потери в электрических обмотках трансформатора)

$\Delta P_{м}$  – магнитные потери  
(потери в магнитопроводе трансформатора)

# 1. Потери энергии, КПД трансформатора

## Электрические потери в трансформаторе

$$\Delta P_{эл1} = I_1^2 R_1$$

$$\Delta P_{эл2} = I_2^2 R_2$$

$$\Delta P_{эл} = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

$$I_1 = I_0 + I_2 / k_T ; I_0 \approx 0$$

$$I_1 = I_2 / k_T$$

$$\Delta P_{эл} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_2^2 R_1 / k_T + I_2^2 R_2 = I_2^2 (R_1 / k_T + R_2).$$

$$\Delta P_{эл} = I_{2ном}^2 (R_1 / k_T + R_2) \beta^2$$

*Холостой ход ( $\beta = 0$ ):  $\Delta P_{эл} = 0$ .*

*Номинальный режим работы ( $\beta = 1$ ):  $\Delta P_{эл.ном} = I_{2ном}^2 (R_1 / k_T + R_2)$*

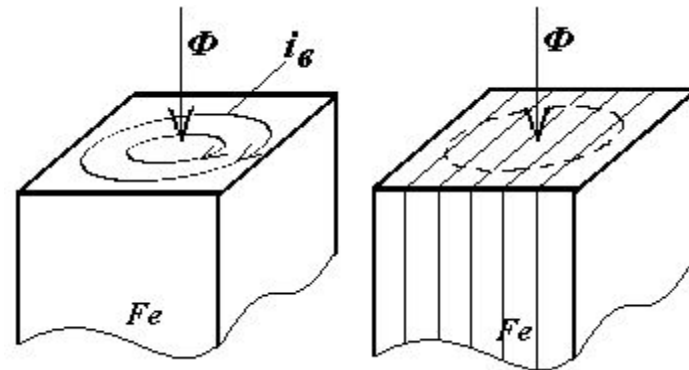
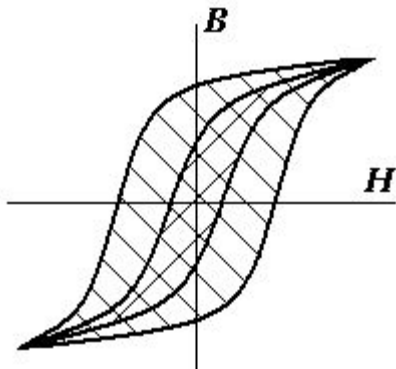
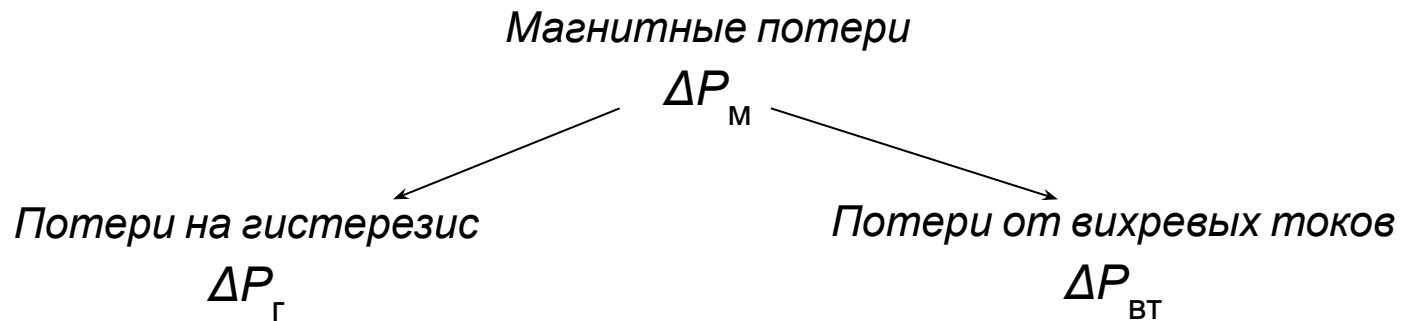
$$\Delta P_{эл} = \Delta P_{эл.ном} \beta^2$$

*Электрические потери трансформатора – переменные потери*

# 1. Потери энергии, КПД трансформатора

## Магнитные потери в трансформаторе

Магнитные потери обусловлены переменным магнитным потоком в магнитопроводе



$$\Delta P_M = \Delta P_\Gamma + \Delta P_{BT}$$

# 1. Потери энергии, КПД трансформатора

## Магнитные потери в трансформаторе

$$\Delta P_M = \Delta P_\Gamma + \Delta P_{BT}$$

$$\Delta P_M \sim \Phi f$$
$$f = 50 \text{ Гц}, \quad \Phi \sim U_{1\text{ном}}$$

*Магнитные потери не зависят от режима работы трансформатора – постоянные потери*

Для уменьшения магнитных потерь сердечник магнитопровода изготавливают из специальной электротехнической стали с низкими удельными потерями на гистерезис.

Конструктивно он состоит из тонких листов, электрически изолированных друг от друга для исключения потерь от вихревых токов.

# 1. Потери энергии, КПД трансформатора

## КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_M + \Delta P_{эл}}$$

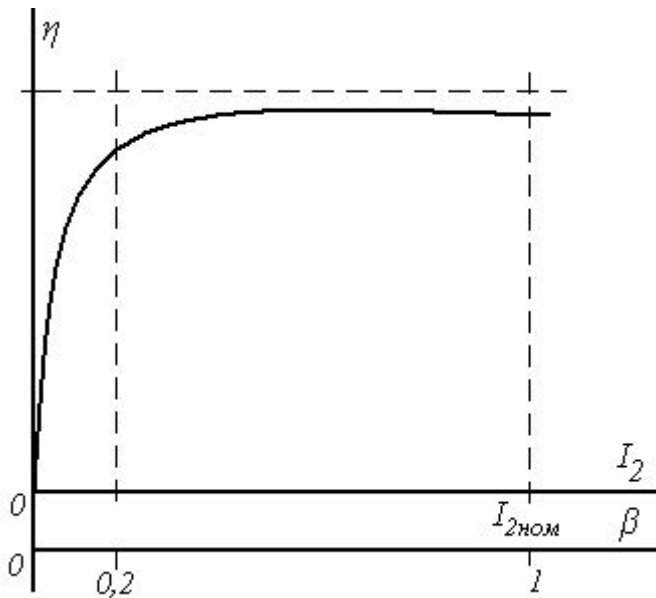
$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$U_2 \approx U_{2ном}, \quad I_2 = I_{2ном} \beta$$

$$P_2 = U_{2ном} (I_{2ном} \beta) \cos \varphi_2 = S_{ном} \beta \cos \varphi_2$$

$$\eta = \frac{S_{ном} \beta \cos \varphi_2}{S_{ном} \beta \cos \varphi_2 + \Delta P_M + \Delta P_{эл.ном} \beta^2}$$

$$\eta_{ном} = 0,9 - 0,98 .$$



## 2. Паспортные данные трансформатора

| № | Наименование                        | Обозначение     |
|---|-------------------------------------|-----------------|
| 1 | Номинальная мощность трансформатора | $S_{ном}$ , кВА |
| 2 | Номинальное первичное напряжение    | $U_{1ном}$ , кВ |
| 3 | Номинальное вторичное напряжение    | $U_{2ном}$ , кВ |
| 4 | Мощность холостого хода             | $P_0$ , кВт     |
| 7 | Ток холостого хода                  | $i_0$ , %       |
| 5 | Мощность короткого замыкания        | $P_K$ , кВт     |
| 6 | Напряжение короткого замыкания      | $u_K$ , %       |

$$S_{ном} = U_{1ном} I_{1ном} = U_{2ном} I_{2ном}$$

$$k_T = U_{1ном} / U_{2ном}$$

### 3. Экспериментальное определение паспортных данных трансформатора

Опыт холостого хода

*Вторичная обмотка разомкнута*

*Напряжение на первичной обмотке равно номинальному*

$$U_1 = U_{1\text{ном}}$$

*Напряжение вторичной обмотки равно номинальному*

$$U_2 = U_{2\text{ном}}$$

*Ток, потребляемый трансформатором – ток холостого хода*

$$I_1 = I_0$$

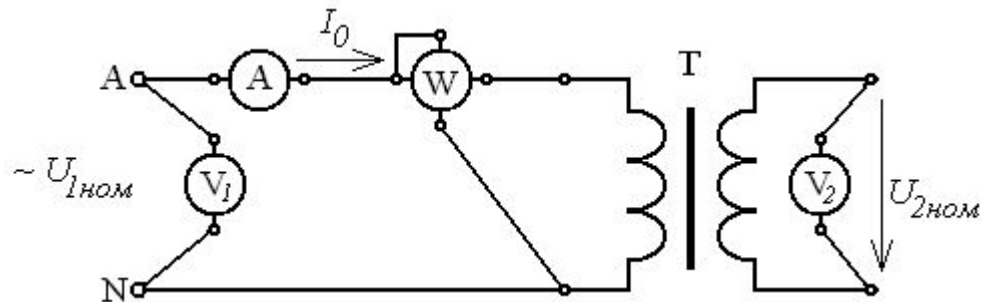
$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1\text{ном}}} 100\%$$

$$I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}} / U_{1\text{ном}}$$

*Мощность, потребляемая трансформатором –*

*мощность холостого хода*

$$P_1 = P_0 = \Delta P_m$$



### 3. Экспериментальное определение паспортных данных трансформатора

Опыт  
короткого замыкания

Режим короткого замыкания – аварийный режим при  $U_1 = U_{1ном}$

Опыт короткого замыкания – при  $I_1 = I_{1ном}$  ( $U_1 \ll U_{1ном}$ )

Напряжение, приложенное к первичной обмотке, -

- напряжение короткого замыкания трансформатора

$$U_1 = U_{1к}$$

$$u_k = \frac{U_{1к}}{U_{1ном}} 100\% \quad (\text{от } 4 \text{ до } 10 \%)$$

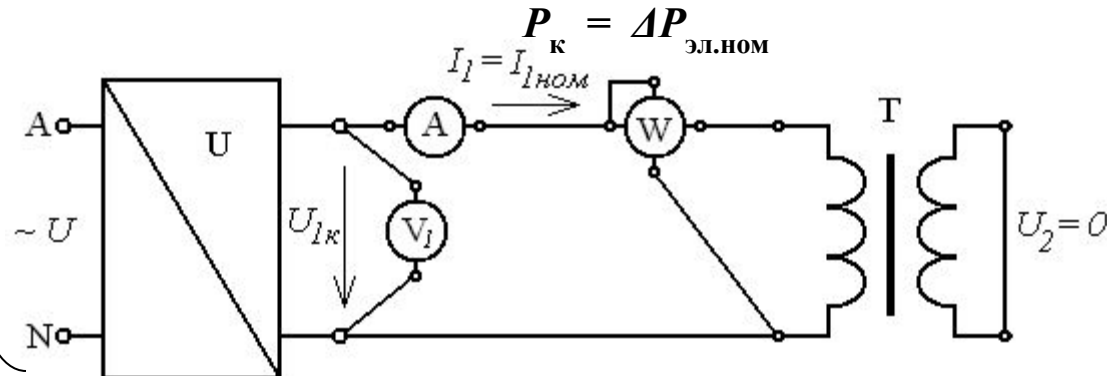
Мощность, потребляемая трансформатором, -

мощность короткого замыкания

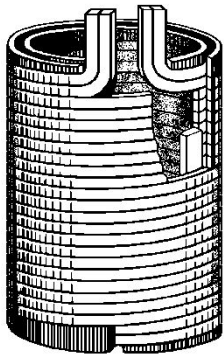
$$P_1 = P_k$$

$$\Delta P_{эл} = I_{1ном}^2 R_1 + I_{2ном}^2 R_2 = \Delta P_{эл.ном}$$

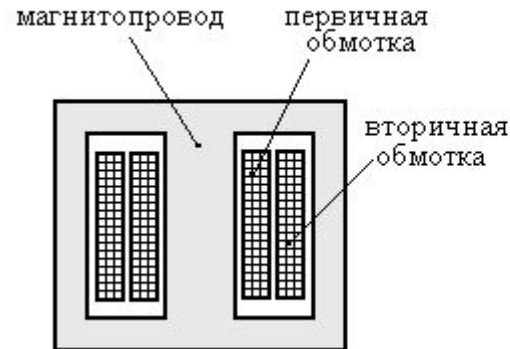
$$P_k = \Delta P_{эл.ном}$$



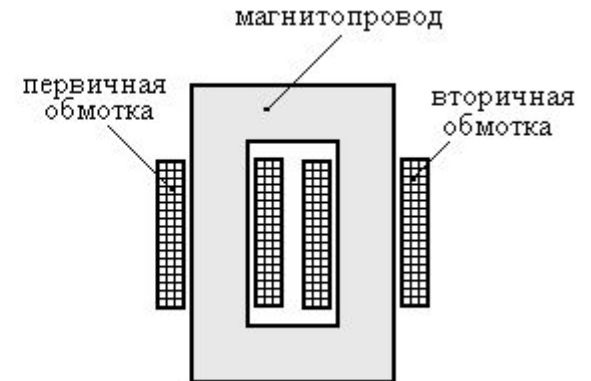
## 5. Особенности конструкции трансформаторов



Цилиндрическая двухслойная обмотка из прямоугольного провода



Броневой магнитопровод (Ш – образный сердечник)



Стержневой магнитопровод (П – образный сердечник)

Обмотки трансформатора могут располагаться на одном стержне магнитопровода, либо на разных

## 5. Особенности конструкции трансформаторов

### Масляный трансформатор



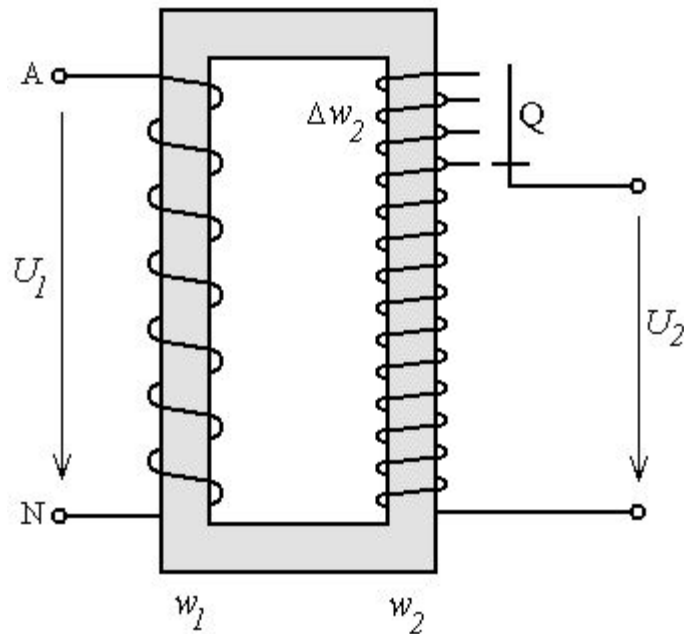
Для интенсивного охлаждения электромагнитное ядро (магнитопровод с обмотками) помещают в масляный бак, заполненный специальным трансформаторным маслом.

Бак может быть снабжен радиаторами, охладителями и т.п.

Выводы обмоток крепятся к крышке бака посредством изоляторов

## 5. Особенности конструкции трансформаторов

### Трансформатор с регулированием напряжения

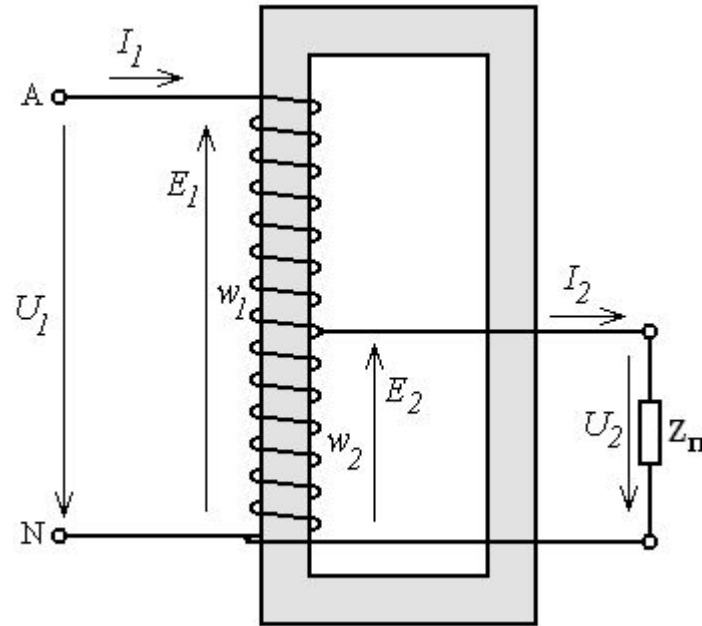


Для поддержания вторичного напряжения на необходимом уровне в обмотке трансформатора могут быть предусмотрены регулировочные витки с переключателем  $Q$ .

Переключение числа витков позволяет регулировать напряжение трансформатора, поддерживая его на необходимом уровне.

## 5. Особенности конструкции трансформаторов

### Автотрансформатор



Часть обмотки с числом витков  $w_2$  принадлежит одновременно первичной и вторичной цепям.

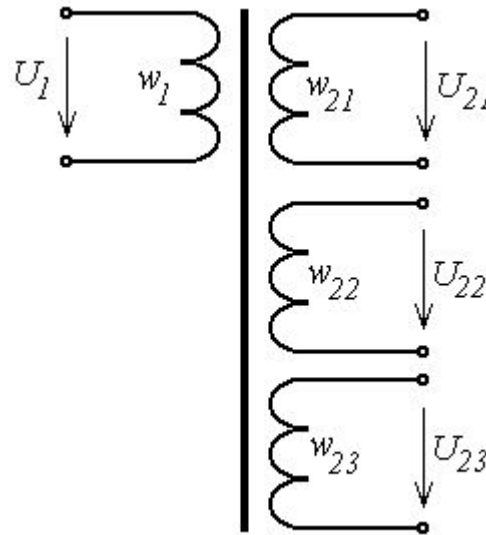
Напряжение источника  $U_1$  приложено ко всем виткам обмотки  $w_1$ .

Вторичное напряжение  $U_2$  определяется частью обмотки с числом витков  $w_2$ .

Коэффициент трансформации:  $k_T = U_1/U_2 = w_1/w_2$ .

## 5. Особенности конструкции трансформаторов

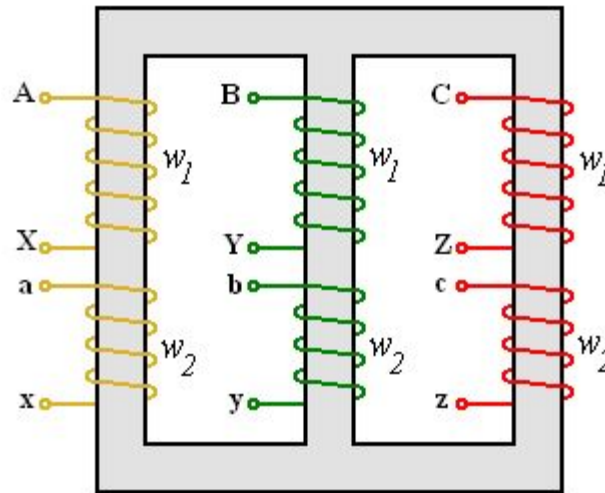
### Многообмоточный трансформатор



Несколько вторичных обмоток с разным числом витков обеспечивают разный коэффициент трансформации и создают разное по величине напряжение.

## 5. Особенности конструкции трансформаторов

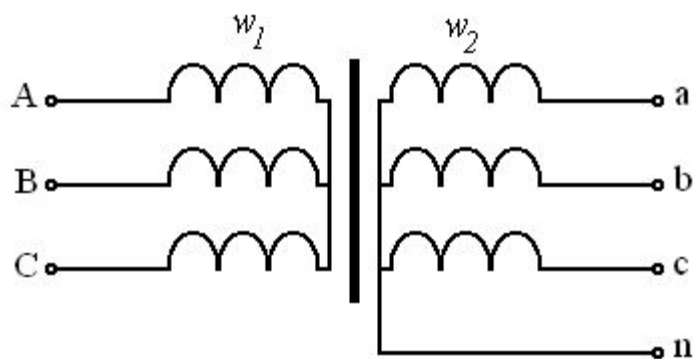
### Трехфазный трансформатор



Обмотки трех фаз располагаются на трех стержнях одного магнитопровода.

Три фазы обмотки соединены способом "звезда", либо "треугольник".

## Условное обозначение трехфазного трансформатора



Группа соединения обмоток "звезда / звезда с нейтралью"



## Заключение

1. *Потери энергии* в трансформаторе складываются из двух основных составляющих: электрические потери и магнитные потери.
2. *Электрические потери* – потери в обмотках, определяемые величиной тока и сопротивлением обмоток. Электрические потери зависят от режима работы трансформатора. С увеличением нагрузки электрические потери увеличиваются.
3. *Магнитные потери* обусловлены переменным магнитным потоком в магнитопроводе трансформатора. Магнитные потери не зависят от режима работы трансформатора и определяются величиной магнитного потока.
4. *КПД* трансформатора в номинальном режиме работы  $0,9 \div 0,98$ .

## Заключение

5. *Паспортные данные* трансформатора определяют его номинальный режим работы, позволяют рассчитывать характеристики, анализировать режимы его работы. Паспортные данные указываются в каталогах оборудования и могут быть определены экспериментально.
6. Экспериментальное определение паспортных данных трансформатора может выполнено по результатам *опыта холостого хода* и *опыта короткого замыкания* трансформатора.
7. Паспортные данные трансформатора позволяют строить его характеристики, анализировать режимы его работы. В частности, по паспортным данным может быть рассчитана внешняя характеристика трансформатора и зависимость КПД от величины нагрузки.

## Заключение

8. *Сердечник магнитопровода* трансформатора изготавливают *шихтованным* из листовой электротехнической стали, что позволяет уменьшить магнитные потери.

9. *Форма магнитопровода* трансформатора определяет величину потоков рассеяния.

10. Особенности конструкции магнитопровода и обмоток позволяют создавать *специальные типы* трансформаторов и определяют особенности их характеристик.

## 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.

Трансформатор имеет следующие параметры:  $U_{1ном} = 220\text{ В}$ ,  $w_1 = 2000$  витков,  $w_2 = 200$  витков. Какова величина вторичного напряжения  $U_2$  в режиме холостой ход ?

$U_2 = 22\text{ В}$

$U_2 = 220\text{ В}$

$U_2 = 0\text{ В}$

$U_2 = 2200\text{ В}$

$U_2 = 1,1\text{ В}$

## Контрольные вопросы

### **Что такое холостой ход 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.

### **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.

## Контрольные вопросы

### Основные составляющие потерь энергии в трансформаторе:

- Электрические потери в обмотках трансформатора и магнитные потери в магнитопроводе.
- Электрические потери в обмотках трансформатора и механические потери.
- Механические потери и магнитные потери в магнитопроводе.

### Указать график зависимости КПД трансформатора от величины тока нагрузки.

