



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет - УПИ»
Кафедра Электротехники и электротехнологических систем

Расчет характеристик трехфазного трансформатора

**Методические указания и варианты исходных данных
к заданию №4 расчетно-графической работы по
дисциплине "Электротехника"**

Составители: Проскуряков В.С., Соболев С.В.

Екатеринбург 2008

СОДЕРЖАНИЕ

1. Основные теоретические сведения, необходимые для выполнения работы
2. Пример расчета характеристик трансформатора
3. Задание и варианты исходных данных

1. Основные теоретические сведения, необходимые для выполнения работы

Основные понятия. Принцип действия идеального трансформатора.

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

В основе работы всех трансформаторов лежит один принцип – индукционное действие магнитного поля (явление электромагнитной индукции).

Поэтому основой устройства трансформатора является магнитная цепь, которая представляет из себя магнитопровод с электрическими обмотками.

Электромагнитная схема простейшего идеального однофазного трансформатора показана на рис.1. В таком трансформаторе магнитопроводом может быть прямоугольный ферромагнитный сердечник, на котором размещены две электрические обмотки. Каждая из обмоток имеет определенное количество витков (w_1 и w_2), охватывающих стержни магнитопровода.

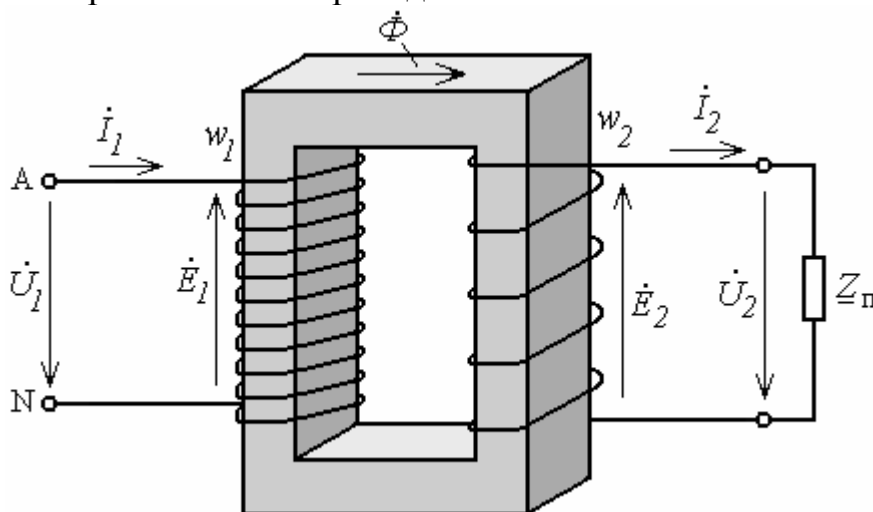


Рис.1. Электромагнитная схема идеального трансформатора

Обмотка с числом витков w_1 называется первичной обмоткой и подключается к зажимам А-Н источника электроэнергии переменного напряжения \dot{U}_1 .



Обмотка с числом витков w_2 называется вторичной. К зажимам вторичной обмотки подключается приемник электроэнергии с сопротивлением Z_n .

Под действием переменного напряжения \dot{U}_1 источника в первичной обмотке возникает первичный ток \dot{I}_1 . Этот ток, замыкаясь по виткам первичной обмотки, создает переменную магнитодвижущую силу (МДС) в магнитной цепи трансформатора. Под действием МДС возникает переменное магнитное поле. При этом магнитный поток $\dot{\Phi}$, замыкаясь по ферромагнитному сердечнику, пронизывает все витки обеих обмоток. Согласно закону электромагнитной индукции переменный магнитный поток $\dot{\Phi}$, пронизывая витки обмоток, индуцирует в каждом из них ЭДС индукции e . При этом ее величина определяется скоростью изменения магнитного потока:

$$\dot{e} = \frac{d\dot{\Phi}}{dt} . \quad (1)$$

Тогда в первичной обмотке с числом витков w_1 создается ЭДС индукции \dot{E}_1 , пропорциональная числу витков w_1 :

$$\dot{E}_1 = \dot{e} w_1 , \quad (2)$$

а во вторичной обмотке с числом витков w_2 создается ЭДС \dot{E}_2 , пропорциональная числу витков w_2 :

$$\dot{E}_2 = \dot{e} w_2 . \quad (3)$$

Первичная ЭДС уравнивает приложенное к первичной обмотке напряжение источника \dot{U}_1 .

Вторичная ЭДС \dot{E}_2 определяет напряжение на зажимах вторичной обмотки, к которой подключен приемник, и ток приемника (вторичный ток) \dot{I}_2 .

Соотношение по величине между первичным и вторичным напряжениями называется коэффициентом трансформации:

$$k_T = U_1 / U_2 = E_1 / E_2 = e w_1 / e w_2 = w_1 / w_2 , \quad (4)$$

т.е. коэффициент трансформации определяется соотношением числа витков первичной и вторичной обмоток.

Таким образом, трансформатор посредством магнитной связи двух обмоток в магнитной цепи преобразует электрическую энергию источника с напряжением U_1 в электрическую энергию, отдаваемую приемнику с напряжением U_2 .

При этом вторичное напряжение

$$U_2 = U_1 / k_T . \quad (5)$$

Для обозначения трансформатора в электрических схемах используют его условное графическое обозначение, показанное на рис.2 .

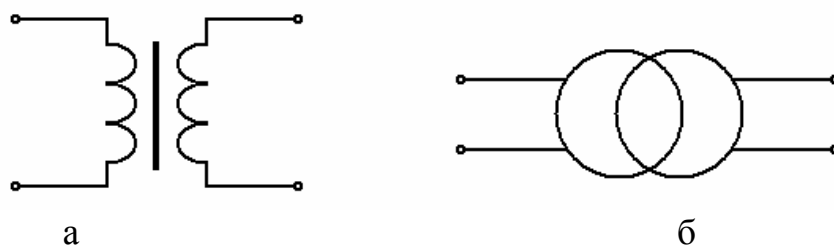


Рис.2. Условное графическое обозначение трансформатора в схемах электрических цепей (а – развернутое, б – упрощенное)

Особенности реального трансформатора

Для анализа работы реального трансформатора следует учитывать дополнительные особенности его работы, существенно влияющие на его характеристики.

Первая особенность – наличие дополнительных магнитных потоков рассеяния первичной и вторичной обмоток. Потоки рассеяния обуславливают дополнительные ЭДС самоиндукции в обмотках.

Вторая особенность – существенное влияние активного сопротивления обмоток трансформатора.

Это электрическое сопротивление обуславливает дополнительное падение напряжения, определяемое законом Ома, и требует его учета при анализе работы трансформатора.

Особенности реального трансформатора учитываются в уравнениях электрического состояния для первичной и вторичной цепей:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{X1} \quad (6)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{U}_{R2} - \dot{U}_{X2} \quad (7)$$

В этих уравнениях слагаемые $\dot{U}_{R1}, \dot{U}_{X1}, \dot{U}_{R2}, \dot{U}_{X2}$ определяют падение напряжения на собственных активном и индуктивном сопротивлениях обмоток, которые отражают особенности реального трансформатора.

С учетом соотношений по закону Ома на элементах выражения (6), (7) принимают вид:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_1) \quad (8)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) \quad (9)$$

Уравнения (8), (9) описывают процессы в электрических цепях трансформатора. Как следует из уравнений (8), (9), напряжение источника \dot{U}_1 уравнивается противо-ЭДС самоиндукции \dot{E}_1 и падением напряжения на собственном актив-



ном и индуктивном сопротивлениях первичной обмотки ($\dot{I}_1 R_1$ и $j\dot{I}_1 X_1$). Напряжение вторичной обмотки \dot{U}_2 определяется величиной ЭДС индукции вторичной обмотки \dot{E}_2 за вычетом падения напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях вторичной обмотки ($\dot{I}_2 R_2$ и $j\dot{I}_2 X_2$).

Внешняя характеристика трансформатора

Вторичное напряжение реального трансформатора зависит от величины его нагрузки. Эта зависимость называется внешней характеристикой трансформатора

Под величиной нагрузки следует понимать мощность приемника, которая определяется его напряжением U_2 и током I_2 :

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2, \quad (10)$$

где $\cos\varphi_2$ — коэффициент мощности приемника.

При этом можно считать, что мощность приемника пропорциональна току I_2 . Тогда под величиной нагрузки можно понимать величину тока приемника (вторичный ток трансформатора).

Таким образом, изменение вторичного напряжения трансформатора при изменении режима его работы формально выражается зависимостью вторичного напряжения от вторичного тока $U_2 = f(I_2)$.

Эта зависимость называется внешней характеристикой трансформатора.

Характер этой зависимости может быть определен из анализа уравнений электрического состояния (8), (9).

Из этих соотношений следует, что с увеличением вторичного тока (увеличением нагрузки трансформатора) вторичное напряжение уменьшается. Это изменение вторичного напряжения определяется падением напряжения на собственном активном и индуктивном сопротивлениях обмоток $\dot{I}_2(R_2 + jX_2)$ и $\dot{I}_1(R_1 + jX_1)$. График зависимости показан на рис.3.

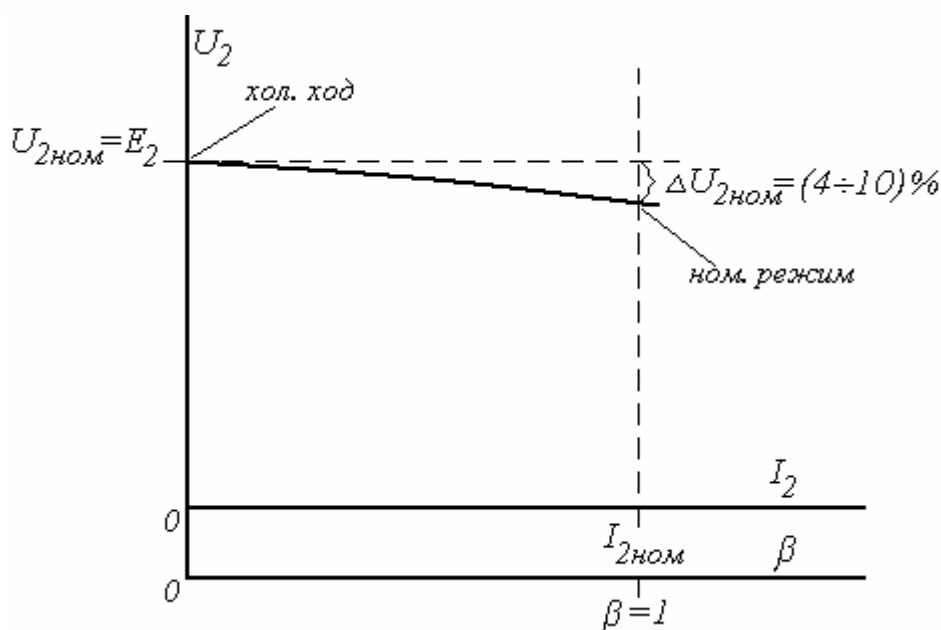


Рис. 3. Внешняя характеристика трансформатора

Режимы работы трансформатора

Холостой ход трансформатора – режим работы при отключенном приемнике ($I_2 = 0$). При этом вторичное напряжение определяется величиной ЭДС и принимается за номинальное вторичное напряжение.

$$U_{2ном} = E_2 \quad (11)$$

В этом режиме трансформатор не создает электрическую энергию, которая передавалась бы приемнику. При этом электрическая энергия, потребляемая трансформатором от источника, невелика и расходуется на покрытие потерь холостого хода трансформатора. Ток, потребляемый первичной обмоткой от источника в этом режиме, называют ток холостого хода трансформатора I_0 . Его величина составляет от 2 до 5 % по отношению к номинальному первичному току.

Короткое замыкание – аварийный режим работы при замкнутых между собой зажимах вторичной обмотки.

напряжение между зажимами вторичной обмотки $U_2 = 0$.

При коротком замыкании можно принять сопротивление приемника $Z_{п} = 0$.

При этом вторичный ток определяется величиной вторичной ЭДС и ограничивается только небольшим собственным активным и индуктивным сопротивлениями вторичной обмотки. Поэтому вторичный ток короткого замыкания $I_{2к}$ оказывается очень большим, во много раз превышающим номинальный ток. Такой большой ток обуславливает значительный перегрев обмотки и выход из строя трансформатора.

Ток первичной обмотки в этом режиме $I_{1к}$ называется током короткого замыкания трансформатора. Первичный ток пропорционален вторичному. Поэтому ток ко-



роткого замыкания трансформатора также значительно превышает номинальный ток и приводит к перегреву трансформатора.

Короткое замыкание – аварийный режим, возникающий вследствие неисправностей в электрической цепи приемника электроэнергии.

Номинальный режим – режим работы при значении тока, равном номинальному.

Номинальный режим работы трансформатора ограничивается допустимым нагревом его обмоток при номинальных токах. При этом вторичный ток $I_2 = I_{2\text{ном}}$. При анализе работы трансформатора для характеристики величины нагрузки используется относительный параметр, который называют коэффициентом нагрузки β . Его определяют как отношение вторичного тока в рассматриваемом режиме работы к его номинальному значению:

$$\beta = I_2 / I_{2\text{ном}}. \quad (12)$$

Изменение режима работы трансформатора от холостого хода до номинального режима соответствует изменению коэффициента нагрузки от 0 до 1. На рис.3 значения коэффициента нагрузки обозначены на дополнительной оси β .

Как видно на рис.3, при изменении режима работы в диапазоне от холостого хода до номинального режима напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора уменьшается на ΔU_2 . Изменение напряжения в номинальном режиме работы $\Delta U_{2\text{ном}}$ составляет от 4 до 10 % в зависимости от типа и мощности трансформатора.

Потери энергии, КПД трансформатора

Потери энергии в трансформаторе складываются из двух основных составляющих, соответственно двум основным составляющим его конструкции: электрические потери в электрических обмотках трансформатора и магнитные потери в магнитопроводе.

Электрические потери – потери в обмотках, определяемые величиной тока и сопротивлением обмоток. Электрические потери зависят от режима работы трансформатора. С увеличением нагрузки электрические потери увеличиваются. Электрические потери в режиме холостой ход ($\beta = 0$) близки к нулю. В номинальном режиме работы:

$$\Delta P_{\text{эл.ном}} = I_{2\text{ном}}^2 (R_1 / k_T + R_2). \quad (13)$$

В общем случае для любого режима работы трансформатора электрические потери

$$\Delta P_{\text{эл}} = \Delta P_{\text{эл.ном}} \beta^2. \quad (14)$$

Магнитные потери обусловлены переменным магнитным потоком в магнитопроводе трансформатора. Магнитные потери не зависят от режима работы трансформатора и определяются величиной магнитного потока. Поэтому их на-

зывают постоянными потерями. Т.е. в номинальном режиме работы их величина такая же, как и в режиме холостого хода и, следовательно определяются мощностью холостого хода трансформатора:

$$\Delta P_m = P_0. \quad (15)$$

Мощность холостого хода и, следовательно, магнитные потери могут быть определены исходя из паспортных данных, либо опытным путем по результатам испытаний трансформатора.

На рис.4 показана энергетическая диаграмма трансформатора.

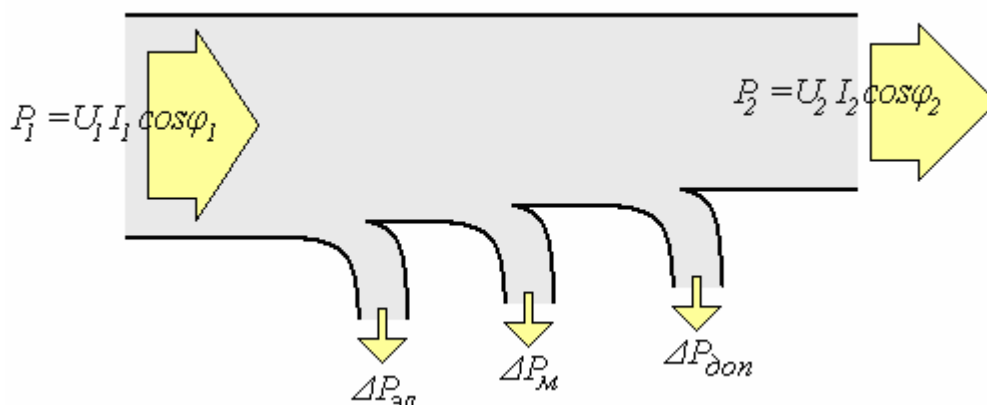


Рис. 4. Энергетическая диаграмма трансформатора

Здесь P_1 – активная мощность, потребляемая трансформатором от источника; P_2 – активная мощность, отдаваемая трансформатором приемнику; $\Delta P_{эл}$ – электрические потери в обмотках трансформатора; ΔP_m – магнитные потери в магнитопроводе трансформатора; $\Delta P_{доп}$ – дополнительные потери в остальных элементах конструкции, которые составляют до 10% всех потерь.

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется соотношением потерь и полезной мощности:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_m + \Delta P_{эл}}, \quad (16)$$

Полезная мощность трансформатора P_2 определяется напряжением и током приемника:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = U_{2ном} (I_{2ном} \beta) \cos \varphi_2 = S_{ном} \beta \cos \varphi_2. \quad (17)$$

С учетом (14) и (17) выражение для η принимает вид:

$$\eta = \frac{S_{ном} \beta \cos \varphi_2}{S_{ном} \beta \cos \varphi_2 + \Delta P_m + \Delta P_{эл.ном} \beta^2}. \quad (18)$$

График зависимости КПД силового трансформатора от нагрузки показан на рис. 5.

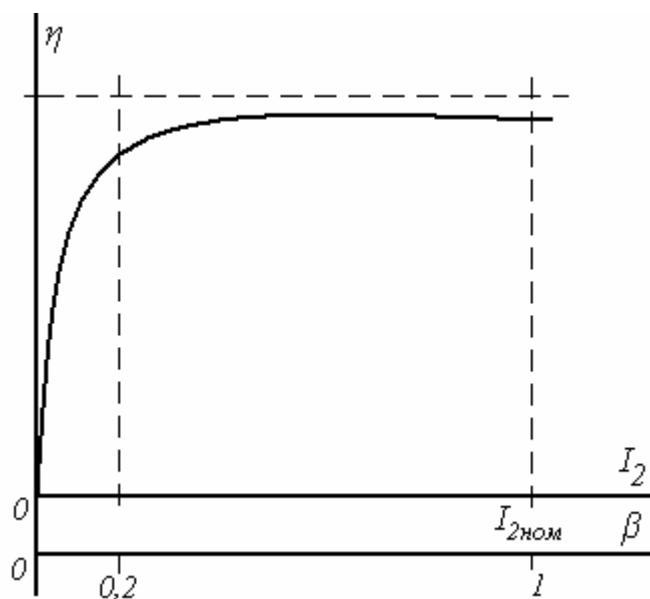


Рис. 5. Зависимость КПД от нагрузки

В режиме холостого хода КПД трансформатора $\eta = 0$. Мощность холостого хода P_0 , потребляемая трансформатором в этом режиме, расходуется на компенсацию магнитных потерь. С увеличением нагрузки в достаточно небольшом диапазоне (приблизительно $\beta = 0,2$) КПД достигает больших значений. В остальной части рабочего диапазона КПД трансформатора держится на высоком уровне. В режимах, близких к номинальному, КПД трансформатора $\eta_{\text{ном}} = 0,9 - 0,98$.

Паспортные данные трансформатора

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.

В табл.1 приведен перечень параметров трансформатора, составляющих его паспортные данные.

Номинальная мощность трансформатора $S_{\text{ном}}$ – электрическая полная мощность, определяемая произведением величин номинального первичного напряжения и номинального первичного тока, или произведением номинального вторичного напряжения и номинального вторичного тока:

$$S_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} = U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}} . \quad (19)$$



Табл. 1

Паспортные данные трансформатора

№	Наименование	Обозначение
1	Номинальная мощность трансформатора	$S_{\text{ном}}$, кВА
2	Номинальное первичное напряжение	$U_{1\text{ном}}$, кВ
3	Номинальное вторичное напряжение	$U_{2\text{ном}}$, 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 , %

Номинальное первичное напряжение $U_{1\text{ном}}$ – напряжение источника, к которому подключается трансформатор.

Номинальное вторичное напряжение $U_{2\text{ном}}$ – напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостой ход при номинальном первичном напряжении.

Соотношение номинальных первичного и вторичного напряжений определяет коэффициент трансформации:

$$k_T = U_{1\text{ном}} / U_{2\text{ном}}. \quad (20)$$

Мощность холостого хода P_0 – активная мощность, потребляемая трансформатором от источника в режиме холостой ход. Мощность холостого хода определяет магнитные потери

$$\Delta P_m = P_0. \quad (21)$$

Ток холостого хода i_0 – первичный ток трансформатора в режиме холостого хода, выраженный в процентах по отношению к номинальному первичному току.

Напряжение короткого замыкания u_K – напряжение на первичной обмотке трансформатора в опыте короткого замыкания, выраженное в процентах по отношению к номинальному первичному напряжению. Опыт короткого замыкания выполняется при небольшом напряжении на первичной обмотке, которое обеспечивает величину тока, равную номинальному значению. Это напряжение называют напряжением короткого замыкания U_{1K} .

Паспортное значение u_K :

$$u_K = \frac{U_{1K}}{U_{1\text{ном}}} 100\%. \quad (22)$$



Величина напряжения короткого замыкания силового трансформатора составляет от 4 до 10 % в зависимости от типа и мощности трансформатора.

Мощность короткого замыкания P_k – активная мощность, потребляемая трансформатором в опыте короткого замыкания

В опыте короткого замыкания устанавливается номинальный ток трансформатора. Поэтому электрические потери в этом опыте равны номинальным электрическим потерям. Таким образом, мощность короткого замыкания P_k определяет номинальные электрические потери $\Delta P_{эл.ном}$:

$$\Delta P_{эл.ном} = P_k . \quad (23)$$

Построение характеристик трансформатора по паспортным данным

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.

Зависимость КПД от нагрузки трансформатора в соответствии с (18) с учетом (21), (23):

$$\eta = \frac{S_{ном} \beta \cos \varphi_2}{S_{ном} \beta \cos \varphi_2 + P_0 + P_k \beta^2} . \quad (24)$$

Также по паспортным данным может быть рассчитана внешняя характеристика трансформатора $U_2(I_2)$ или $U_2(\beta)$. Для этого может использоваться следующее аналитическое выражение, полученное при анализе уравнений электрического состояния трансформатора:

$$U_2 = U_{2ном} - U_{2ном} \beta \frac{u_k}{100} (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) \quad (25)$$

$\cos \varphi_k$ определяется параметрами трансформатора:

$$\cos \varphi_k = \frac{100 P_k}{u_k S_{ном}} . \quad (26)$$

$\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности приемника определяется характером приемника.

Особенности трехфазных трансформаторов

В трехфазной сети переменного тока изменение напряжений осуществляет-

ся с помощью трехфазного силового трансформатора с общим для трех фаз сердечником (рис.6). На каждом стержне магнитопровода расположены первичная и вторичная обмотки каждой фазы.

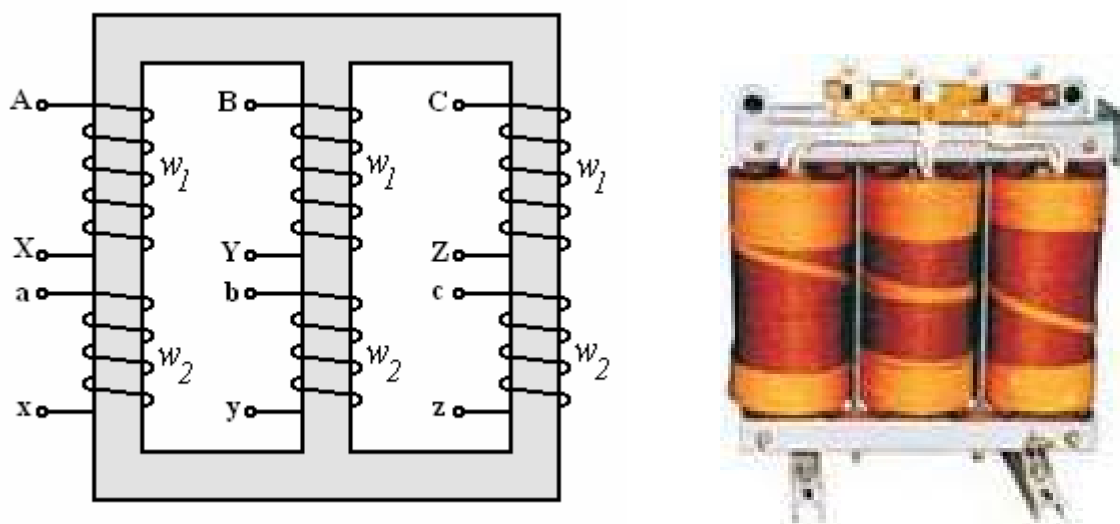


Рис. 6. Устройство трехфазного трансформатора

Расход стали на трехфазный трансформатор значительно меньше, чем на три однофазных трансформатора. Это делает его легче, дешевле, эффективней. Первичные и вторичные обмотки трех фаз соединяют между собой способами "звезда" или "треугольник". Способ соединения фаз первичной и вторичной обмоток определяется группой соединений, которая указывается в паспортных данных трансформатора. Например, на рис.7 показано условное обозначение трехфазного трансформатора с группой соединения обмоток "звезда / звезда с нейтралью" (Y/Y).

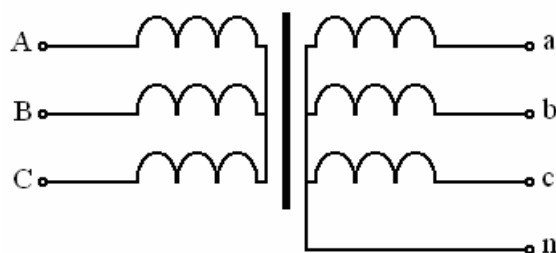


Рис. 7. Условное обозначение трехфазного трансформатора

Характеристики трехфазного трансформатора могут быть определены в расчете на одну фазу, принимая во внимание фазные величины. Соотношение фазных и линейных величин соответствует соотношениям в трехфазных цепях:

$$\text{при соединении фаз "Y"} : U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}, I_{\phi} = I_{\text{л}} = I_{\text{ном}}; \quad (27)$$



при соединении фаз "Δ" : $U_{\phi} = U_{\text{л}} = U_{\text{ном}}, I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{I_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}.$ (28)

Номинальная мощность симметричного трехфазного трансформатора

$$S_{\text{ном}} = \sqrt{3}U_{1\text{ном}}I_{1\text{ном}} = \sqrt{3}U_{2\text{ном}}I_{2\text{ном}}. \quad (29)$$

2. Пример расчета характеристик трехфазного трансформатора

Паспортные данные трансформатора:

Тип трансформатора	ТМ-1000/35
Номинальная полная мощность $S_{\text{ном}}$, кВА	1000
Номинальное первичное напряжение $U_{1\text{ном}}$, кВ	35
Номинальное вторичное напряжение $U_{2\text{ном}}$, кВ	0,4
Мощность холостого хода P_0 , кВт	2,75
Ток холостого хода i_0 , %	1,5
Мощность короткого замыкания $P_{\text{к}}$, кВт	12,2
Напряжение короткого замыкания $u_{\text{к}}$, %	6,5
Группа соединений обмоток	Δ/Υ

Характеристика нагрузки:

Характер приемника	активно-индуктивный
Коэффициент мощности приемника $\cos\varphi_2$	0,87
Величина нагрузки (коэффициент нагрузки β)	0,75

Решение:

Номинальные первичный и вторичный токи (в соответствии с (29)):

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 35} = 16,52 \text{ A}; \quad (30)$$

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{ном}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 1445,1 \text{ A}. \quad (31)$$

Номинальные фазные токи:

$$I_{1\text{ном.}\phi} = \frac{I_{1\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{16,52}{\sqrt{3}} = 9,55 \text{ A}; \quad (32)$$

$$I_{2\text{ном.}\phi} = I_{2\text{ном}} = 1445,1 \text{ A}. \quad (33)$$

Номинальные фазные напряжения (с учетом группы соединений обмоток):



$$U_{1ном.ф} = U_{1ном} = 35кВ; \quad (34)$$

$$U_{2ном.ф} = \frac{U_{2ном}}{\sqrt{3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3}} = 0,231кВ. \quad (35)$$

Коэффициент трансформации фазных напряжений

$$k_{T.ф} = \frac{U_{1ном.ф}}{U_{2ном.ф}} = \frac{35}{0,231} = 151,5. \quad (36)$$

Вторичное напряжение при работе с заданной нагрузкой (в соответствии с (25)):

$$\begin{aligned} U_2 &= U_{2ном} - U_{2ном} \beta \frac{u_K}{100} (\cos \varphi_K \cos \varphi_2 + \sin \varphi_K \sin \varphi_2) = \\ &= 0,4 - 0,4 \cdot 0,75 \frac{6,5}{100} (0,19 \cdot 0,87 + 0,98 \cdot 0,49) = 0,387кВ, \end{aligned} \quad (37)$$

$$\text{где: } \cos \varphi_K = \frac{100 P_K}{u_K S_{ном}} = \frac{100 \cdot 12,2}{6,5 \cdot 1000} = 0,19.$$

Коэффициент полезного действия при работе с заданной нагрузкой (в соответствии с (24)):

$$\eta = \frac{S_{ном} \beta \cos \varphi_2}{S_{ном} \beta \cos \varphi_2 + P_0 + P_K \beta^2} = \frac{1000 \cdot 0,75 \cdot 0,87}{1000 \cdot 0,75 \cdot 0,87 + 2,75 + 12,2 \cdot 0,75^2} = 0,985 \quad (38)$$

Для построения внешней характеристики и зависимости КПД от нагрузки проводится расчет напряжения и КПД при разной величине нагрузки (значении β). Результаты расчета приведены в табл. 2.

Табл. 2

β , д.е.	0	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,75	0,8	1
I_2 , А	0	72,2	144,5	289,0	578,0	867,0	1083,8	1156,1	1445,1
U_2 , В	0,4	0,399	0,398	0,397	0,393	0,390	0,387	0,387	0,383
η , %	0	94,0	96,8	98,2	98,7	98,7	98,5	98,5	98,3

Рассчитанные характеристики показаны на рис. 8 и 9.

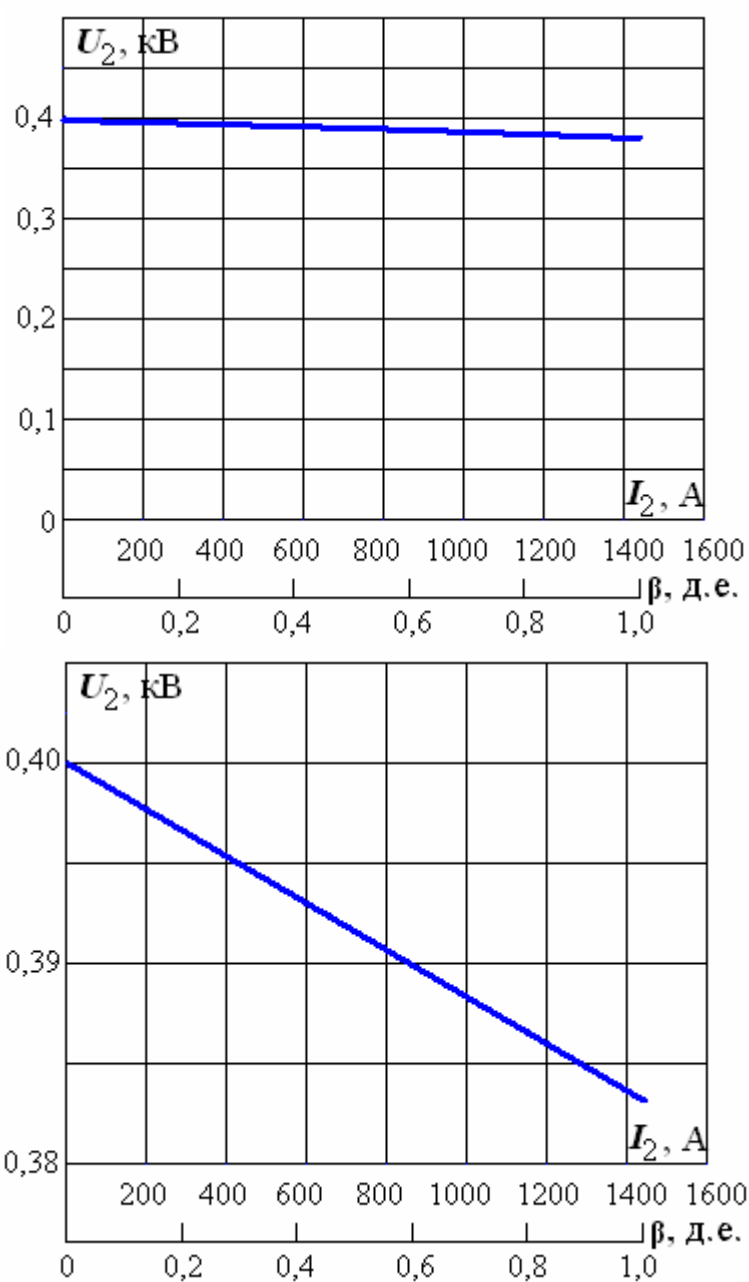


Рис. 8. Внешняя характеристика

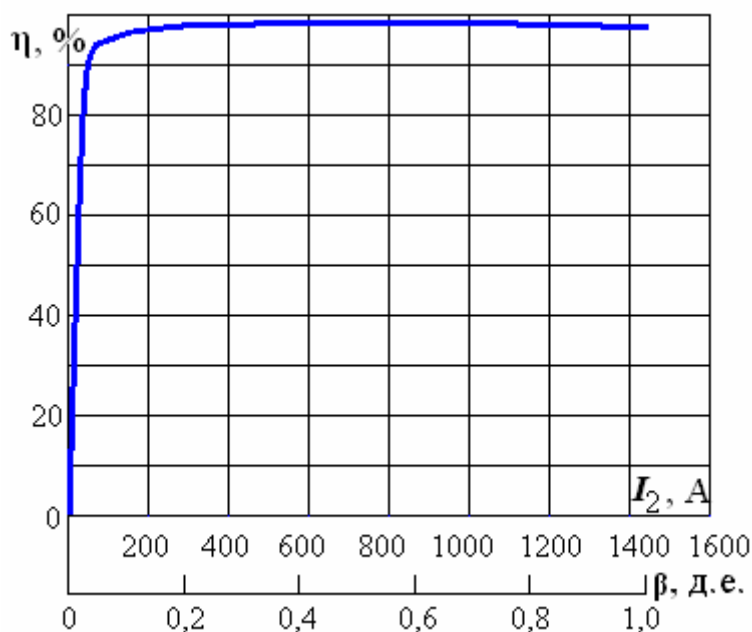


Рис. 9. Зависимость КПД от нагрузки

3. Задание и варианты исходных данных

Варианты паспортных данных заданного трехфазного трансформатора приведены в табл. 3.

Задание:

1. Определить номинальные фазные и линейные токи первичной и вторичной обмоток.
2. Определить коэффициент трансформации.
3. Определить номинальные фазные напряжения первичной и вторичной обмоток.
4. Определить вторичное напряжение и КПД трансформатора в режиме работы с заданными параметрами приемника ($\cos\varphi_2$ и β).
5. Рассчитать и построить внешнюю характеристику и зависимость КПД от нагрузки при заданных параметрах приемника.

Таблица 3

№ ва р.	Тип тр-ра	$S_{\text{ном}}$, кВА	$U_{1\text{ном}}$ кВ	$U_{2\text{ном}}$ кВ	P_0 , кВт	i_0 , %	P_k , кВт	u_k , %	Группа соедине- ний	Параметры приемника	
										β	$\cos\varphi_2$
1	ТМ-25/10	25	10,0	0,4	0,14	3,2	0,60	4,5	Y/Y	0,95	0,60



2	ТМ–40/10	40	10,0	0,4	0,19	3,0	0,88	4,5	Y/Y	0,90	0,65
3	ТМ–63/10	63	10,0	0,4	0,27	2,8	1,28	4,5	Y/Y	0,85	0,70
4	ТМ–100/10	100	10,0	0,4	0,37	2,6	1,97	4,5	Y/Y	0,80	0,75
5	ТМ–160/10	160	10,0	0,4	0,57	2,4	2,65	4,5	Y/Y	0,75	0,80
6	ТМ–160/10	160	10,0	0,4	0,57	2,4	2,65	4,5	Δ/Y	0,70	0,85
7	ТМ–250/10	250	10,0	0,4	0,82	2,3	3,70	4,5	Y/Y	0,65	0,60
8	ТМ–250/10	250	10,0	0,4	0,82	2,3	3,70	4,5	Δ/Y	0,60	0,65
9	ТМ–400/10	400	10,0	0,4	1,05	2,1	5,50	4,5	Y/Y	0,95	0,70
10	ТМ–400/10	400	10,0	0,4	1,05	2,1	5,50	4,5	Δ/Y	0,90	0,75
11	ТМ–630/10	630	10,0	0,4	1,56	2,0	7,60	5,5	Y/Y	0,85	0,80
12	ТМ–630/10	630	10,0	0,4	1,56	2,0	7,60	5,5	Δ/Y	0,80	0,85
13	ТМ–1000/10	1000	10,0	0,4	2,45	1,4	12,20	5,5	Y/Y	0,75	0,60
14	ТМ–1600/10	1600	10,0	0,4	3,30	1,3	18,00	5,5	Y/Y	0,70	0,65
15	ТМ–2500/10	2500	10,0	0,4	4,60	1,0	25,00	5,5	Y/Y	0,65	0,70
16	ТМ–100/35	100	35,0	0,4	0,46	2,6	1,97	6,5	Y/Y	0,60	0,75
17	ТМ–160/35	160	35,0	0,4	0,70	2,4	2,65	6,5	Y/Y	0,95	0,80
18	ТМ–250/35	250	35,0	0,4	1,00	2,3	3,70	6,5	Y/Y	0,90	0,85
19	ТМ–400/35	400	35,0	0,4	1,35	2,1	5,50	6,5	Y/Y	0,85	0,60
20	ТМ–630/35	630	35,0	0,4	1,90	2,0	7,60	6,5	Y/Y	0,80	0,65



21	ТМ–1000/35	1000	35,0	0,4	2,75	1,5	12,20	6,5	Y/Y	0,75	0,70
22	ТМ–1600/35	1600	35,0	0,4	3,65	1,4	18,00	6,5	Y/Y	0,70	0,75
23	ТМ–2500/35	2500	35,0	0,4	5,10	1,1	25,00	6,5	Y/Y	0,65	0,80
24	ТМ–4000/35	4000	35,0	0,4	6,70	1,0	33,50	7,5	Y/Δ	0,60	0,85
25	ТМ–6300/35	6300	35,0	6,3	9,40	0,9	46,50	7,5	Y/Δ	0,85	0,60
26	ТМ–10000/35	10000	35,0	6,3	14,50	0,8	65,00	7,5	Y/Δ	0,80	0,65
27	ТМ–1000/35	1000	35,0	6,3	2,75	1,5	12,20	6,5	Y/Y	0,75	0,70
28	ТМ–1600/35	1600	35,0	6,3	3,65	1,4	18,00	6,5	Y/Y	0,70	0,75
29	ТМ–2500/35	2500	35,0	6,3	5,10	1,1	25,00	6,5	Y/Y	0,65	0,80
30	ТМ–4000/35	4000	35,0	6,3	6,70	1,0	33,50	7,5	Y/Δ	0,60	0,85



Разработано по плану инновационной образовательной программы УГТУ-УПИ.

*Коллектив разработчиков
кафедры «Электротехника и электротехнологические системы»
УГТУ–УПИ*

*Сарапулов Федор Никитич – заведующий кафедрой, профессор, д.т.н.;
Проскуряков Валерий Степанович – доцент, к.т.н.;
Соболев Сергей Владимирович – доцент, к.т.н.;
Федотова Лидия Адамовна – доцент, к.т.н.;
Хрулькова Наталья Вячеславовна – ассистент.*

***Кафедра «Электротехника и электротехнологические системы»
УГТУ–УПИ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. Тел. 375-47-51,
E-mail: vpros@mail.ru***