

I_K – ток короткого замыкания, А;
 U_K – напряжение короткого замыкания, В;
 E – действующее значение ЭДС, В;
 M – момент, Нм;
 η – коэффициент полезного действия (КПД);
 β – коэффициент нагрузки;
 r – активное сопротивление, Ом;
 g – активная проводимость, См;
 Z – комплексное полное сопротивление, Ом;
 x – реактивное сопротивление, Ом;
 P – активная мощность, Вт;
 S – полная мощность, ВА;
 s – скольжение;
 n – скорость вращения, об/мин;
 p – число пар полюсов;
 i – мгновенное значение тока, А;
 φ – угол сдвига фаз между напряжением и током, рад;
 $\cos\varphi$ – коэффициент мощности.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №16 **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ** **ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

1.1. Цель работы.

Изучение экспериментальных методов определения параметров схемы замещения приведенного трансформатора.

1.2. Теоретические сведения

Электромагнитная схема однофазного трансформатора приведена на рисунке 1.1. Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Передача энергии от источника и нагрузке осуществляется посредством магнитного поля. Сердечник в трансформаторах служит для усиления магнитной связи между первичной и вторичной обмотками, то есть для уменьшения магнитного сопротивления среды [1].

Первичное переменное напряжение $\dot{U}_1$ создает ток $\dot{I}_1$ который возбуждает переменный магнитный поток $\dot{\Phi}_0$, который индуцирует в пер-

Министерство образования и науки Украины
 Севастопольский национальный технический университет



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ **к выполнению лабораторных работ** **по электротехническим дисциплинам** **№ 16 – 20**

для студентов дневной и заочной форм обучения
 направлений
 6.0902 – Инженерная механика,
 6.0915 – Компьютерная инженерия,
 6.0909 – Приборы

Часть 3

Севастополь
 2006



Методические указания к выполнению лабораторных работ по электротехническим дисциплинам № 16–20 для студентов дневной и заочной форм обучения направлений 6.0902 – Инженерная механика, 6.0915 – Компьютерная инженерия, 6.0909 – Приборы. – Ч.3 /Е.Б. Башук, Г.Ф. Косова, В.Н. Мирянова. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – 36 с.

Целью методических указаний является привитие навыков исследования свойств и расчета электрических цепей. Лабораторные работы предполагают изучение трансформаторов и электрических машин различных типов. Каждая лабораторная работа кроме кратких теоретических сведений и указаний по её выполнению содержит требования к оформлению и содержанию отчета, а также перечень контрольных вопросов.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры СПЭМС (протокол № 10 от «22» июня 2006г.)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент: Олейников А.М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Судовых и промышленных электромеханических систем.

5. По данным таблицы 5.1 рассчитать, используя формулы (5.1), (5.3)–(5.7) и паспортные данные ДПТ, и построить механическую характеристику $f=n(M)$ и рабочие характеристики $f=I_{\text{я}}(P_1)$, $f=M(P_2)$, $f=\eta(P_2)$, $f=n(P_2)$.

6. По данным таблиц 5.2 и 5.3 построить графики $f=n(I_{\text{я}})$, $f=n(I_{\text{в}})$.

5.4. Содержание отчета

1. Схема лабораторной установки (рисунок 5.3).
2. Расчет характеристик ДПТ по формулам (5.1), (5.3)–(5.7).
3. Результаты эксперимента и расчета (заполненные таблицы 5.1 – 5.3)
4. Графики зависимостей $f=n(M)$, $f=I_{\text{я}}(P_1)$, $f=M(P_2)$, $f=\eta(P_2)$, $f=n(P_2)$, $f=n(I_{\text{я}})$, $f=n(I_{\text{в}})$.
5. Выводы.

5.5. Контрольные вопросы

1. Какие способы возбуждения магнитного поля в ДПТ. Вам известны?
2. Каковы особенности ДПТ.
3. Изложите принцип действия ДПТ.
4. Что называется механической характеристикой ДПТ.
5. Какие существуют способы регулирования скорости ДПТ.
6. Что собой представляют рабочие характеристики ДПТ.
7. Какова роль пускового реостата?
8. Как определить ток якоря при пуске?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин А.С. Электротехника/А.С. Касаткин, М.В.Немцов. – М.: Высш. шк., 2003. – 542 с.
2. Данилов И.А. Общая электротехника с основами электроники/ И.А. Данилов, П.М. Иванов. – М.: Высш. шк., 2005. – 751 с.
3. Евдокимов Ф.Е. Общая электротехника/ Ф.Е. Евдокимов. – М.: Высш. шк., 2004. – 367 с.
4. Кацман М. М. Электрические машины/ М. М. Кацман. – М.: Высш. шк., 2000. – 464 с.
5. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высш. шк., 2002. – 605 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи/ Л.А. Бессонов. – М.: Изд-во «Гардарики», 2002. – 640 с.



Таблица 5.1 – Экспериментальные и расчетные данные

Режим	Измерено			Вычислено				
	I_A	I_B	n	I	P_1	P_2	η	M
	А	А	об/мин	А	Вт	Вт	%	Н·м
Холостой ход								
1								
⋮								
7								

4. Исследовать способы регулирования ДПТ. Осуществить реостатное регулирование. Подготовить двигатель к пуску в режиме холостого хода (см. пункт 2). Запустить двигатель при $R_L=0$. Изменяя сопротивление R_L от 0 до $R_{L\max}$, записать несколько значений скорости вращения и тока якоря в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Данные реостатного регулирования ДПТ

Измеряемые величины	Положение движка реостата R_L						
	0	1	2	3	4	5	max
I_A , А							
n , об/мин							

Осуществить полюсное регулирование. В этом случае после пуска двигателя пусковое сопротивление поддерживать необходимо неизменным $R_L=0$.

Изменяя сопротивление реостата в обмотке возбуждения R_B от 0 до $R_{B\max}$, получить данные для построения зависимости $f=n(I_B)$. при этом скорость вращения двигателя не должна превышать номинальную на величину не более 15 – 20%. Результаты эксперимента занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Данные реостатного полюсного регулирования ДПТ

Измеряемые величины	Положение движка реостата R_B						
	0	1	2	3	4	5	max
I_B , А							
n , об/мин							

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Принятые обозначения	3
1. Лабораторная работа №16. Экспериментальное определение параметров однофазного трансформатора.....	4
2. Лабораторная работа №17. Исследование работы однофазного трансформатора под нагрузкой	13
3. Лабораторная работа №18. Изучение конструкции, анализ каталожных данных асинхронных двигателей	18
4. Лабораторная работа №19. Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	23
5. Лабораторная работа №20. Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения	29
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	35

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум (третья часть) включает шесть лабораторных работ, охватывающих основные разделы изучаемых дисциплин, посвященные трансформаторам и электрическим машинам. Каждая лабораторная работа выполняется в течение двух академических часов. В процессе подготовки к выполнению студент должен ознакомиться с основными теоретическими положениями, описанием лабораторной установки и выполнить предварительные теоретические расчеты.

Принятые обозначения

I – действующее значение тока, А;
 U – действующее значение напряжения, В;
 I_N – номинальное значение тока, А;
 U_N – номинальное значение напряжения, В;
 I_X – ток холостого хода, А;
 U_X – напряжение холостого хода, В;



I_K – ток короткого замыкания, А;
 U_K – напряжение короткого замыкания, В;
 E – действующее значение ЭДС, В;
 M – момент, Нм;
 η – коэффициент полезного действия (КПД);
 β – коэффициент нагрузки;
 r – активное сопротивление, Ом;
 g – активная проводимость, См;
 Z – комплексное полное сопротивление, Ом;
 x – реактивное сопротивление, Ом;
 P – активная мощность, Вт;
 S – полная мощность, ВА;
 s – скольжение;
 n – скорость вращения, об/мин;
 p – число пар полюсов;
 i – мгновенное значение тока, А;
 φ – угол сдвига фаз между напряжением и током, рад;
 $\cos\varphi$ – коэффициент мощности.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №16

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1.1. Цель работы.

Изучение экспериментальных методов определения параметров схемы замещения приведенного трансформатора.

1.2. Теоретические сведения

Электромагнитная схема однофазного трансформатора приведена на рисунке 1.1. Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Передача энергии от источника и нагрузке осуществляется посредством магнитного поля. Сердечник в трансформаторах служит для усиления магнитной связи между первичной и вторичной обмотками, то есть для уменьшения магнитного сопротивления среды [1].

Первичное переменное напряжение $\dot{U}_1$ создает ток $\dot{I}_1$ который возбуждает переменный магнитный поток $\dot{\Phi}_0$, который индуцирует в пер-

В настоящей лабораторной работе в качестве нагрузки ДПТ с ШОВ используется генератор Γ постоянного тока с общим механическим валом. Схема эксперимента изображена на рисунке 5.3. Генератор нагружен магазином сопротивлений R_H . Для измерения скорости вращения двигателя используется тахогенератор $ТГ$, имеющий жесткую механическую связь с двигателем $Д$. Оборудование расположено за лабораторным стендом, а основные выводы находятся на наклонной панели этого стенда.

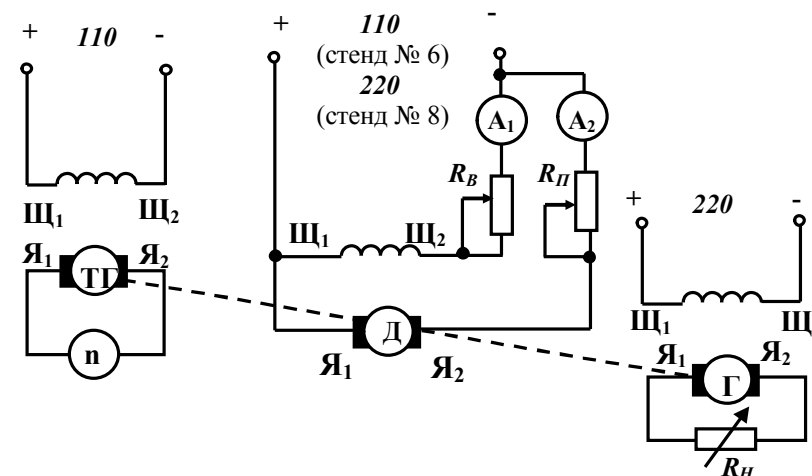


Рисунок 5.3 – Схема эксперимента

5.3. Порядок выполнения работы

1. Переписать номинальные данные исследуемого двигателя со стенда.

2. Собрать схему, изображенную на рисунке 5.3. Исследовать ДПТ в режиме холостого тока. Перед пуском установить движок реостата в положение $R_H = \max$, а сопротивление реостата возбуждения принять $R_B = 0$. Включить источник питания двигателя и тахогенератора, по мере разгона двигателя уменьшить R_H до нуля. Окончательные показания приборов занести в таблицу 5.1 в первую строку.

3. Испытать двигатель под нагрузкой. Подать напряжение на обмотку возбуждения нагрузочного генератора, предварительно отключив резисторы нагрузки.

Увеличивая нагрузку, включая сопротивления R_H , до значения тока якоря двигателя $I_A = I_{ном}$, записать в таблицу 5.1 данные 6-7 режимов.



При $R_H=0$ механическую энергию называют естественной, а при $R_H \neq 0$ – искусственной характеристикой (рисунок 5.2, а)).

Точка холостого хода ($M_0 = 0$) с частотой вращения

$$n_0 = \frac{U}{C_E \cdot \Phi}$$

является общей для всех механических характеристик.

Изменение скорости в пределах от скорости холостого хода до номинальной по естественной механической характеристике, составляют 3÷5 % от n_0 . Анализируя выражение (5.2), укажем способы регулирования скорости двигателя при неизменном моменте сопротивления нагрузки:

- 1) реостатное регулирование – изменением сопротивления R_{Σ} ;
- 2) полюсное регулирование осуществляется уменьшением I_B за счет увеличения сопротивления R_B , что приводит к уменьшению потока Φ , в свою очередь, к увеличению скорости;
- 3) регулирование скорости напряжением якоря. С уменьшением напряжения уменьшается частота вращения. Этот способ энергетически выгоден, особенно при использовании полупроводниковых преобразователей.

Рабочими характеристиками ДПТ называются зависимости тока якоря, момента на валу двигателя M_{Σ} , КПД, скорости вращения от мощности на валу двигателя P_2 . Их вид показан на рисунке 5.2, б).

КПД двигателя определяется соотношением

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%, \quad (5.3)$$

где

$$P_1 = UI \quad (5.4)$$

– потребляемая мощность;

$$P_2 = P_1 - \Delta P \quad (5.5)$$

– мощность на валу;

$$\Delta P = P_{I_{\Sigma}} + (I_{\Sigma} - I_{\Sigma_{\Sigma}})^2 \cdot R_{\Sigma} \quad (5.6)$$

– приближенная величина суммарной мощности потерь.

Величина электромагнитного момента двигателя

$$M_{\Sigma} = 9550 \cdot P_2 / n. \quad (5.7)$$

вичной обмотке переменную противоЭДС. самоиндукции $\dot{E}_1$, а во вторичной – переменную ЭДС. взаимной индукции $\dot{E}_2$. При подключении ко вторичным зажимам нагрузки, во вторичной цепи возникает ток $\dot{I}_2$. Токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ создают потоки рассеяния $\dot{\Phi}_{p1}$, $\dot{\Phi}_{p2}$ сцепляющиеся только со своими обмотками W_1 и W_2 . Обмотки электрически не связаны.

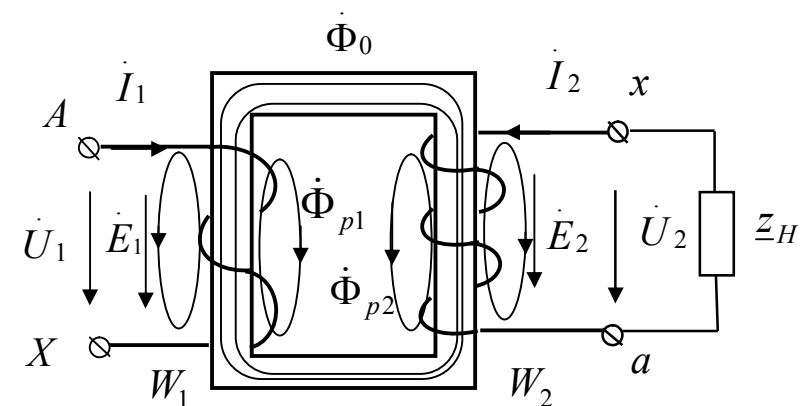


Рисунок 1.1 – Электромагнитная схема однофазного трансформатора

Уравнения электрического состояния для обмоток трансформаторов имеют вид.

$$\begin{aligned} E_1 &= R_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \\ E_2 &= R_2 \dot{I}_2 + jx_2 \dot{I}_2 - \dot{U}_2 \end{aligned} \quad (1.1)$$

Уравнение ЭДС трансформатора

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_{1X} W_1 \quad (1.2)$$

где $\dot{I}_{1X}$ – ток холостого хода трансформатора при номинальном первичном напряжении $\dot{U}_{1H}$.

Вследствие перемagnetивания стали в магнитопроводе трансформатора возникают потери энергии от гистерезиса и вихревых токов. Следовательно, ток I_{1X} наряду с реактивной составляющей I_{pX} , идущей на созда-



ние основного потока Φ , имеет еще и активную составляющую I_{ax} . В итоге на основании первого закона Кирхгофа:

$$I_{1X} = \sqrt{I_{px}^2 + I_{ax}^2}. \quad (1.3)$$

Для создания единой схемы замещения обмоток 1 и 2 осуществляют приведение вторичной обмотки к первичной, сохраняя все мощности и сдвиги фаз неизменными. Это достигается умножением уравнения (1.1) на коэффициент трансформации $k = W_1/W_2$ и (2.2) - на $1/W_2$:

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 k &= \dot{U}_2 k + k R_2 \dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{1X} - \dot{I}_2 \frac{W_2}{W_1} = \dot{I}_{1X} - \dot{I}_2', \end{aligned}$$

где $\dot{I}_2' = \dot{I}_2 W_2 / W_1$ - является приведенным вторичным током. Вводя обозначения для вторичных величин, приведенных к числу витков первичной обмотки:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2' &= k \dot{U}_2, \quad \dot{E}_2' = k \dot{E}_2 = \dot{E}_1, \\ \dot{I}_2' &= \frac{\dot{I}_2}{k}, \quad R_2' = k^2 R_2, \quad X_2' = k^2 X_2, \end{aligned}$$

запишем основные уравнения для приведенных параметров

$$\begin{aligned} \dot{E}_2' &= R_2' \dot{I}_2' + j X_2' \dot{I}_2', \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{1X} - \dot{I}_2'. \end{aligned}$$

Такое приведение облегчает исследование режимов работы трансформатора и позволяет рассматривать соответствующую схему замещения (рисунок 1.2), в которой индуктивная связь между обмотками трансформатора заменена соответствующими электрическими соединениями.

Параметры схемы замещения приведенного трансформатора определяются экспериментальным путем.

Для этого при номинальном первичном напряжении $U_1 = U_{1H} = U_X$ проводится **опыт холостого хода (XX)** (рисунок 1.3).

Для ограничения тока якоря в якорную цепь последовательно включают пусковой реостат R_{Π} .

Начальный пусковой ток якоря

$$I_{яп.} = U / (R_{я0} + R_{\Pi})$$

где $R_{я0}$ – малое внутреннее сопротивление якоря.

Ток якоря не должен превышать допустимого по условиям искрения на коллекторе:

$$I_{яп} \leq I_{я.доп} = (2 \div 2.5) I_{ян},$$

где $I_{ян}$ – номинальный ток якоря.

Принцип действия двигателя основан на взаимодействии тока якоря $I_я$ с магнитным потоком Φ главных полюсов статора. При этом создается вращающий электромагнитный момент якоря

$$M_{\varepsilon} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я},$$

где C_M – механическая постоянная ДПТ (приводится в каталогах).

Для увеличения момента при пуске с помощью реостата возбуждения R_B устанавливают наибольший поток (номинальный) Φ_H (при токе I_{BH}). При этом начальный пусковой момент двигателя

$$M_{\Pi} = (2 \div 2.5) M_H,$$

где M_H – номинальный момент.

При вращении возникает противоЭДС

$$E_{я} = C_E \cdot \Phi \cdot n,$$

где C_E – электрическая постоянная ДПТ (выбирается по каталогу); n – скорость вращения якоря.

Поэтому в дальнейшем ток якоря может определяться формулой

$$I_{я} = (U - E_{я}) / (R_{я0} + R_{\Pi}).$$

Для поддержания темпа разгона якоря нужно уменьшать R_{Π} , поддерживая условие $I_{я} = const$. Когда вращающий электромагнитный момент станет равным моменту сопротивления, дальнейший разгон прекратится, якорь будет продолжать вращаться с установившейся скоростью вращения.

Зависимость, связывающая между собой частоту вращения и электромагнитный момент, называется механической характеристикой

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_{я0} + R_{\Pi}}{C_E C_M \Phi^2} \cdot M_{\varepsilon}. \quad (5.2)$$



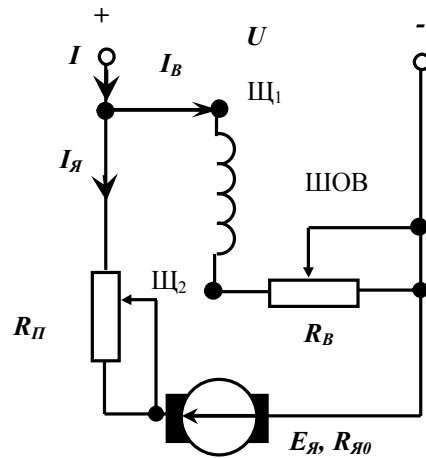


Рисунок 5.1 – Электрическая схема ДПТ

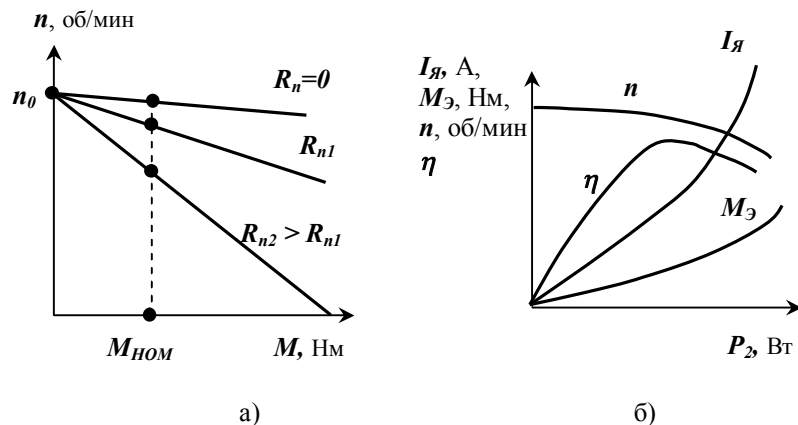


Рисунок 5.2 – Механические а) и рабочие б) характеристики ДПТ

Общий ток двигателя определяется выражением

$$I = I_{\text{Я}} + I_{\text{Б}}, \quad (5.1)$$

где $I_{\text{Я}}$ – ток якоря; $I_{\text{Б}}$ – ток возбуждения, создающий магнитный поток статора Φ .

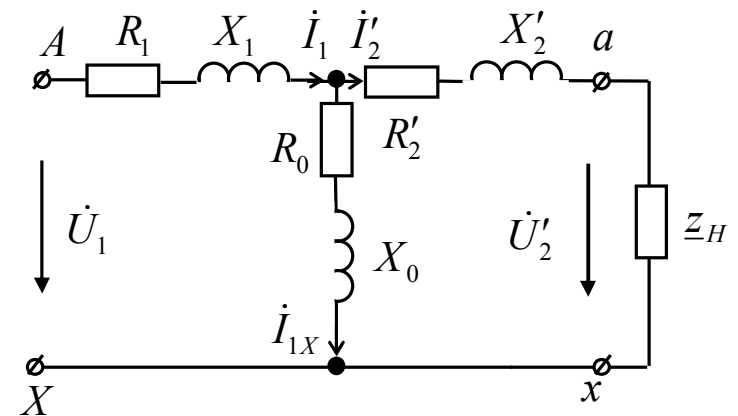


Рисунок 1.2 – Схема замещения однофазного трансформатора

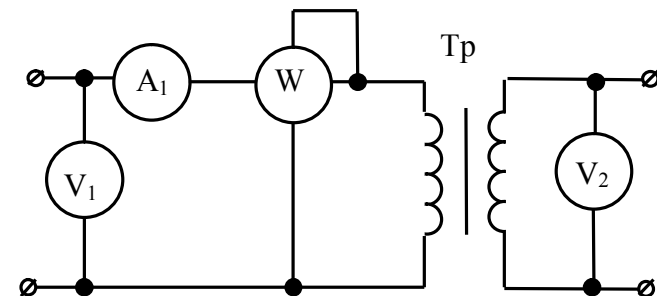


Рисунок 1.3 – Схема эксперимента для режима холостого хода

Измеряемые величины: ток холостого хода I_{1X} , мощность P_{1X} , вторичное напряжение U_{2X} . Входное сопротивление трансформатора совпадает с полным сопротивлением ветви намагничивания, поскольку в трансформаторах общего назначения величины R_0 , X_0 в сотни раз превышают соответствующие значения R_1 , X_1 . По этой причине справедливы соотношения:



$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{1X}}, \quad k = \frac{U_{1H}}{U_{2X}}, \quad R_0 = \frac{P_{1X}}{I_{1X}^2}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2},$$

$$\cos \varphi_X = \frac{P_{1X}}{U_{1H} \cdot I_{1X}}, \quad \delta = 90^\circ - \varphi_X, \quad (1.4)$$

где δ – угол магнитных потерь.

Помимо этого проводится **опыт короткого замыкания (КЗ)** при сильно сниженном первичном напряжении $U_1 = U_{1K} \cong (0,05 \div 0,15) \cdot U_{1H}$ (рисунок 1.4), величина которого соответствует току первичной обмотки трансформатора, равному номинальному $I_1 = I_{1K} = I_{1H}$.

С учетом вышеуказанного относительно сопротивлений ветви намагничивания, током намагничивания в режиме КЗ можно пренебречь и определить параметры короткого замыкания Z_K, R_K, X_K , с помощью соотношений

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1H}}, \quad R_K = \frac{P_{1K}}{I_{1X}^2},$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \quad \cos \varphi_K = \frac{P_{1K}}{U_{1K} \cdot I_{1H}}. \quad (1.5)$$

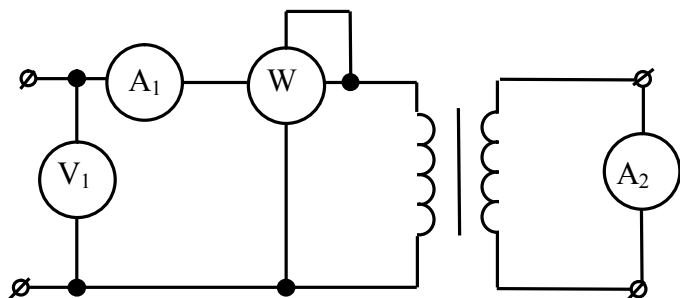


Рисунок 1.4 – Схема эксперимента для режима короткого замыкания

Одновременно определяется величина напряжения КЗ

4.4. Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки (рисунок 4.4).
2. Расчет характеристик АД.
3. Экспериментальные и расчетные данные (заполненная таблица 4.1)
- Графики зависимостей $M=f(n)$, $I=f(n)$, $\cos \varphi=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$, $M_2=f(P_2)$, $n=f(P_2)$.
4. Выводы.

4.5. Контрольные вопросы

1. Что такое синхронная скорость?
2. Изложите принцип действия АД.
3. Что такое скольжение?
4. Каковы характерные точки механической характеристики?
5. Перечислите параметры схемы замещения АД.
6. Что представляют собой рабочие характеристики АД?
7. Почему частота вращения ротора АД меньше синхронной?
8. Какие существуют способы регулирования частоты вращения АД? Дайте сравнительную оценку.
9. Укажите уравнение электрического равновесия для одной фазы АД.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №20

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

5.1. Цель работы

1. Испытания двигателя постоянного тока (ДПТ) параллельного возбуждения в режиме холостого хода и под нагрузкой.
2. Построение механической и рабочих характеристик ДПТ.
3. Изучение способов регулирования скорости вращения ДПТ.

5.2. Теоретические сведения

ДПТ выгодно отличаются возможностью получения различных значений частоты вращения, в том числе и свыше 3000 об/мин, и простотой ее регулирования в широком диапазоне, возможностью создавать значительные пусковые и рабочие моменты.

Якорь (рисунок 5.1) и шунтовая обмотка возбуждения (ШОВ) ДПТ подключаются параллельно друг другу и сети постоянного напряжения U .



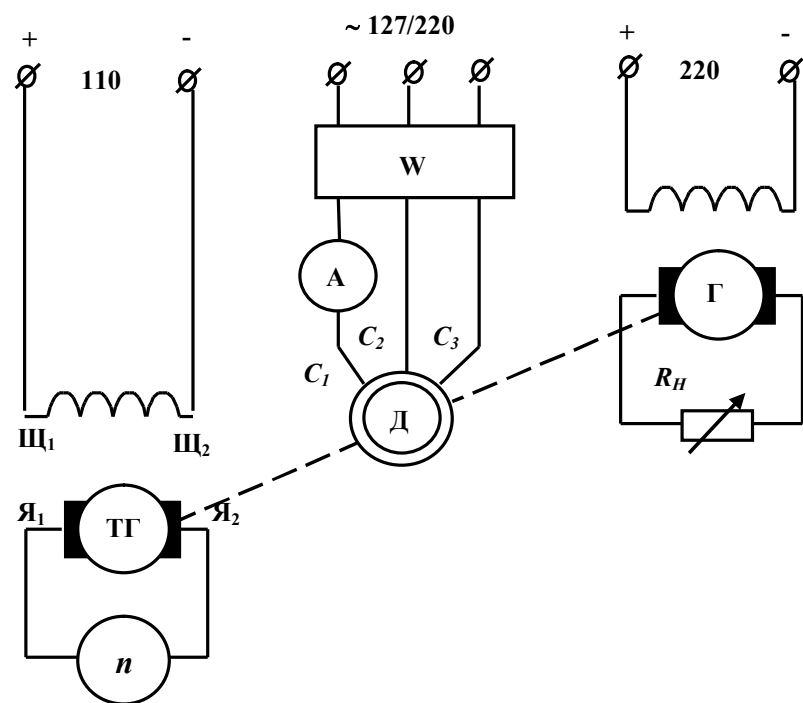


Рисунок 4.4 – Схема эксперимента

5. Отключить все источники. Соединить статорные обмотки АД треугольником. Повторить пункты 3, 4.

6. По данным измерений рассчитать параметры, необходимые для построения $M=f(s)$, $I=f(P_2)$, $M=f(P_2)$, $n=f(P_2)$, $\cos\varphi=f(P_2)$. При расчетах рекомендуется использовать приближенные соотношения для мощности на валу двигателя $P_2=P_1-P_{1\text{ХХ}}$;

для вращающего момента двигателя $M = \frac{9550}{n} P_2$.

7. По данным таблицы 4.1 построить в одних координатных осях механические характеристики $M=f(n)$ и зависимость $I=f(n)$.

Построить рабочие характеристики $\cos\varphi=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$, $M_2=f(P_2)$, $n=f(P_2)$ в одной системе координат.

8. Сравнить полученные результаты для соединения обмоток статора звездой и треугольником, сделать выводы.

$$U_K = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100\% \approx 3 \div 10\%, \quad (1.6)$$

которую указывают в паспорте трансформатора. Обычно у трансформаторов параметры первичной обмотки и приведенной вторичной обмотки определяют по формулам

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_K}{2}, \quad X_1 = X'_2 = \frac{X_K}{2}. \quad (1.7)$$

Располагая параметрами схемы замещения трансформатора, задаваясь сопротивлением нагрузки Z_H , при неизменных значениях напряжения U_1 , частоты f и коэффициента мощности нагрузки $\cos\varphi_2$, можно вычислить все величины, характеризующие работу трансформатора, и построить его характеристики.

Векторные диаграммы токов и напряжений трансформатора в режимах ХХ и КЗ приведены на рисунках 1.5, 1.6 соответственно.

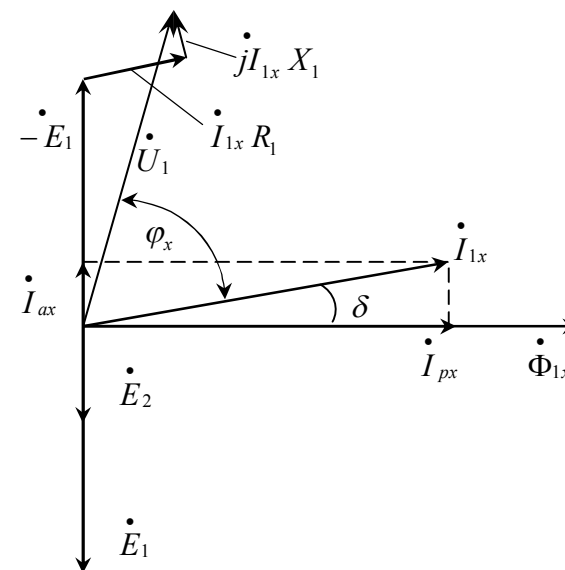


Рисунок 1.5 – Векторная диаграмма токов и напряжений трансформатора в режиме холостого хода



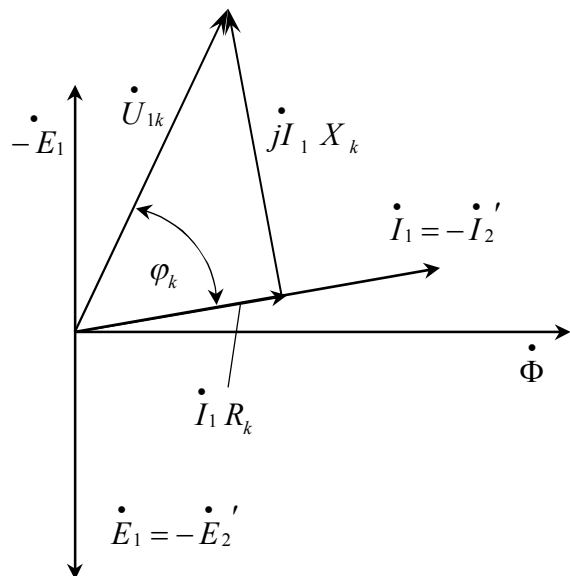


Рисунок 1.6 – Векторная диаграмма токов и напряжений трансформатора в режиме короткого замыкания

Для построения векторной диаграммы токов и напряжений режиме ХХ может использоваться следующий алгоритм:

1. Горизонтально откладывается вектор потока $\dot{\Phi}_{1x}$ произвольной длины.
2. Под углом δ (см. формулы (1.4)) к вектору потока откладывается вектор тока $\dot{I}_{1x}$ (измерен в опыте ХХ).
3. На основании формулы (1.3) строятся векторы $\dot{I}_{px}$ (совпадает с $\dot{\Phi}_{1x}$) и $\dot{I}_{ax}$ (опережает вектор $\dot{I}_{px}$ на угол 90°).
4. Под углом φ_x (см. формулы (1.4)) к вектору тока $\dot{I}_{1x}$ откладывается вектор напряжения $\dot{U}_1$ (измерено в опыте ХХ).
5. Под углом 90° к вектору тока $\dot{I}_{1x}$ строится вектор $j\dot{I}_{1x}X_1$ напряжения на реактивном сопротивлении первичной обмотки X_1 .

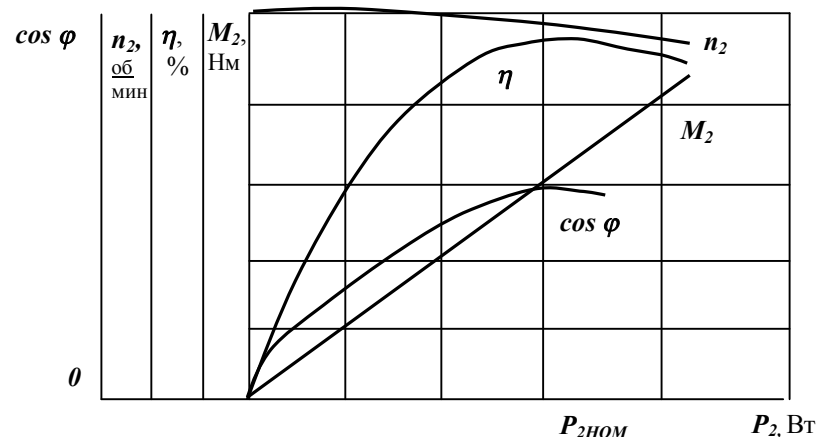


Рисунок 4.3 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

4.3. Порядок выполнения работы

1. Записать номинальные данные исследуемого двигателя.
2. Собрать цепь, схема которой изображена на рисунке 4.4. Соединить обмотки статора звездой.
3. Включить все источники при отключенной нагрузке. Измерить пусковой ток двигателя. Записать показания приборов при холостом ходе двигателя в таблицу 4.1.
4. Включить все сопротивления $R_l - R_6$. Снять показания приборов при изменении сопротивления нагрузки путем поочередного отключения сопротивлений $R_l - R_6$ и занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Экспериментальные и расчетные данные

Режим	Измерено			Вычислено				
	I	P_l	n	S	P_2	η	M	$\cos \varphi$
	А	Вт	об/мин	–	Вт	%	Н·м	–
Холостой ход								
Y	1							
	⋮							
	6							
Δ	1							
	⋮							
	6							



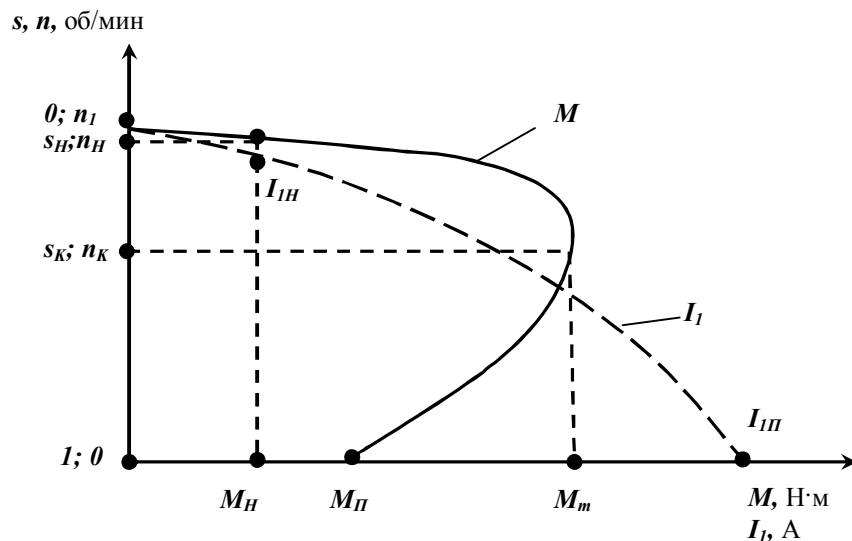


Рисунок 4.2 – Механическая характеристика АД и зависимость тока статора от скольжения

Анализ характеристики АД позволяет считать его в отличие от трансформатора универсальным преобразователем, который изменяет не только значение, но и частоту вторичных напряжений и токов.

В данной лабораторной работе для создания нагрузочного момента M_2 на валу трехфазного АД в установке используется генератор постоянного тока Г, вал которого соединен с валом двигателя. Нагрузкой генератора постоянного тока является группа резисторов $R_1 - R_6$.

Скорость вращения АД измеряется тахогенератором ТГ, ЭДС якоря которого пропорциональна оси вращения АД. Общая механическая связь указана на схеме штриховой линией. Указателем скорости является вольтметр, градуированный в единицах скорости (об/мин) и подключенный к якорю ТГ.

6. Вектор напряжения на активной составляющей первичной обмотки

$\dot{I}_{1x} R_1$ строится совпадающим по фазе с вектором тока $\dot{I}_{1x}$.

7. По второму закону Кирхгофа (первое уравнение формул (1.1)) определяется вектор $-\dot{E}_1$ и ему противоположный $\dot{E}_1$.

8. ЭДС $\dot{E}_2$ по величине будет равна напряжению $\dot{U}_{2x}$. Вектор $\dot{E}_2$ сонаправлен с вектором $\dot{E}_1$.

Аналогично строится векторная диаграмма для режима КЗ.

1.3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Выписать со стенда паспортные данные исследуемого трансформатора. В настоящей работе исследуется маломощный однофазный трансформатор, который установлен внутри лабораторного стенда, а выводы его обмоток находятся в зоне условного обозначения трансформатора на горизонтальной панели стенда.

2. Исследовать трансформатор в режиме холостого хода. Для этого собрать цепь по схеме, изображенной на рисунке 1.3. Установить входное напряжение регулируемого источника равным номинальному напряжению $U_1 = U_{1H}$ (значение взять из паспортных данных трансформатора). Снять показания приборов и занести их в таблицу 1.1.

3. По данным опыта на основании формул (2.4) рассчитать коэффициент трансформации k , параметры ветви намагничивания Z_0 , R_0 , X_0 , угол сдвига фаз между током и напряжением первичной обмотки φ_X , угол магнитных потерь δ . Результаты расчетов занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Данные опыта холостого хода

Установлено	Измерено			Вычислено						
$U_1 = U_{1H}$	I_{1X}	P_{1X}	U_{2X}	k	Z_0	R_0	X_0	$\cos \varphi_X$	φ_X^0	δ^0
В	А	Вт	В	---	Ом	Ом	Ом	---	---	---

4. Исследовать трансформатор в режиме короткого замыкания.

Регулятор напряжения установить в положение, соответствующее минимальному напряжению! При проведении опыта следует обеспечить точный контроль величины тока первичной цепи, во избежание создания аварийной ситуации.



Выводы вторичной обмотки трансформатора соединить замкнуть накоротко – присоединить к выводам амперметра, который обладает минимальным внутренним сопротивлением.

Включить источник. Контролируя значение тока, плавно увеличивая напряжение достичь условия $I_{1K} = I_{1H}$ (это значение взять из паспортных данных трансформатора). Данные опыта занести в таблицу 1.2.

5. Рассчитать параметры КЗ Z_K , R_K , X_K и сопротивления первичной и вторичной обмоток R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , используя формулы (1.5), (1.6), (1.7). Результаты занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Данные опыта короткого замыкания

Устано- влено	Измерено			Вычислено								
				U _к	Z _к	R _к	X _к	φ _к	R ₁	X ₁	R ₂	X ₂
I _{1к} =I _{1н}	U _{1к}	I _{2к}	P _{1к}	U _к	Z _к	R _к	X _к	φ _к	R ₁	X ₁	R ₂	X ₂
А	В	А	Вт	В	Ом	Ом	Ом	град	Ом	Ом	Ом	Ом

6. Построить векторные диаграммы токов и напряжений трансформатора для режимов холостого хода и короткого замыкания.

2.4. Содержание отчета

1. Схемы эксперимента (рисунки 1.3, 1.4).
2. Результаты экспериментальных и расчетных данных (заполненные таблицы 1.1, 1.2).
3. Рисунок схемы замещения трансформатора. Расчет параметров схемы замещения трансформатора по формулам (1.4), (1.5), (1.6).
4. Векторные диаграммы режимов холостого хода и короткого замыкания.
5. Выводы.

2.5. Контрольные вопросы

1. Перечислите виды потерь в трансформаторе.
2. Изложите принцип действия трансформатора.
3. Дайте характеристику режиму холостого хода.
4. Как определить коэффициент трансформации однофазного трансформатора?
5. Дайте характеристику режиму короткого замыкания.
6. Перечислите основные элементы схемы замещения приведенного трансформатора.
7. Приведите алгоритм построения векторной диаграммы трансформатора в режиме холостого хода.

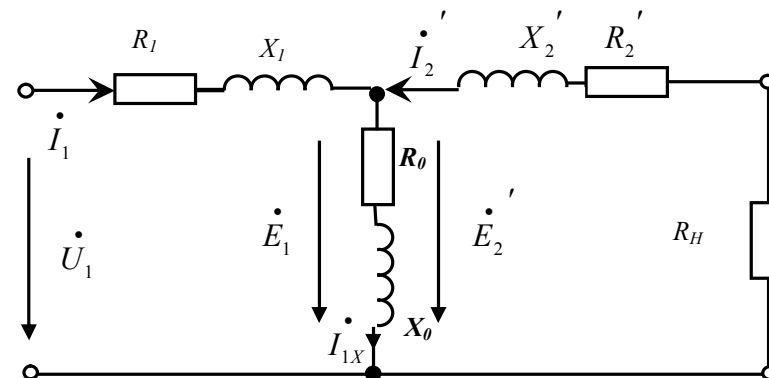


Рисунок 4.1 – Схема замещения асинхронного двигателя

Приведенные величины определяются из соотношений

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{K_I}; \quad \dot{E}'_2 = K_E \dot{E}_2; \quad R'_2 = k \cdot R_2; \quad X'_2 = k \cdot X_2, \quad (4.6)$$

где

$$K_I = \frac{m_1 \cdot K_{o\phi 1} \cdot W_1}{m_2 \cdot K_{o\phi 2} \cdot W_2}; \quad K_E = \frac{K_{o\phi 1} \cdot W_1}{K_{o\phi 2} \cdot W_2}; \quad k = K_I \cdot K_E; \quad (4.7)$$

m_1 и m_2 – число фаз обмоток статора и ротора

$K_{o\phi 1}$, $K_{o\phi 2}$ – обмоточные коэффициенты статора и ротора, учитывающие особенности их конструкции ($K_{o\phi 1}=0,95 - 0,96$, для двигателя с короткозамкнутым ротором $K_{o\phi 2}=1$).

Ток короткозамкнутого ротора

$$\dot{I}'_2 = \dot{E}'_2 (R'_2 / s + jX'_2) \quad (4.8)$$

зависит от скольжения. Зависимость тока статора от скольжения представлена на рисунке 4.2. Характерными точками графика являются: I_{1H} – номинальный ток, I_{1H} – номинальный пусковой ток.

Работа трехфазного АД графически описывается механической характеристикой $n=f(M)$ и рабочими характеристиками: $\cos \varphi=f(P_2)$ – зависимость коэффициента мощности, $\eta=f(P_2)$ – зависимость к.п.д., $M_2=f(P_2)$ – зависимость полезного момента, $n=f(P_2)$ – зависимость частоты вращения от нагрузки на валу (рисунки 4.2, 4.3).



$$n_0 = n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}. \quad (4.1)$$

Вращающийся магнитный поток Φ , замыкаясь через статор, воздушный зазор, ротор, пересекает обмотки статора и ротора индуцируя в них ЭДС. (индукционное действие поля). При замкнутой цепи ротора проявляется механическое действие поля. Совокупность всех сил действующих на проводники ротора создает общий электромагнитный момент, совпадающий с направлением вращения поля. Для создания вращающего момента ротор должен вращаться медленнее поля, т.е. асинхронно.

В качестве оценки разности частот вращения поля и ротора используется параметр – скольжение s .

$$s = \frac{(n_0 - n)}{n_0} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

где n – скорость вращения ротора, об/мин.

В начальный момент пуска ротор неподвижен, $n=0$, начальное пусковое скольжение $s_{II}=1$. С ростом n скольжение уменьшается. Зная скольжение, можно определить скорость вращения ротора:

$$n = n_0(1 - s). \quad (4.3)$$

Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке АД, называется номинальным скольжением s_H . Для АД s_H изменяется в пределах от 1 – 8%.

Существует аналогия между АД и трансформаторами, которая очевидна при неподвижном роторе. Несмотря на конструктивные различия, электромагнитные процессы в АД аналогичны электромагнитным процессам в трансформаторе. Схема замещения АД изображена на рисунке 4.1.

Приведенные к статору уравнения электрического равновесия для фазы статора и ротора имеют вид (см. рисунок 4.1):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1, \\ 0 &= \dot{E}_2' - \frac{R_2'}{S} \dot{I}_2' - jX_2' \dot{I}_2' - \dot{U}_H'. \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

Уравнение токов двигателя

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1X} - \dot{I}_2'. \quad (4.5)$$

8. Приведите соотношения для расчета параметров ветви намагничивания трансформатора.

9. Приведите соотношения для расчета параметров первичной и вторичной обмоток трансформатора.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №17 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

2.1. Цель работы. Изучение зависимостей основных характеристик трансформатора (коэффициент мощности, вторичного напряжения и к.п.д.) от нагрузки.

2.2. Теоретические сведения

Ввиду наличия активного сопротивления обмоток трансформатора и магнитных потоков рассеяния, напряжение на зажимах вторичной обмотки зависит от нагрузки. Иллюстрируют эту зависимость внешние характеристики, показывающие изменение вторичного напряжения U_2 при изменении вторичного тока I_2 при неизменном коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = \text{const}$, номинальных значениях первичного напряжения U_{1H} и частоты. Об изменении вторичного напряжения судят по величине

$$\Delta U = \frac{U_{2X} - U_2}{U_{2X}}, \quad (2.1)$$

где U_{2X} – вторичное напряжение в режиме холостого хода трансформатора (см. лабораторную работу № 17).

Практически процентное изменение вторичного напряжения вычисляют по приближенной формуле

$$\Delta U \approx \beta \cdot (U_a \cdot \cos \varphi_2 + U_p \cdot \sin \varphi_2),$$

где

$$\beta = \frac{I_1}{I_{2H}} \quad (2.2)$$

– коэффициент нагрузки;

$U_a = P_{1K} / 100 S_H$ % - активная составляющая напряжения короткого замыкания (в процентах);

S_H - номинальная полная мощность;



$U_p = \sqrt{U_K^2 - U_a^2}$ – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания;

U_K – напряжение короткого замыкания в процентах (см. лабораторную работу № 16).

На рисунке 2.1 приведены графики зависимости $\Delta U = f(\beta)$ трансформатора, работающего при различных значениях коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_2$.

Работа трансформатора сопровождается магнитными и электрическими потерями. Магнитные потери связаны с перемагничиванием сердечника и возникновением в нем вихревых токов. При неизменных значениях первичного напряжения и частоты переменного тока эти потери практически неизменны и соответствуют мощности P_{1x} и измеряемой в опыте холостого хода.

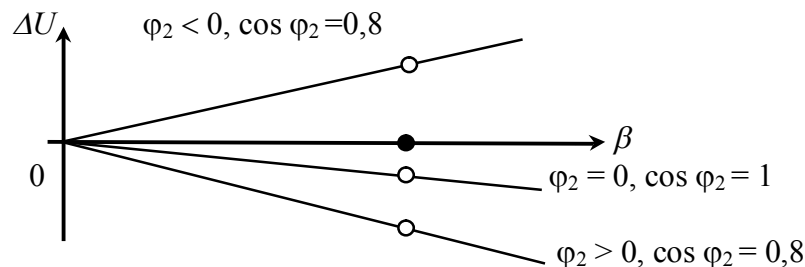


Рисунок 2.1 – Внешние характеристики трансформатора для различного характера нагрузки

Электрические потери определяют нагрев обмоток трансформатора, зависят от нагрузки трансформатора и равны $\beta^2 P_{1K}$.

Следовательно, КПД трансформатора при любой нагрузке

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.3)$$

или

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{1x} + \beta^2 P_{1K}} = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_{1x} + \beta^2 P_{1K}}.$$

3.4. Содержание отчета

1. Рисунки основных элементов конструкции асинхронных двигателей.
2. Номинальные данные АД.
3. Результаты проверки маркировки зажимов фаз статора АД.
4. Расчет механической характеристики АД по паспортным данным и таблица 3.1 с данными расчета.
5. График механической характеристики $M_D = f(n)$.
6. Выводы.

3.5. Контрольные вопросы

1. Каковы основные конструктивные элементы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
2. Каково условно-графическое обозначение в схеме АД с короткозамкнутым ротором?
3. Каково расположение соединительных пластин на зажимах обмотки статора при соединении «треугольником», «звездой»?
4. Как производится маркировка зажимов фаз статора?
5. Перечислите номинальные данные АД.
6. Что такое синхронная скорость двигателя?
7. Что такое скольжение?
8. Как рассчитывается механическая характеристика АД с помощью формулы Клосса?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №19 ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРТОКЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

4.1. Цель работы

1. Испытание асинхронного двигателя (АД) под нагрузкой.
2. Исследование рабочих характеристик АД.

4.2. Теоретические сведения

Принцип действия АД основан на способности обмотки статора (обмотки возбуждения) создавать вращающееся магнитное поле за счет особенностей конструкции и трехфазной питающей сети.

Частота вращения этого поля n_0 или синхронная частота вращения n_1 (об/мин) пропорциональна частоте тока в обмотке статора f_1 и обратно пропорциональна числу пар полюсов p обмотки возбуждения



2.3. Порядок выполнения работы

1. Переписать со стенда номинальные данные исследуемого трансформатора.

2. Исследовать трансформатор под нагрузкой. Для этого собрать схему, изображенную на рисунке 2.3. Включить источник переменного регулируемого напряжения. Установить напряжение источника $U_1 = U_{1H}$. Изменяя сопротивление нагрузки путем включения резисторов $R_1 \div R_6$, увеличить ток нагрузки трансформатора от нуля до значения I_{2H} (6 значений). Данные опыта записать в таблицу 2.1.

3. Построить экспериментальный график внешней характеристики. Для этого рассчитать значения ΔU и коэффициента нагрузки β , используя формулы (2.1), (2.2).

4. Построить зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки, используя соотношение (2.3). По формуле (2.4) теоретически определить значение коэффициента нагрузки β_0 , соответствующего максимальному КПД и сверить с результатом эксперимента.

Таблица 2.1 – Экспериментальные и расчетные данные

Измерено						Вычислено			
R_H	$U_1 = U_{1H}$	P_1	I_1	U_2	I_2	β	$P_2 = U_2 I_2 \times \cos \varphi_2$	η	$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}$
Ом	В	Вт	А	В	А	--	Вт	%	---
х.х									
R_1									
R_2									
R_3									
R_4									
R_5									
R_6									

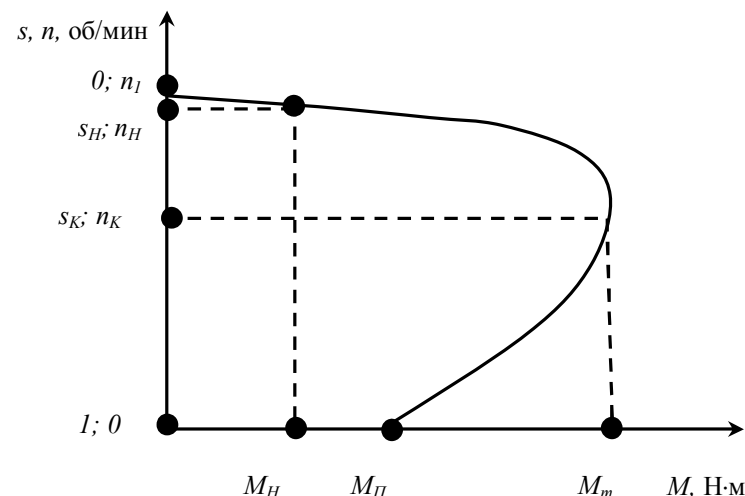


Рисунок 3.3 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

При ее отсутствии знание номинальных данных дает возможность ее вычислить. Для этого определяются номинальный момент

$$M_H = 9550 P_H / n_H; \quad (3.4)$$

максимальный момент

$$M_m = \lambda_m \cdot M_H; \quad (3.5)$$

синхронная частота вращения

$$n_1 = 60 \cdot f_1 / p; \quad (3.6)$$

номинальное скольжение

$$s_H = (n_1 - n_H) / n_1. \quad (3.7)$$

Подстановкой значения s_H , M_H , M_m в практическую формулу механической характеристики АД (формулу Клосса) определяется критическое скольжение

$$s_K = s_H (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}). \quad (3.8)$$

Используя рассчитанные значения M_m и s_K и задаваясь рядом значением s , определяют соответствующие значения вращающего электромагнитного момента



Р_р. Зажимы на одной из фаз произвольно обозначаются С₁, С₄. Если стрелка вольтметра отклоняется, то зажим С₄ соединен с зажимом С₂ – началом второй фазы статора (рисунок 3.2,а), иначе зажим С₂ соединен с С₅ концом второй фазы статора (рисунок 3.2,б).

Таким же образом определяются зажимы С₄ и С₆ начала и конца третьей фазы статора.

В каталоге для АД с короткозамкнутым ротором указаны следующие номинальные параметры: P_H – номинальная мощность (механическая определяемая на валу); $2p$ – число полюсов статора; n_H – номинальное число оборотов; f_1 – частота сети; η – номинальный КПД; $\cos\varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности; U_{1H} – номинальное линейное напряжение; I_{1H} – номинальный линейный ток, потребляемый из сети;

$\lambda_m = \frac{M_m}{M_H}$; $\lambda_{II} = \frac{M_{II}}{M_H}$ – кратность максимального M_m и пускового M_{II}

моментов соответственно; $K_{II} = \frac{I_{II}}{I_{НОМ}}$ – кратность пускового тока;

⋄ (звезда), Δ (треугольник) – схема соединения обмоток статора.

ПРИМЕР: Следящая система оснащена исполнительным АД типа 4А100 4, который имеет следующие технические данные:

$P_{НОМ} = 40$ кВт; $\eta = 84\%$; $\cos\varphi_H = 0,84$; $n_0 = 1600$ об/мин;

$\lambda_m = 2,2$; $\lambda_{II} = 2,0$; $K_{II} = 6,5$;

По этим данным можно определить: активную мощность, потребляемую двигателем как трехфазным приемником из сети:

$$P_{1H} = P_H / \eta_H; \quad (3.1)$$

полную мощность

$$S_{1H} = P_{1H} / \cos\varphi_H = P_H / (\eta_H \cdot \cos\varphi_H); \quad (3.2)$$

реактивную мощность

$$Q_{1H} = \sqrt{S_{1H}^2 - P_{1H}^2}. \quad (3.3)$$

Часто в каталогах приводится график механической характеристики $n=f(M)$ (рисунок 3.3).

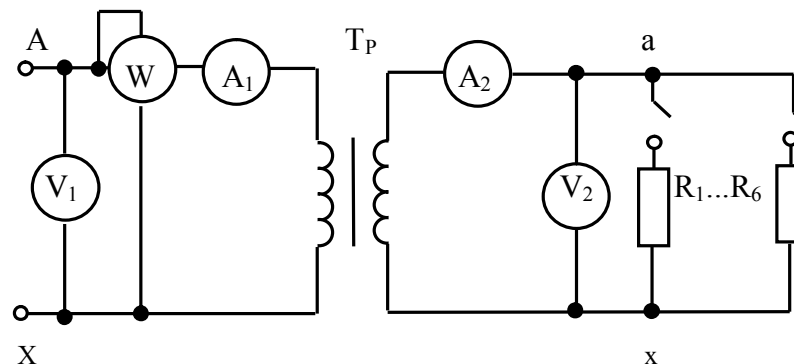


Рисунок 2.3 – Схема эксперимента

5. Построить зависимость коэффициента мощности трансформатора от мощности нагрузки $\cos\varphi_1 = f(P_2)$. Мощность P_2 следует определять по формуле

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

При этом необходимо учитывать, что коэффициент мощности $\cos\varphi_2 = 1$ ввиду активного характера нагрузки.

2.4. Содержание отчета

1. Схема лабораторной установки (Рисунок 2.3).
2. Результаты экспериментальных и расчетных данных (заполненная таблица 2.1).
3. Графики зависимостей $\Delta U = f(\beta)$, $\eta = f(\beta)$, $\cos\varphi_1 = f(P_2)$.
4. Выводы.

2.5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение к.п.д. трансформатора.
2. Опишите характер изменения коэффициента мощности трансформатора при изменении нагрузки.
3. Как зависят электрические и магнитные потери от нагрузки трансформатора?
4. Дайте характеристику номинального режима трансформатора.
5. Какие виды эксплуатационных характеристик трансформатора вы знаете?
6. Что такое внешняя характеристика трансформатора?



7. Как определяется коэффициент нагрузки? Чему он равен при максимальном КПД?
8. Перечислите виды потерь в трансформаторе.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №18

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ, АНАЛИЗ КАТАЛОЖНЫХ ДАННЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. Цель работы

1. Изучение конструктивных особенностей асинхронных двигателей, разметки зажимов фаз, анализ каталожных данных асинхронных двигателей (АД).
2. Построение механической характеристики АД.

3.2. Теоретические сведения

Асинхронные машины – это машины переменного тока, широко применяемые в качестве двигателей. Преимущества АД: простота конструкции, высокая надежность, простейшие требования к уходу.

АД состоит из статора и ротора. Статор состоит из корпуса, в котором помещен сердечник в виде цилиндра, набранного из листов электротехнической стали. В его пазах на внутренней поверхности укладываются три катушки (фазы) обмотки статора, каждая из которых занимает $1/3$ пазов статора. Концы фаз выводятся в статорную коробку. Фазы обмотки включаются в сеть либо звездой, либо треугольником [5].

Сердечник ротора набран из листов электротехнической стали, имеет пазы у наружной поверхности. Короткозамкнутый ротор создают путем заливки пазов алюминием (медью) так, чтобы в пазах оказались алюминиевые стержни, которые на торцах соединены алюминиевыми кольцами. Такую конструкцию обмотки ротора называют обмоткой типа «беличья клетка».

В собранном двигателе ротор находится внутри статора и вращается в подшипниковых щитах.

Один и тот же АД можно использовать при двух различных линейных напряжениях, отношение которых равно $\sqrt{3}$, например 127/220, 220/380, 380/660 В.

Это достигается различным соединением фаз.

Если маркировка зажимов фаз отсутствует, то она производится при помощи вольтметра, который включается между одним из проводов сети переменного тока и каким-либо выходным зажимом АД. Другой конец

сети поочередно присоединяется к остальным зажимам до установления отклонения стрелки вольтметра (рисунок 3.1). Таким образом, находятся три пары зажимов, относящихся к отдельным фазам статора.

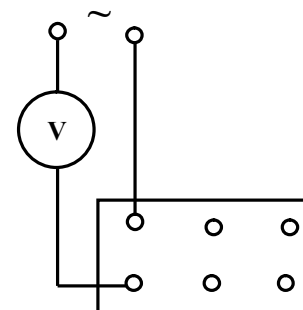


Рисунок 3.1 – Схема для маркировки фаз АД с помощью вольтметра

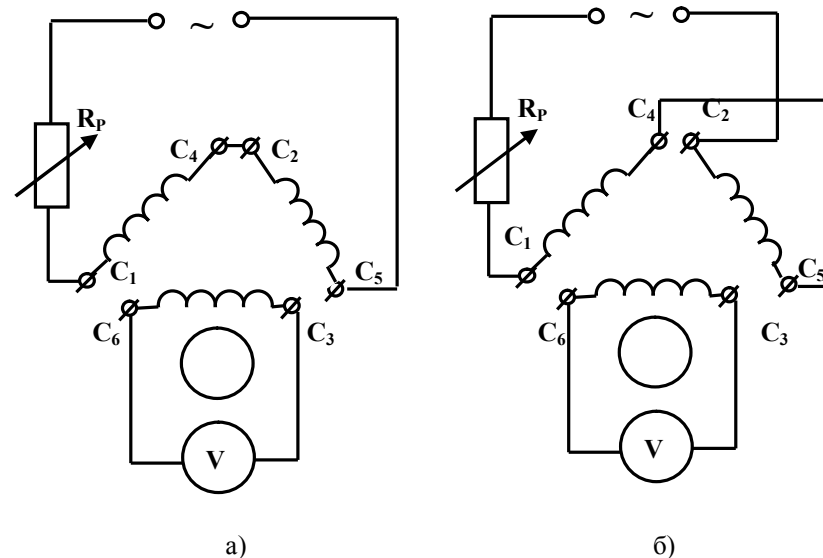


Рисунок 3.2 – Маркировка начала и конца фаз

Маркировка начала и конца соответствующей фазы производится по схемам на рисунке 3.2, в которой используется регулирующий реостат

