

	Система менеджменту якості НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС навчальної дисципліни « <u>Електричні машини</u> » назва дисципліни	Шифр документа	СМЯ НАУ НМК 07.01.05 – 01 – 2018
		Стор. ___ з ___	

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Навчально-науковий Аерокосмічний інститут

(назва інституту (факультету))

**КАФЕДРА Автоматизації та енергоменеджменту**

(повна назва кафедри)

**ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ**

з дисципліни «Електричні машини»

Галузь знань: 14 "Електрична інженерія"

Спеціальність: 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Спеціалізація: Енергетичний менеджмент

(шифр та повна назва напрямку (спеціальності))

Укладач: к.т.н., доцент Тихонов Віктор

Васильович

(науковий ступінь, вчене звання, П.І.Б. викладача)

Матеріали домашнього завдання розглянути та  
 схвалені на засіданні кафедри автоматизації та  
енергоменеджменту

(повна назва кафедри)

Протокол № \_\_\_ від « \_\_\_ » \_\_\_ 2018 р.

Завідувач кафедри Захарченко В.П.

## Домашне задание

### ВСТУП

В методических рекомендациях рассмотрен вопрос выполнения домашнего задания по расчету параметров трансформатора исходя из основных паспортных данных.

В процессе выполнения домашнего задания студенты знакомятся с методикой расчетов, изучают материалы, которые используются в при эксплуатации трансформаторов. Это позволяет проанализировать влияние основных параметров технические характеристики трансформатора.

Задание на домашнее задание определяется согласно дополнению 1 в соответствии с заданным номером варианта. Номер варианта определяется двумя последними цифрами номера зачетной книжки.

### Теоретическая часть

*Трансформатор* представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

#### *Режимы работы трансформатора и КПД.*

Схема замещения реального двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь представлена на рис. 7.1.

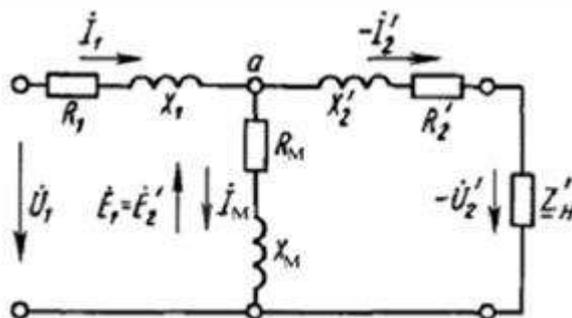


Рис. 1 Схема замещения двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $R_1, X_1$  – активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки;  $R_2', X_2'$  – активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки, приведенное к первичной;  $R_M, X_M$  – активное и индуктивное сопротивление ветви намагничивания;  $U_1$  – первичное напряжение;  $U_2'$  – вторичное напряжение, приведенное к первичному;  $I_1, I_2', I_M$  – токи в соответствующих ветвях.

В связи с тем, что у первичной и вторичной обмоток трансформатора неодинаковое количество витков (т.е.  $k \neq 1$ ), первичные и вторичные напряжения, токи и сопротивления имеют различный порядок. Следовательно, для развязки магнитной связи и возможности совместного решения уравнений, описывающих работу трансформатора, параметры вторичной обмотки должны быть приведены к первичной обмотке. Для этого вторичное напряжение и ЭДС следует умножить на коэффициент трансформации, вторичный ток разделить на коэффициент трансформации, а вторичное сопротивление умножить на квадрат коэффициента трансформации:

$$E'_2 = k \cdot E_2 = E_1, \quad U'_2 = k \cdot U_2, \quad I'_2 = I_2 / k, \quad R'_2 = k^2 \cdot R_2, \quad X'_2 = k^2 \cdot X_2. \quad (1)$$

Представленная схема замещения трансформатора описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \dot{I}_1 + Z_M \cdot \dot{I}_M; \\ -\dot{U}'_2 = R'_2 \cdot \dot{I}'_2 + j \cdot X'_2 \cdot \dot{I}'_2 + Z_M \cdot \dot{I}_M; \\ \dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \end{cases} \quad (2)$$

Учитывая, что  $Z_M \dot{I}_M = -\dot{E}_1$ , система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \dot{I}_1 - \dot{E}_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}_1 - R'_2 \cdot \dot{I}'_2 - j \cdot X'_2 \cdot \dot{I}'_2; \\ \dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \end{cases} \quad (3)$$

Параметры схемы замещения трансформатора можно определить по опытам холостого хода и короткого замыкания.

При опыте *холостого хода* к первичной обмотке с помощью регулятора напряжения (РН) подводят номинальное напряжение  $U_0 = U_{ном}$ , а ко вторичной – вольтметр (рис. 2).

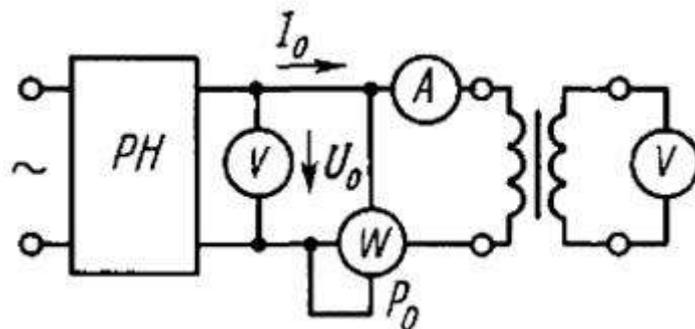


Рис. 2 – Схема исследования трансформатора в режиме холостого хода

Измерив ток холостого хода  $I_0$  и мощность  $P_0$  можно рассчитать сопротивление:

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0}, \quad R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \quad (4)$$

а также коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (5)$$

и коэффициент мощности холостого хода

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 \cdot I_0}. \quad (6)$$

Схема замещения трансформатора (рис.1) в режиме холостого хода приводится к виду, представленному на рисунке 3.

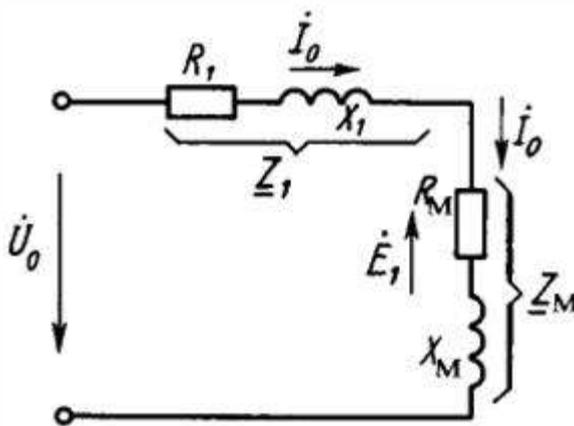


Рис. 3 – Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

При холостом ходе справедливы следующие соотношения:

$$Z_0 = Z_1 + Z_M; \quad R_0 = R_1 + R_M; \quad X_0 = X_1 + X_M. \quad (7)$$

Учитывая, что в силовых трансформаторах  $R_1$  и  $X_1$  во много раз меньше  $R_M$  и  $X_M$ , можно сказать, что

$$Z_0 \approx Z_M; \quad R_0 \approx R_M; \quad X_0 \approx X_M. \quad (8)$$

По этой же причине мощность холостого хода трансформатора равна магнитным потерям в магнитопроводе. Эти потери также называют потерями в стали трансформатора.

В опыте короткого замыкания вторичные обмотки замыкаются накоротко, а к первичным обмоткам во избежание перегрева и

повреждения трансформатора подводится пониженное напряжение с таким расчетом, чтобы по обмоткам проходил номинальный ток (рис. 4).

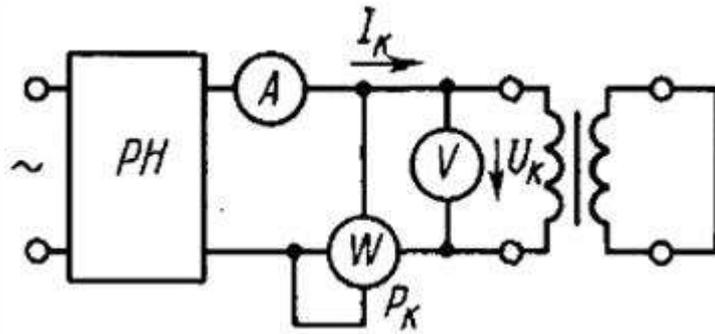


Рис. 4 – Схема исследования трансформатора в режиме короткого замыкания

Полное  $Z_K$ , активное  $R_K$  и реактивное  $X_K$  сопротивления короткого замыкания рассчитываются по формулам, аналогичным для случая холостого хода.

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K}, \quad R_K = \frac{P_K}{I_K^2}, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \quad (9)$$

Согласно схеме замещения (рис. 1):

$$Z_K = Z_1 + \frac{Z_M \cdot Z_2'}{Z_M + Z_2'}. \quad (10)$$

Так как  $Z_M$  во много раз больше  $Z_2'$ , то в знаменателе  $Z_2'$  можно пренебречь, тогда

$$Z_K = Z_1 + Z_2', \quad R_K = R_1 + R_2', \quad X_K = X_1 + X_2'. \quad (11)$$

Обычно принимают

$$Z_1 = Z_2' = 0,5 \cdot Z_K; \quad R_1 = R_2' = 0,5 \cdot R_K; \quad X_1 = X_2' = 0,5 \cdot X_K. \quad (12)$$

Учитывая (11) схему замещения трансформатора (рис. 7.1) в режиме короткого замыкания можно привести к виду, представленному на рис. 5.

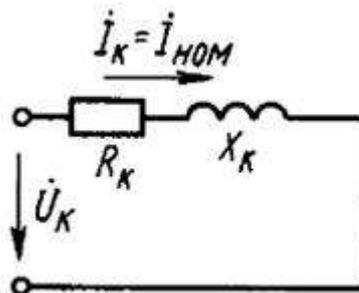


Рис. 5 – Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания

Таким образом, в режиме короткого замыкания мощность расходуется на электрические потери в обмотках трансформатора. Эти потери также называют потерями в меди трансформатора.

Полные потери мощности в трансформаторе при номинальной нагрузке:

$$\Delta P = P_0 + P_K . \quad (13)$$

При режиме, отличном от номинального, следует учитывать коэффициент загрузки трансформатора, влияющий на электрические потери:

$$k_3 = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} , \quad (14)$$

где  $I_{2\text{ном}}$  – номинальный ток вторичной обмотки.

Под *номинальным* следует понимать такой режим работы трансформатора, при котором основные параметры (мощность, напряжение, ток) соответствуют величинам, на которые он рассчитан по условиям нагревания и безаварийной работы в течение установленного срока службы. В номинальном режиме трансформатор имеет наибольший коэффициент полезного действия и не перегревается. Трансформаторы могут работать и при ненормальных условиях. Обычно, при нагрузке меньше номинальной, КПД и коэффициент мощности меньше номинальных. При нагрузках больше номинальных появляется опасность перегрева обмоток, что может привести к преждевременному выходу из строя их изоляции.

Номинальный ток первичной обмотки может быть определен по формуле:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ном}}} , \quad (15)$$

где  $S_{1\text{ном}}$ ,  $U_{1\text{ном}}$  – номинальные мощность и напряжение первичной обмотки трансформатора.

Потери мощности трансформатора при любом режиме будут определяться по формуле:

$$\Delta P = P_0 + k_3^2 \cdot P_K . \quad (16)$$

Мощность, передаваемая потребителям  $P_2$ , равна мощности, потребляемой трансформатором из сети  $P_1$  за вычетом потерь  $\Delta P$  :

$$P_2 = P_1 - \Delta P = P_1 - P_0 - k_3^2 \cdot P_K . \quad (17)$$

Тогда коэффициент полезного действия трансформатора равен:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + k_3^2 \cdot P_K} 100\% \quad (18)$$

Трансформаторы относят к статическим не имеющим вращающихся деталей электрическим машинам переменного тока. Основными параметрами силовых трансформаторов используемых при разработке систем электроснабжения являются: полная номинальная мощность  $S_{1\text{ном}}$ , номинальное напряжение первичной  $U_{1\text{ном}}$  и вторичной  $U_{2\text{ном}}$  обмотки.

### Примеры решения задач

Для трехфазного трансформатора мощностью  $S_{1\text{ном}} = 100$  кВА, соединение обмоток которого Y-Y-0, известно:  $U_{1\text{ном}} = 6000$  В,  $U_{20} = 400$  В,  $u_K = 5,5\%$ ,  $P_K = 2400$  Вт,  $P_0 = 600$  Вт,  $I_0 = 0,07I_{1\text{ном}}$  Вт. Определить:

- 1) Сопротивление обмоток трансформатора  $R_1, X_1, R_2, X_2$ ;
- 2) Эквивалентное сопротивление  $Z_0$  и его составляющие  $R_0, X_0$ ;
- 3) Коэффициент полезного действия при нагрузке в 60% и  $\cos\varphi_H = 0,87$ .

*Решение.*

Номинальный ток первичной обмотки:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9,6 \text{ А.}$$

Ток холостого хода:

$$I_0 = 0,7 \cdot I_{1\text{ном}} = 0,7 \cdot 9,6 = 0,67 \text{ А.}$$

Сопротивления короткого замыкания:

$$z_K = U_{K\Phi} / I_{K\Phi} = u_K \cdot U_{1\text{ном}\Phi} / I_{1\text{ном}} = 0,055 \cdot 6000 / \sqrt{3} \cdot 9,6 = 19,6 \text{ Ом.}$$

В знаменателе появляется множитель  $\sqrt{3}$ , т.к. в справочных данных указывается линейное значение  $U_{1\text{ном}}$ , а т.к. схема соединения Y-Y-0, то  $U_{1\text{ном}\Phi} = U_{1\text{ном}} / \sqrt{3}$ .

$$r_K = P_K / 3I_K^2 = 2400 / 3 \cdot 9,6^2 = 8,7 \text{ Ом.}$$

(В знаменателе появляется множитель 3, т.к. в справочных данных значение  $P_K$  указывается суммарное для трех фаз, а сопротивления вычисляются для одной фазы.)

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} = \sqrt{19,6^2 - 8,7^2} = 17,9 \text{ Ом.}$$

Сопротивления первичной обмотки:

$$r_1 = r'_2 = 0,5 \cdot r_K = 0,5 \cdot 8,7 = 4,35 \text{ Ом.}$$

$$x_1 = x'_2 = 0,5 \cdot x_K = 0,5 \cdot 17,9 = 8,95 \text{ Ом.}$$

Сопротивления вторичной обмотки определим, учитывая коэффициент приведения:

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{20}} = \frac{6000}{400} = 15$$

$$r_2 = r'_2 / k^2 = 4,35 / 225 = 0,0193 \text{ Ом.}$$

$$x_2 = x'_2 / k^2 = 8,95 / 225 = 0,0398 \text{ Ом.}$$

Сопротивления намагничивающей ветви:

$$z_0 = U_0 / I_0 = 6000 / \sqrt{3} \cdot 0,67 = 5180 \text{ Ом.}$$

$$r_0 = P_0 / I_0^2 = 600 / 3 \cdot 0,67^2 = 447 \text{ Ом.}$$

$$x_0 = \sqrt{5180^2 - 447^2} = 5160 \text{ Ом.}$$

Коэффициент полезного действия

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{k_3 \cdot S_{1\text{ном}} \cdot \cos\varphi_H}{k_3 \cdot S_{1\text{ном}} \cdot \cos\varphi_H + P_0 + k_3^2 \cdot P_K} 100\% = \\ &= \frac{0,6 \cdot 100000 \cdot 0,87}{0,6 \cdot 100000 \cdot 0,87 + 600 + 0,6^2 \cdot 2400} 100\% = 97,3\%. \end{aligned}$$

## Варианти домашнього завдання

№ завдання	Номинальна потужність $S_n$ , кВ·А	$U_n$ ВН, кВ	$U_n$ НН, кВ	Схеми та групи з'єднання	Втрати, кВт		$i_0$ %	$u_k$ %
					хх, $P_0$	кз $P_{кз}$		
1.	40	6	0,4	Y/Y	0,22	1,11	3,0	4,5
2.	40	10	0,4	Y/Y	0,23			
3.	60	6	0,4	Y/Y	0,24	1,28	2,8	4,5
4.	60	10	0,4	Y/Y	0,26			
5.	80	6	0,4	Y/Y	0,28	1,65	2,7	4,5
6.	80	10	0,4	Y/Y	0,30			
7.	100	6	0,4	Y/Y	0,33	1,97	2,6	4,5
8.	100	10	0,4	Y/Y	0,35			
9.	120	6	0,4	Y/Y	0,38	2,14	2,6	5,0
10.	120	10	0,4	Y/Y	0,40			
11.	140	6	0,4	Y/Y	0,44	2,34	2,5	5,0
12.	140	10	0,4	Y/Y	0,48			
13.	160	6	0,4	Y/Y	0,51	2,65	2,5	5,0
14.	160	10	0,4	Y/Y	0,55			
15.	180	6	0,4	Y/Y	0,60	2,88	2,4	5,0
16.	180	10	0,4	Y/Y	0,64			
17.	200	6	0,4	Y/Y	0,68	3,2	2,4	5,5
18.	200	10	0,4	Y/Y	0,70			
19.	220	6	0,4	Y/Y	0,72	3,4	2,4	5,5
20.	220	10	0,4	Y/Y	0,73			
21.	240	6	0,4	Y/Y	0,74	3,7	2,3	5,5
22.	240	10	0,4	Y/Y	0,76			
23.	260	6	0,4	Y/Y	0,80	4,0	2,2	5,5
24.	260	10	0,4	Y/Y	0,84			
25.	280	6	0,4	Y/Y	0,88	4,2	2,1	6,0
26.	280	10	0,4	Y/Y	0,90			
27.	300	6	0,4	Y/Y	0,96	4,5	2,1	6,0
28.	300	10	0,4	Y/Y	1,00			
29.	340	6	0,4	Y/Y	1,04	4,8	2,0	6,0
30.	340	10	0,4	Y/Y	1,1			