

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ



А.-З. Р. Джендубаев

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Лабораторный практикум для студентов III курса, обучающихся по
направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и
электротехника», профиль «Электроснабжение»

Черкесск
2025

УДК 621.313
ББК 31.26
Д 40

Рассмотрено на заседании кафедры «Электроснабжение».

Протокол № 1 от 10. 09. 2024 г.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом СКГА.

Протокол № 27 от 07. 11. 2024 г.

Рецензенты:

Гурин А.В. – к.т.н., доцент кафедры электроснабжения

Эркенов Н.Х. – к. ф.-м.н, доцент кафедры электроснабжения

Д 40 **Джендубаев А.-З.Р.** Электрические машины: лабораторный практикум для студентов III курса, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» / А.-З. Р. Джендубаев – Черкесск: БИЦ СКГА, 2025. – 84 с.

В лабораторном практикуме приведены описания лабораторных работ по следующим разделам: трансформаторы, асинхронные машины, синхронные машины, машины постоянного тока. В каждой лабораторной работе представлены электрические схемы, рисунки, таблицы измерений и вычислений. Приведены формулы для подсчетов параметров электрических машин и построения характеристик. Также имеются контрольные вопросы к каждой из лабораторных работ.

**УДК 621.313
ББК 31.26**

© Джендубаев А.-З. Р., 2025
© ФГБОУ ВО СКГА, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Работа № 1. Исследование однофазного трансформатора	5
Работа № 2. Исследование однофазного автотрансформатора	15
Работа № 3. Исследование трехфазного трансформатора	20
Работа № 4. Исследование параллельной работы трехфазных трансформаторов	25
Работа № 5. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	29
Работа № 6. Исследование асинхронного конденсаторного двигателя с трехфазной обмоткой статора	44
Работа № 7. Исследование трехфазного синхронного генератора	48
Работа № 8. Исследование параллельной работы синхронного генератора с сетью	56
Работа № 9. Исследование генератора постоянного тока параллельного возбуждения	64
Работа № 10. Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения	75
Литература	81

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном процессе высших учебных заведений наряду с теоретическим обучением значительное место отводится выполнению лабораторных работ, что способствует повышению уровня подготовки будущих специалистов и приобретению ими профессиональных компетенций.

В процессе выполнения лабораторных работ студенты знакомятся не только с исследуемыми электромеханическими устройствами, но и приобретают определенные навыки использования измерительных приборов и иного электрооборудования. У них накапливается опыт проведения экспериментальных исследований и обработки полученных результатов.

В лабораторном практикуме приведены описания лабораторных работ по следующим разделам: трансформаторы, асинхронные машины, синхронные машины, машины постоянного тока.

Показано, что при активно-емкостной нагрузке КПД трансформатора больше, чем при активно-индуктивной нагрузке [1]. Предложен новый подход, при котором рассматриваются диапазоны скольжений пяти режимов работы асинхронной машины, включая «псевдорекуперативный» («псевдогенераторный») режим и режим холостого хода [2, 3], а не трех, как это принято в классической литературе [4, 5, 6, 7].

В ходе обработки и визуализации данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, студентам предлагается использовать современные программные продукты, такие как MATLAB, Simulink, SimPowerSystems и их бесплатные аналоги Octave и Scilab [8, 9, 10]

Лабораторный практикум разработан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника» (квалификация «бакалавр»).

Работа № 1. Исследование однофазного трансформатора

Цель работы

Целью лабораторной работы является: закрепление знаний по основам теории трансформаторов; ознакомление с их конструкцией; определение параметров схемы замещения; расчет характеристик трансформатора.

Определение омических и активных сопротивлений обмоток

Сопротивления обмоток определяют с помощью омметра, моста или методом амперметра и вольтметра. В последнем случае сила тока не должна превышать 20 % номинального значения. Далее сопротивления обмоток приводят к рабочей температуре t по формуле [4, 6]:

$$r = r_{oc} [1 + \alpha(t - t_{oc})],$$

где α – температурный коэффициент (для меди $\alpha = 0,004$); r, r_{oc} – значения сопротивлений соответственно при рабочей температуре трансформатора t и температуре окружающей среды t_{oc} .

Опыт холостого хода

По опыту холостого хода определяют: коэффициент трансформации напряжения; потери холостого хода; параметры намагничивающего контура схемы замещения. Этот опыт проводят при разомкнутой вторичной обмотке трансформатора и неизменной частоте сети $f_1 = f_{ном} = const$.

Для проведения опыта собирают схему, представленную на рис. 1.1. Здесь AB – автоматический выключатель; $ЛАТР$ – лабораторный автотрансформатор регулируемый; Tr – трансформатор.

По данным опыта холостого хода определяют полное, активное и индуктивное сопротивление холостого хода; коэффициент мощности:

$$z_x = \frac{U_1}{I_x}; r_x = \frac{\Delta P_x}{I_x^2}; x_x = \sqrt{z_x^2 - r_x^2}; \cos \varphi_x = \frac{\Delta P_x}{S_x} = \frac{\Delta P_x}{U_1 I_x}, \quad (1.1)$$

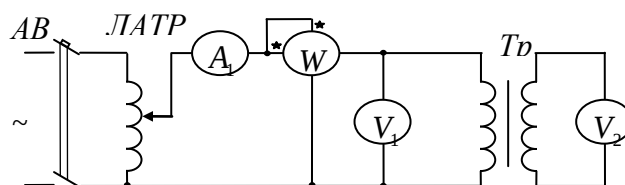


Рисунок 1.1– Схема опыта холостого хода однофазного трансформатора

где ΔP_x – потери активной мощности в режиме холостого хода (потери холостого хода, мощность, потребляемая трансформатором в режиме ХХ); I_x – ток холостого хода; U_1 – напряжение на зажимах первичной обмотки.

С достаточной точностью коэффициент трансформации напряжения определяют по показаниям вольтметров V_1 и V_2 :

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{2x}}, \quad (1.2)$$

где w_1 , E_1 , w_2 , E_2 – число витков и ЭДС соответственно первичной и вторичной обмоток трансформатора; U_{2x} – напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода.

Использование в (1.2) напряжений U_1 и U_{2x} оправдано, поскольку в режиме холостого хода $U_{2x} = E_2$, а $U_1 \approx E_1$, т.к. падение напряжения в первичной обмотке, вызванное током холостого хода, пренебрежимо мало по сравнению с номинальным напряжением $\dot{I}_x(r_1 + jx_{\sigma 1}) \ll \dot{U}_{1ном}$. Здесь r_1 и $x_{\sigma 1}$ соответственно активное и реактивное (индуктивное) сопротивления первичной обмотки. Последнее обусловлено магнитным потоком рассеяния.

С другой стороны $I_x \ll I_{1ном}$, поэтому и электрические потери в первичной обмотке пренебрежимо малы $\Delta P_{эл} = I_x^2 r_1 \approx 0$ по сравнению с потерями холостого хода ΔP_x . В связи с этим можно считать, что мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода ΔP_x , в основном идет на покрытие магнитных потерь $\Delta P_{магн}$:

$$\Delta P_x \approx \Delta P_{магн} = \Delta P_{гист} + \Delta P_{вихр} + \Delta P_{доб}. \quad (1.3)$$

Здесь $\Delta P_{гист}$, $\Delta P_{вихр}$ – соответственно потери на гистерезис и вихревые токи в магнитной цепи (в магнитопроводе) трансформатора; $\Delta P_{доб}$ – добавочные потери, возникающие в местах стыков, в баке трансформатора, шпильках, и т.д.

С реальными физическими явлениями в трансформаторе лучше всего согласуется схема замещения, представленная на рис. 1.2.

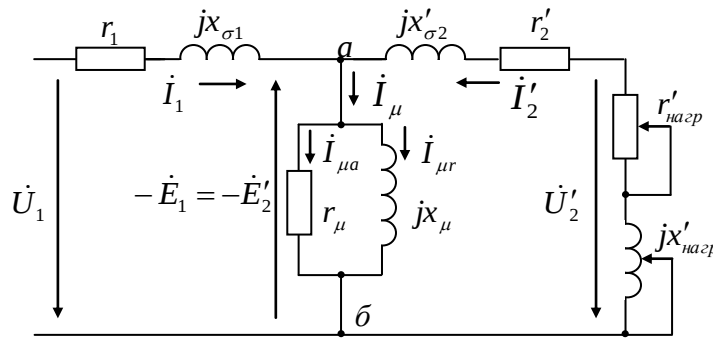


Рисунок 1.2 – Схема замещения трансформатора

В этой схеме параметры намагничивающего контура $аб$ представлены в виде двух параллельных ветвей.

На холостом ходу приведенный ток вторичной обмотки трансформатора $\dot{I}'_2 = 0$, а ток первичной обмотки равен намагничивающему току $\dot{I}_1 = \dot{I}_x = \dot{I}_\mu$. Полное комплексное сопротивление схемы замещения в этом случае равно:

$$Z_x = Z_1 + Z_\mu = r_1 + jx_{\sigma 1} + \frac{r_\mu(jx_\mu)}{r_\mu + jx_\mu} = r_1 + jx_{\sigma 1} + \frac{r_\mu x_\mu^2}{r_\mu^2 + x_\mu^2} + j \frac{r_\mu^2 x_\mu}{r_\mu^2 + x_\mu^2}, \quad (1.4)$$

где $Z_1 = r_1 + jx_{\sigma 1}$ – комплексное сопротивление первичной обмотки; r_1 , $x_{\sigma 1}$ – соответственно активное сопротивление и реактивное сопротивление рассеяния первичной обмотки; Z_μ – комплексное сопротивление намагничивающего контура; r_μ – активное (фиктивное) сопротивление намагничивающего контура, которое вводится в электрическую схему замещения для того, чтобы учесть магнитные потери $\Delta P_{\text{магн}} = I_{\mu a}^2 r_\mu$ (потери в магнитной цепи трансформатора); $x_\mu = x_{12} = \omega M = 2\pi f_1 M$ – главное индуктивное сопротивление трансформатора (или сопротивление взаимной индукции, поскольку оно определяется общим потоком трансформатора Φ). Здесь $I_{\mu a}$ – активная составляющая намагничивающего тока; $\omega = 2\pi f_1$ – угловая частота напряжения; M – взаимная индуктивность обмоток.

С учетом того, что $\Delta P_{\text{магн}} = I_{\mu a}^2 r_\mu = E_1 I_{\mu a}$, $U_1 \approx E_1$, а $P_x \approx \Delta P_{\text{магн}}$, можем определить токи и параметры намагничивающего контура схемы замещения:

$$I_{\mu a} = \frac{\Delta P_{\text{магн}}}{E_1} \approx \frac{\Delta P_x}{U_1}; r_\mu = \frac{\Delta P_{\text{магн}}}{I_{\mu a}^2} \approx \frac{\Delta P_x}{I_{\mu a}^2} \text{ или } r_\mu = \frac{E_1^2}{\Delta P_{\text{магн}}} = \frac{E_1}{I_{\mu a}} \approx \frac{U_1^2}{\Delta P_x} = \frac{U_1}{I_{\mu a}}; \quad (1.5)$$

$$x_\mu = \frac{E_1}{I_{\mu r}} \approx \frac{U_1}{I_{\mu r}}. \quad (1.6)$$

Здесь $I_{\mu r}$ – реактивная составляющая намагничивающего тока, которую можно выразить через ток холостого хода:

$$I_{\mu r} = \sqrt{I_\mu^2 - I_{\mu a}^2} \approx \sqrt{I_x^2 - I_{xa}^2}. \quad (1.7)$$

где $I_{xa} = \frac{\Delta P_x}{U_1}$ – активная составляющая тока холостого хода.

В некоторых случаях более удобной является схема замещения, у которой намагничивающий контур представлен в виде некоторых эквивалентных сопротивлений r_m и jx_m , соединенных последовательно (рис. 1.3). Тогда уравнение (1.4) примет более простой вид:

$$Z_x = Z_1 + Z_\mu = r_1 + jx_{\sigma 1} + r_m + jx_m, \quad (1.8)$$

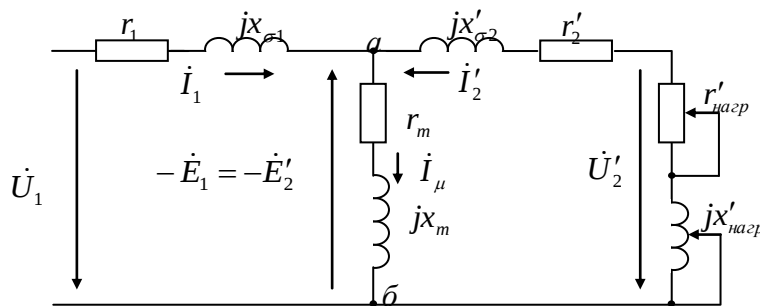


Рисунок 1.3– Схема замещения трансформатора с одной ветвью намагничивающего контура

где $r_m = \frac{r_\mu x_\mu^2}{r_\mu^2 + x_\mu^2}$; $x_m = \frac{r_\mu^2 x_\mu}{r_\mu^2 + x_\mu^2}$.

Следует подчеркнуть, что сопротивление x_m не является главным индуктивным сопротивлением трансформатора $x_m \neq x_\mu$. Поэтому такое преобразование несколько искажает физическую адекватность полученной схемы замещения (рис. 1.3), но упрощает расчет параметров намагничивающего контура ab , т.к. при $Z_1 \approx 0$ имеем:

$$z_\mu \approx z_x; r_m \approx r_x; x_m \approx x_x. \quad (1.9)$$

Естественно, что от последовательного соединения сопротивлений (рис. 1.3) можно перейти к параллельному соединению и определить параметры намагничивающего контура схемы замещения, представленной на рис. 1.2:

$$r_\mu = \frac{r_m^2 + x_m^2}{r_m}; x_\mu = \frac{r_m^2 + x_m^2}{x_m}. \quad (1.10)$$

Строго говоря, при $\dot{U}_1 = const$ изменение тока нагрузки $\dot{I}'_2$ приводит к изменению тока первичной обмотки $\dot{I}_1 = \dot{I}_\mu - \dot{I}'_2$ (рис. 1.2). При этом изменяется ЭДС трансформатора $\dot{E}_1 = -jx_\mu \dot{I}_{\mu r} = -\dot{U}_1 + (r_1 + jx_{\sigma 1})\dot{I}_1$. Соответственно изменяются магнитный поток $E_1 \equiv \Phi$, магнитные потери $\Delta P_{\text{магн}}$ и намагничивающий ток $\Phi \equiv I_\mu = var$.

Таким образом, в намагничивающем контуре ab схем замещения трансформатора (рис. 1.2, рис. 1.3) необходимо указывать намагничивающий ток $\dot{I}_\mu$, который является величиной переменной, а не ток холостого хода $\dot{I}_x = const$. Равенство $\dot{I}_\mu = \dot{I}_x$, которое имеет место при $\dot{I}'_2 = 0$, является частным случаем.

При проведении опыта холостого хода напряжение плавно увеличивают до уровня $U_1 = (1,1 \div 1,2)U_{1ном}$. Данные измерений и вычислений заносят в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

№	Из м е р е н и я				В ы ч и с л е н и я								
	$U_1,$ B	$U_{2x},$ B	$I_x,$ A	$\Delta P_x,$ Bm	$S_x,$ BA	$Q_x,$ BAp	$\cos \varphi_x$	k	$z_x,$ Om	$r_x,$ Om	$x_x,$ Om	$r_\mu,$ Om	$x_\mu,$ Om
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

На основе данных таблицы 1.1 строят характеристики холостого хода: $I_x = f(U_1)$; $\Delta P_x = f(U_1)$; $\cos \varphi_x = f(U_1)$. Выписывают параметры намагничивающего контура схем замещения r_μ, x_μ, r_m, x_m , определенные при $U_1 = U_{1ном}$. Рассчитывают мощности $S_x = U_1 I_x$ и $Q_x = \sqrt{S_x^2 - \Delta P_x^2}$. Определяют потери $\Delta P_{x.ном}$, которые имеют место в трансформаторе при $U_1 = U_{1ном}$.

Опыт короткого замыкания

При опыте короткого замыкания к трансформатору подводят пониженное напряжение, составляющее 4–10% от номинального, и поэтому намагничивающим током, как весьма незначительным, обычно пренебрегают $I_\mu \approx 0$. Соответственно пренебрегают и магнитными потерями $\Delta P_{\text{магн}} \approx 0$. Таким образом, практически вся активная мощность ΔP_κ , подводимая к трансформатору при опыте короткого замыкания, идет на покрытие электрических потерь в обмотках:

$$\Delta P_\kappa = \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{эл}} \approx \Delta P_{\text{эл}} = \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}}, \quad (1.11)$$

где $\Delta P_{\text{эл1}} = I_1^2 r_1$ – электрические потери в первичной обмотке; $\Delta P_{\text{эл2}} = I_2^2 r_2 = (I'_2)^2 r'_2$ – электрические потери во вторичной обмотке трансформатора.

С учетом того, что при принятом допущении $I_\mu \approx 0$, ток первичной обмотки и приведенный ток вторичной обмотки равны $I_1 \approx I'_2$, поэтому электрические потери в обмотках можно выразить следующим образом:

$$\Delta P_{\text{эл}} = I_1^2 r_1 + (I'_2)^2 r'_2 \approx I_1^2 (r_1 + r'_2) = I_1^2 r_\kappa. \quad (1.12)$$

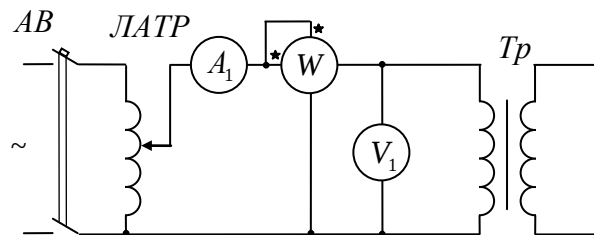


Рисунок 1.4– Схема опыта короткого замыкания
однофазного трансформатора

Очень важной характеристикой трансформатора является напряжение короткого замыкания.

Напряжением короткого замыкания называется напряжение, при котором в обмотках протекают номинальные токи, когда одна из обмоток замкнута накоротко. Активную мощность, потребляемую трансформатором в этом режиме, называют номинальными потерями короткого замыкания $\Delta P_{\text{к.ном}}$.

Напряжение короткого замыкания обычно выражают в относительных единицах или в процентах относительно номинального напряжения:

$$u_{\text{к\%}} = \frac{U_{\text{к.ном}}}{U_{\text{ном}}} 100\%. \quad (1.13)$$

Напряжение короткого замыкания в процентах численно равно сопротивлению короткого замыкания, выраженному в процентах от номинального сопротивления:

$$u_{\kappa\%} = \frac{I_{1\text{ном}} Z_{\kappa}}{U_{1\text{ном}}} 100\% = \frac{Z_{\kappa}}{(U_{1\text{ном}}/I_{1\text{ном}})} 100\% = \frac{Z_{\kappa}}{Z_{\text{ном}}} 100\% = z_{\kappa\%}. \quad (1.14)$$

Это равенство соблюдается и при использовании относительных единиц, т.е. $u_{\kappa*} = z_{\kappa*}$, где $u_{\kappa*} = u_{\kappa\%}/100\%$; $z_{\kappa*} = z_{\kappa\%}/100\%$.

Сопротивление короткого замыкания имеет две составляющие $Z_{\kappa} = Z_1 + Z_2' = (r_1 + jx_{\sigma 1}) + (r_2' + jx_{\sigma 2}') = (r_1 + r_2') + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}') = r_{\kappa} + jx_{\kappa}$. Поэтому напряжение короткого замыкания можно выразить через активную и реактивную составляющие:

$$u_{\kappa\%} = \sqrt{u_{\kappa\text{а}\%}^2 + u_{\kappa\text{р}\%}^2}. \quad (1.15)$$

При этом:

$$u_{\kappa\text{а}\%} = u_{\kappa\%} \cos \varphi_{\kappa} = \frac{I_{1\text{ном}} r_{\kappa}}{U_{1\text{ном}}} 100\% = \frac{I_{1\text{ном}} r_{\kappa}}{U_{1\text{ном}}} \left(\frac{I_{1\text{ном}}}{I_{1\text{ном}}} \right) 100\% = \frac{\Delta P_{\kappa.\text{ном}}}{S_{\text{ном}}} 100\%; \quad (1.16)$$

$$u_{\kappa\text{р}\%} = u_{\kappa\%} \sin \varphi_{\kappa} = \frac{I_{1\text{ном}} x_{\kappa}}{U_{1\text{ном}}} 100\% = \frac{Q_{\kappa.\text{ном}}}{S_{\text{ном}}} 100\% = \sqrt{u_{\kappa\%}^2 - u_{\kappa\text{а}\%}^2}, \quad (1.17)$$

где $\Delta P_{\kappa.\text{ном}} = I_{1\text{ном}}^2 r_{\kappa}$ – номинальные потери короткого замыкания; $S_{\text{ном}} = U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора; $Q_{\kappa.\text{ном}} = I_{1\text{ном}}^2 x_{\kappa}$ – номинальная реактивная мощность, потребляемая трансформатором при опыте КЗ.

По опыту короткого замыкания определяют: параметры обмоток схемы замещения; электрические потери в обмотках; напряжение короткого замыкания и его составляющие.

Схема опыта короткого замыкания представлена на рис. 1.4. Замыкают накоротко вторичную обмотку трансформатора и плавно увеличивают напряжение, подводимое к первичной обмотке, от нуля до величины, при которой ток обмотки статора достигает значения $(1,1-1,2)I_{1\text{ном}}$. При этом проводят пять измерений, включая опыт при номинальном токе. Полученные данные заносят в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

№	Из м е р е н и я			В ы ч и с л е н и я						
	$U_{\kappa},$ B	$I_{\kappa},$ A	$\Delta P_{\kappa},$ Bm	$r_{\kappa},$ Ω	$z_{\kappa},$ Ω	$x_{\kappa},$ Ω	$\cos \varphi_{\kappa}$	$u_{\kappa\%}$	$u_{\kappa\text{а}\%}$	$u_{\kappa\text{р}\%}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

При вычислениях используют следующие формулы:

$$z_{\kappa} = \frac{U_{\kappa}}{I_{\kappa}}; r_{\kappa} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{I_{\kappa}^2}; x_{\kappa} = \sqrt{z_{\kappa}^2 - r_{\kappa}^2}; r_1 \approx r_2' = \frac{r_{\kappa}}{2};$$

$$x_{\sigma 1} \approx x_{\sigma 2}' = \frac{x_{\kappa}}{2}; \cos \varphi_{\kappa} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{U_{\kappa} I_{\kappa}}. \quad (1.18)$$

На основе данных таблицы 1.2 строят характеристики короткого замыкания: $I_{\kappa} = f(U_{\kappa})$; $P_{\kappa} = f(U_{\kappa})$; $\cos \varphi_{\kappa} = f(U_{\kappa})$. Выписывают параметры обмоток трансформатора.

Внешние характеристики

Зависимость $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$ называется внешней характеристикой.

Электрическая схема, позволяющая построить внешние характеристики трансформатора, представлена на рис. 1.5. К первичной обмотке подводят номинальное напряжение $U_1 = U_{1\text{ном}}$ и плавно изменяют сопротивление нагрузки $Z_{\text{нагр}}$.

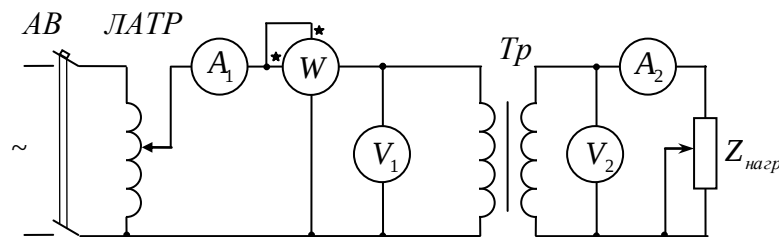


Рисунок 1.5– Схема опыта нагрузки однофазного трансформатора

Данные измерений и вычислений заносят в таблицу 1.3.
Таблица 1.3

№	Из м е р е н и я						В ы ч и с л е н и я					
	$U_1,$ B	$I_1,$ A	$P_1,$ Bm	$U_2,$ B	$I_2,$ A	$\cos \varphi_2$	$\cos \varphi_1$	$P_2,$ Bm	$\Delta U,$ $\%$	η	$S_1,$ BA	$Q_1,$ Var
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

На основе полученных данных строят внешние характеристики в относительных единицах, т.е. $U_{2*} = \frac{U_2}{U_{2\text{х.ном}}} = f(\beta)$, и зависимость $\eta = f(\beta)$, где $U_{2\text{х.ном}}$ – напряжение холостого хода на вторичной обмотке при номинальном напряжении на первичной обмотке; $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$ – коэффициент нагрузки трансформатора. При допущении $U_2 \approx U_{2\text{ном}}$ можно считать, что $\beta \approx S_2/S_{2\text{ном}}$, а при допущении, что $I_{\mu} \approx 0$, – $\beta \approx I_1/I_{1\text{ном}}$.

Изменение вторичного напряжения

Изменением вторичного напряжения двухобмоточного трансформатора при постоянном значении первичного напряжения $U_1 = U_{1.ном}$ и номинальной частоте $f_1 = f_{1.ном}$ называется алгебраическая разность значений вторичного напряжения при холостом ходе U_{2x} и под нагрузкой U_2 , выраженная в процентах от вторичного напряжения при холостом ходе U_{2x} , т.е.

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{2x} - U_2}{U_{2x}} 100\% = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} 100\%, \quad (1.19)$$

где $U'_2 = kU_2$ – приведенное вторичное напряжение, k – коэффициент трансформации.

Коэффициент полезного действия трансформатора

Силовые трансформаторы, т.е. трансформаторы, которые используются в энергосистемах, имеют очень высокий КПД. В мощных силовых трансформаторах $\eta = P_2/P_1 = 1 - \Delta P/P_1 > 99\%$. Непосредственное измерение мощностей на входе P_1 и выходе P_2 трансформатора не дает удовлетворительных результатов при расчете КПД, т.к. разность $\Delta P = P_1 - P_2$ становится соизмеримой с погрешностью измерительных приборов.

Более точный результат дает косвенный метод, основанный на данных, полученных при проведении опытов холостого хода и короткого замыкания.

Косвенный метод основан на следующих допущениях:

- магнитные потери не зависят от нагрузки, т.е. $\Delta P_{\text{магн}} = \text{const}$;
- потери холостого хода равны магнитным потерям (пренебрегаем электрическими потерями);
- потери короткого замыкания равны электрическим потерям в обмотках (пренебрегаем магнитными потерями),
- пренебрегаем диэлектрическими потерями в изоляции.

С учетом принятых допущений баланс активных мощностей трансформатора при любых режимах его работы можно представить в следующем виде:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{эл}}. \quad (1.20)$$

Тогда КПД

$$\eta_{\%} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{эл}}} 100\% = \left(1 - \frac{\Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{эл}}}{P_2 + \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{эл}}} \right) 100\%. \quad (1.21)$$

С учетом того, что $\Delta P_{\text{эл}} \approx \Delta P_{\text{к}} = \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}$, $\Delta P_{\text{магн}} \approx \Delta P_{\text{х.ном}}$, $P_2 = \beta S_{2ном} \cos \varphi_2$:

$$\eta_{\%} = \left(1 - \frac{\Delta P_{\text{х.ном}} + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}{\beta S_{2ном} \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{х.ном}} + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}} \right) 100\%. \quad (1.22)$$

Пользуясь последним соотношением и задаваясь различными значениями коэффициента нагрузки $\beta = 0...1,2$, рассчитывают и строят

зависимость $\eta = f(\beta)$ для $\cos\varphi_2 = 1$ ($\varphi_2 = 0$ – активная нагрузка) и $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$ – активно-индуктивная нагрузка). В тех же координатах строят кривую, полученную по экспериментальным данным, т.е. $\eta = P_2/P_1$.

Определяют коэффициент нагрузки, при котором трансформатор развивает максимальный КПД:

$$\beta_{\max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{x.\text{ном}}}{\Delta P_{k.\text{ном}}}} \quad (1.23)$$

Уравнение (1.23) можно представить в виде, которое справедливо не только для трансформатора, но и для любого другого преобразователя:

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{перем}}, \quad (1.24)$$

где $\Delta P_{\text{пост}} = \text{const}$ – постоянные потери, которые не зависят от нагрузки;

$\Delta P_{\text{перем}} = \text{var}$ – переменные потери, которые зависят от квадрата нагрузки.

Применительно к трансформатору имеем: $\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{x.\text{ном}}$; $\Delta P_{\text{перем}} = \beta^2 \Delta P_{k.\text{ном}}$.

Условие (1.24) выполняется при $\beta = \beta_{\max}$.

В справочной и учебной литературе вместо обозначений $\Delta P_{x.\text{ном}}$ и $\Delta P_{k.\text{ном}}$ часто встречаются обозначения: P_0 ; P_x ; P_{xx} ; ΔP_x ; ΔP_{xx} ; P_k ; P_{kz} ; ΔP_k ; ΔP_{kz} , а магнитные потери $\Delta P_{\text{магн}}$ называют потерями в стали $\Delta P_{\text{ст}}$.

Следует подчеркнуть, что в уравнении (1.22) не учитываются изменения вторичного напряжения и магнитных потерь под действием нагрузки. Такие допущения не оказывают заметного влияния на точность расчета КПД силовых трансформаторов, однако, приводят к ошибочным теоретическим выводам. В частности вывод о том, что КПД трансформатора не зависит от характера реактивной мощности нагрузки, т.е. кривые КПД при $\cos\varphi_{2RL} = \cos\varphi_{2RC}$ совпадают, не соответствует действительности. Подтверждением этому могут служить кривые, представленные на рис. 1.6. Более подробную информацию по этому вопросу можно найти в статье [1].

Отчет должен содержать:

1. Номинальные данные трансформатора и данные, полученные при измерении сопротивлений обмоток;
2. Схемы проведения опытов;
3. Таблицы замеров и подсчетов;
4. Используемые формулы;
5. Характеристики: холостого хода; короткого замыкания и внешние,
6. Кривые $\eta = f(\beta)$;
7. Схемы замещения трансформатора.

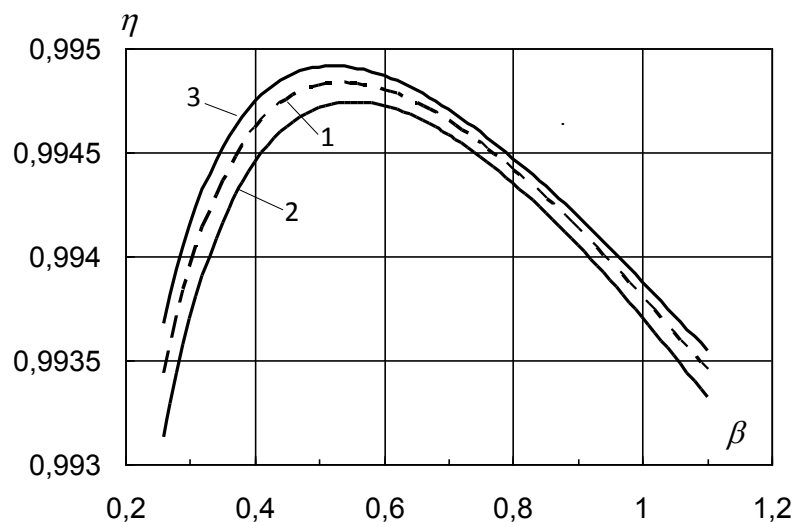


Рисунок 1.6– КПД трансформатора:
 1 – по формуле (1.22) при $\cos \varphi_{2RL} = \cos \varphi_{2RC} = 0,8$;
 2 – при $\cos \varphi_{2RL} = 0,8$; 3 – при $\cos \varphi_{2RC} = 0,8$

Контрольные вопросы

1. Приведите все формы аналитического выражения закона электромагнитной индукции.
2. Почему магнитные сердечники трансформаторов и электрических машин выполняются шихтованными?
3. Чем электротехнические стали отличаются от конструкционных?
4. Принцип работы трансформатора.
5. Приведите основные уравнения трансформатора.
6. Какие параметры схемы замещения зависят от насыщения?
7. Какие параметры трансформатора определяются по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.
8. Дайте определение напряжения короткого замыкания трансформатора, измеренного в процентах. От чего зависит и для чего используется этот параметр?
9. Почему при $U_1 = \text{const}$ изменение нагрузки приводит к изменению вторичного напряжения трансформатора U_2 ?
10. Что такое внешняя характеристика трансформатора? Какой она имеет вид при различном характере нагрузки?
11. Что представляет собой КПД трансформатора и от чего он зависит?
12. Какие потери мощности возникают в трансформаторе и почему?

Работа № 2. Исследование однофазного автотрансформатора

Цель работы

Целью работы является: определение параметров схемы замещения; расчет характеристик автотрансформатора; анализ его достоинств и недостатков.

Следует отметить, что автотрансформатор лабораторной работы № 2 изготовлен на основе серийного трансформатора мощностью 100 ВА, который исследовался в лабораторной работе № 1. У этого трансформатора удалена вторичная обмотка, а от первичной обмотки сделан вывод, который и является началом вторичной обмотки, совмещенной с первичной. Электрическая схема опыта и обозначения обмоток автотрансформатора представлены на рис. 2.1. Здесь $A-X$ – начало и конец первичной обмотки; $a-x$ – начало и конец объединенной части обмотки автотрансформатора. В данном случае эти устройства имеют практически одинаковые магнитопроводы, а, следовательно, и потери в них.

Методика исследования автотрансформатора аналогична методике, которая была описана в лабораторной работе № 1 «Исследование однофазного автотрансформатора». В силу этого, далее будут приводиться только основные выражения, позволяющие осуществить подсчеты, а также будет акцентироваться внимание на некоторые особенности определения номинального тока и напряжения короткого замыкания этого эксклюзивного автотрансформатора, исследуемого в лабораторной работе № 2.

Опыт холостого хода

По опыту холостого хода определяют: коэффициент трансформации напряжения; потери холостого хода; параметры намагничивающего контура.

По данным опыта холостого хода определяют: полное, активное и индуктивное сопротивления холостого хода автотрансформатора

$$z_{x.at} = \frac{U_1}{I_{x.at}}, r_{x.at} = \frac{\Delta P_{x.at}}{I_{x.at}^2}, x_{x.at} = \sqrt{z_{x.at}^2 - r_{x.at}^2}; \quad (2.1)$$

коэффициент мощности и коэффициент трансформации напряжения:

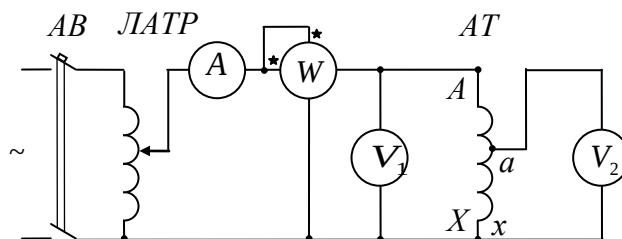


Рисунок 2.1– Схема опыта холостого хода однофазного автотрансформатора

$$\cos \varphi_{x.at} = \frac{\Delta P_{x.at}}{S_{x.at}} = \frac{\Delta P_{x.at}}{U_1 I_{x.at}}, k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_{1.at}}{E_{2.at}} \approx \frac{U_1}{U_{2x}}. \quad (2.2)$$

Рассчитывают параметры: намагничивающего контура схемы замещения, представленной на рис. 1.3,

$$z_{\mu.ат} \approx z_{x.ат}; r_{m.ат} \approx r_{x.ат}; x_{m.ат} \approx x_{x.ат}; \quad (2.3)$$

схемы замещения с двумя параллельными ветвями (рис. 1.2)

$$r_{\mu.ат} = \frac{r_{m.ат}^2 + x_{m.ат}^2}{r_{m.ат}}; x_{\mu.ат} = \frac{r_{m.ат}^2 + x_{m.ат}^2}{x_{m.ат}}. \quad (2.4)$$

Данные измерений и вычислений заносят в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

№	Из м е р е н и я				В ы ч и с л е н и я								
	$U_1,$ B	$U_{2x},$ B	$I_{x.ат},$ A	$\Delta P_{x.ат},$ Bm	$S_{x.ат},$ BA	$Q_{x.ат},$ BAp	$\cos \varphi_{x.ат}$	k	$z_{x.ат},$ $Ом$	$r_{x.ат},$ $Ом$	$x_{x.ат},$ $Ом$	$r_{\mu.ат},$ $Ом$	$x_{\mu.ат},$ $Ом$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

На основе данных таблицы 2.1 строят характеристики холостого хода: $I_{x.ат} = f(U_1)$; $\Delta P_{x.ат} = f(U_1)$; $\cos \varphi_{x.ат} = f(U_1)$. Выписывают параметры намагничивающего контура $r_{\mu.ат}$, $x_{\mu.ат}$ и $r_{m.ат}$, $x_{m.ат}$, определенные при $U_1 = U_{1ном}$. Рассчитывают мощности $S_{x.ат} = U_1 I_{x.ат}$ и $Q_{x.ат} = \sqrt{S_{x.ат}^2 - \Delta P_{x.ат}^2}$.

Опыт короткого замыкания

В данном случае магнитные потери трансформатора и автотрансформатора практически равны.

Поскольку в автотрансформаторе в качестве вторичной обмотки выступает часть первичной обмотки, то электрические потери в нем будут меньше, чем у трансформатора. Таким образом, он будет недоиспользоваться в тепловом отношении.

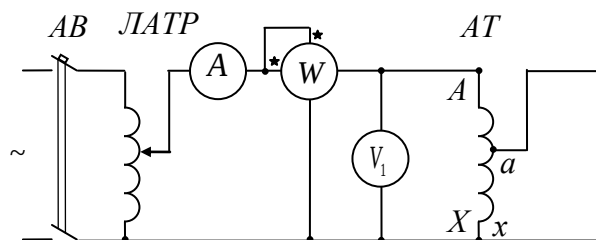


Рисунок 2.1. Схема опыта КЗ однофазного автотрансформатора

В связи с этим для выравнивания рабочих температур трансформатора и автотрансформатора сделаем допущение, что в номинальном режиме их электрические потери (потери короткого замыкания) равны, т.е. $\Delta P_{к.ном} = \Delta P_{к.ном.ат}$.

С учетом этого для определения номинального тока $I_{к.ном.ат} = I_{1ном.ат}$ и напряжения короткого замыкания автотрансформатора $U_{к.ном.ат}$ замкнем

накоротко вторичную обмотку автотрансформатора (рис. 2.2). От нуля плавно увеличим с помощью *ЛАТР* напряжение вплоть до выполнения условия $\Delta P_{к.ном} = \Delta P_{к.ном.ат}$ и занесем полученные значения $U_{к.ном.ат}$ и $I_{к.ном.ат}$ в таблицу 2.2.

Далее проведем три измерения при $I_{к.ат} < I_{к.ном.ат}$ и одно при $I_{к.ат} > I_{к.ном.ат}$. Полученные данные также занесем в таблицу 2.2.

По опыту короткого замыкания определим: параметры обмоток схемы замещения; электрические потери в обмотках; напряжение короткого замыкания и его составляющие.

Таблица 2.2

№	Измерения			Вычисления						
	$U_{к.ат},$ <i>В</i>	$I_{к.ат},$ <i>А</i>	$\Delta P_{к.ат},$ <i>Вт</i>	$r_{к.ат},$ <i>Ом</i>	$z_{к.ат},$ <i>Ом</i>	$x_{к.ат},$ <i>Ом</i>	$\cos \varphi_{к.ат}$	$u_{к.ат}\%$	$u_{ка.ат}\%$	$u_{кр.ат}\%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

При вычислениях используют следующие формулы:

$$z_{к.ат} = \frac{U_{к.ат}}{I_{к.ат}}; r_{к.ат} = \frac{\Delta P_{к.ат}}{I_{к.ат}^2}; x_{к.ат} = \sqrt{z_{к.ат}^2 - r_{к.ат}^2}; \cos \varphi_{к.ат} = \frac{\Delta P_{к.ат}}{U_{к.ат} I_{к.ат}}. \quad (2.5)$$

Рассчитывают напряжение короткого замыкания и его составляющие:

$$u_{к.ат}\% = \frac{U_{к.ном.ат}}{U_{1ном}} 100\%; \quad (2.6)$$

$$u_{ка.ат}\% = u_{к.ат}\% \cos \varphi_{к.ат}; \quad (2.7)$$

$$u_{кр.ат}\% = \sqrt{u_{к.ат}\%^2 - u_{ка.ат}\%^2}. \quad (2.8)$$

На основе данных таблицы 2.2 строят характеристики короткого замыкания: $I_{к.ат} = f(U_{к.ат})$; $\Delta P_{к.ат} = f(U_{к.ат})$; $\cos \varphi_{к.ат} = f(U_{к.ат})$.

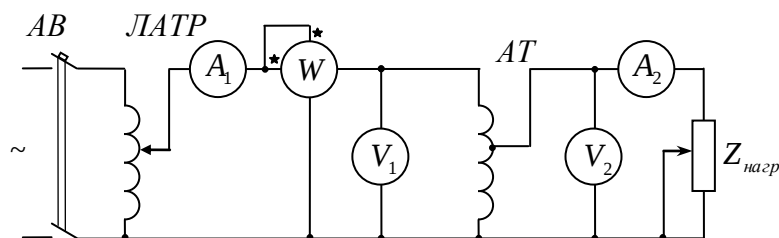


Рисунок 2.3. Схема опыта нагрузки однофазного автотрансформатора

Внешние характеристики

Электрическая схема, позволяющая построить внешние характеристики автотрансформатора, представлена на рис. 2.3. К первичной

обмотке подводят номинальное напряжение $U_1 = U_{1ном}$ и плавно изменяют сопротивление нагрузки $Z_{нагр}$.

Данные измерений и вычислений заносят в таблицу 2.3.

Таблица 2.3

№	Из м е р е н и я						В ы ч и с л е н и я					
	$U_1,$ B	$I_{1.ат},$ A	$P_{1.ат},$ Bm	$U_2,$ B	$I_{2.ат},$ A	$\cos \varphi_2$	$\cos \varphi_1$	$P_{2.ат},$ Bm	$\Delta U_{ат},$ $\%$	$\eta_{ат}$	$S_{1.ат},$ BA	$Q_{1.ат},$ BAp
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

На основе полученных данных строят внешние характеристики в относительных единицах, т.е. $U_{2*} = \frac{U_2}{U_{2х.ном}} = f(\beta)$, и зависимость $\eta_{ат} = f(\beta)$, где $\beta = I_{2.ат} / I_{2ном.ат}$ – коэффициент нагрузки трансформатора.

Изменение напряжения

Изменение напряжения автотрансформатора определяем точно так же, как и трансформатора:

$$\Delta U_{ат\%} = \frac{U_{2х} - U_2}{U_{2х}} 100\% = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} 100\%, \quad (2.9)$$

где $U'_2 = kU_2$ – приведенное вторичное напряжение, k – коэффициент трансформации.

Коэффициент полезного действия автотрансформатора

КПД автотрансформатора равен:

$$\eta_{ат\%} = \left(1 - \frac{\Delta P_{х.ном.ат} + \beta^2 \Delta P_{к.ном.ат}}{\beta S_{2ном.ат} \cos \varphi_2 + \Delta P_{х.ном.ат} + \beta^2 \Delta P_{к.ном.ат}} \right) 100\%. \quad (1.10)$$

Пользуясь последним соотношением и задаваясь различными значениями коэффициента нагрузки $\beta = 0...1,2$, рассчитывают и строят зависимость $\eta_{ат} = f(\beta)$ для $\cos \varphi_2 = 1$ ($\varphi_2 = 0$ – активная нагрузка) и $\cos \varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$ – активно-индуктивная нагрузка).

В тех же координатах строят кривую, полученную по экспериментальным данным, т.е. $\eta_{ат} = P_2 / P_1$.

Определяют коэффициент нагрузки $\beta_{max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{х.ном.ат}}{\Delta P_{к.ном.ат}}}$, при котором автотрансформатор имеет максимальный КПД.

Отчет должен содержать:

1. Номинальные данные трансформатора и данные, полученные при измерении сопротивлений обмоток;
2. Схемы проведения опытов;
3. Таблицы замеров и подсчетов;

4. Используемые формулы;
5. Характеристики: холостого хода; короткого замыкания; внешние.
6. Кривые $\eta = f(\beta)$;
7. Схемы замещения трансформатора.

Контрольные вопросы

1. Перечислите достоинства и недостатки автотрансформаторов.
2. Покажите взаимосвязь достоинств и недостатков автотрансформатора с коэффициентом трансформации.
3. Объясните устройство автотрансформатора с переменным коэффициентом трансформации.

Работа № 3. Исследование трехфазного трансформатора

Цель работы

Целью работы является ознакомление с конструкцией трансформатора и снятие его основных характеристик.

Определение омических и активных сопротивлений обмоток

Сопротивления обмоток определяют в соответствии с методикой, которая была описана в лабораторной работе № 1.

Опыт холостого хода

Для проведения опыта собирают схему, представленную на рис. 3.1. Вторичная обмотка трансформатора разомкнута. Частота напряжения, подводимого к первичной обмотке, $f_1 = f_{1ном} = const$.

Плавно увеличивают напряжение от $U_1 \approx 0,2U_{ном}$ до $U_1 = (1,1...1,2)U_{ном}$ и делают 5-6 измерений.

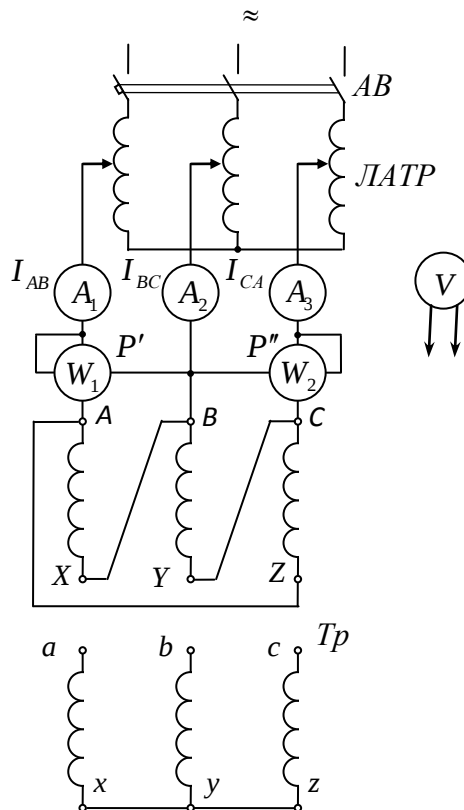


Рисунок 3.1. Схема опыта холостого хода трехфазного трансформатора. Группа соединения $\Delta/Y-11$

За расчетные фазные значения токов и напряжений принимаются их средние значения. Поскольку группа соединения обмоток $\Delta/Y-11$, то:

$$I_{x.\phi} = \frac{I_{AB} + I_{BC} + I_{CA}}{3\sqrt{3}}; \quad U_{1.\phi} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}.$$

Коэффициент мощности равен:

$$\cos \varphi_x = \frac{\Delta P_x}{3U_{1.\phi} I_{x.\phi}} = \frac{\Delta P_x}{\sqrt{3}U_{1.l} I_{x.l}},$$

где $\Delta P_x = P' \pm P''$ – активная мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода (потери); P' , P'' – соответственно показания первого (W_1) и второго (W_2) ваттметров; $U_{1.l}$, $I_{x.l}$ – средние значения линейного напряжения и тока.

В режиме холостого хода сопротивления одной фазы трансформатора со стороны его первичной обмотки равны:

$$z_x = \frac{U_{1.\phi}}{I_{x.\phi}}; \quad r_x = \frac{P_x}{3I_{x.\phi}^2}; \quad x_x = \sqrt{z_x^2 - r_x^2}. \quad (3.1)$$

Сделаем допущение о том, что активное сопротивление r_1 и индуктивное сопротивление рассеяния x_1 первичной обмотки пренебрежимо малы по сравнению с сопротивлением намагничивающего контура, т.е. $r_1 \approx x_1 \approx 0$.

Тогда, при последовательном соединении сопротивлений намагничивающего контура схемы замещения одной фазы трансформатора получим:

$$z_\mu \approx z_x; \quad r_\mu \approx r_x; \quad x_\mu \approx x_x. \quad (3.2)$$

Естественно, что, как и в случае однофазного трансформатора, от последовательного соединения сопротивлений (рис. 1.3) намагничивающего контура можно перейти к параллельному соединению (рис. 1.2). В этом случае имеем:

$$r_\mu = \frac{r_m^2 + x_m^2}{r_m}; \quad x_\mu = \frac{r_m^2 + x_m^2}{x_m}. \quad (3.3)$$

Данные измерений и вычислений заносят в таблицы 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1

№	Из м е р е н и я													
	$U_{AB},$ B	$U_{BC},$ B	$U_{CA},$ B	$I_{AB},$ A	$I_{BC},$ A	$I_{CA},$ A	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$U_a,$ B	$U_b,$ B	$U_c,$ B	$P',$ Bm	$P'',$ Bm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Таблица 3.2

№	В ы ч и с л е н и я										
	$U_{1.\phi},$ B	$I_{x.\phi},$ A	$\Delta P_x,$ Bm	$\cos \varphi_x$	$U_{2.\phi},$ B	$z_x,$ $Ом$	$r_x,$ $Ом$	$x_x,$ $Ом$	$r_\mu,$ $Ом$	$x_\mu,$ $Ом$	k
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

На основе данных таблицы 3.2 строят характеристики холостого хода:
 $I_{x.\phi} = f(U_{1.\phi}); \quad \Delta P_x = f(U_{1.\phi}); \quad \cos \varphi_x = f(U_{1.\phi}).$

При определении коэффициента трансформации используют следующие соотношения: $k_A = U_A/U_a$; $k_B = U_B/U_b$; $k_C = U_C/U_c$; $k = (k_A + k_B + k_C)/3$.

Опыт короткого замыкания

Для проведения опыта собирают схему, представленную на рис. 3.2. Устанавливают минимальное значение напряжения. Замыкают накоротко вторичную обмотку и плавно увеличивают напряжение. При этом контролируют ток, который не должен превышать значения $I_k < (1,1...1,2)I_{ном}$. Делают 5-6 измерений, включая измерение при номинальном токе $I_{ном} = I_{к.ном}$.

Данные измерений и вычислений заносят в таблицы 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3

№	Из м е р е н и я							
	$U_{AB},$ B	$U_{BC},$ B	$U_{CA},$ B	$I_{AB},$ A	$I_{BC},$ A	$I_{CA},$ A	$P',$ Bm	$P'',$ Bm
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Таблица 3.4

№	П о д с ч е т ы									
	$U_{к.ф},$ B	$I_{к.ф},$ A	$\Delta P_k,$ Bm	$\cos \varphi_k$	$z_k,$ $Ом$	$r_k,$ $Ом$	$x_k,$ $Ом$	$u_k\%$	$u_{к\alpha}\%$	$u_{к\gamma}\%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

На основе данных таблицы 3.4 строят характеристики короткого замыкания: $I_{к.ф} = f(U_{к.ф})$; $\Delta P_k = f(U_{к.ф})$; $\cos \varphi_k = f(U_{к.ф})$.

Формулы для справки: $\Delta P_{\Sigma} = P' \pm P''$; $I_{к.ф} = \frac{I_{AB} + I_{BC} + I_{CA}}{3\sqrt{3}}$;

$$U_{к.ф} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}; \cos \varphi_k = \frac{\Delta P_k}{3U_{к.ф}I_{к.ф}}; z_k = \frac{U_{к.ф}}{I_{к.ф}}; r_k = \frac{\Delta P_k}{3I_{к.ф}^2}; x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Из характеристики $I_{к.ф} = f(U_{к.ф})$ определяют напряжение $U_{к.ф.ном}$ при котором в обмотке протекает номинальный ток $I_{1ном} = I_{к.ном}$, т.е. определяют напряжение короткого замыкания трансформатора. Обычно его выражают в процентах относительно номинального напряжения:

$$u_{к\%} = \frac{U_{к.ф.ном}}{U_{1.ф.ном}} 100\% = \frac{I_{1ф.ном} z_k}{U_{1.ф.ном}} 100\%$$

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания равны:

$$u_{ка\%} = \frac{I_{1\phi.ном} r_k}{U_{1\phi.ном}} 100\% : \quad u_{кр\%} = \frac{I_{1\phi.ном} x_k}{U_{1\phi.ном}} 100\% .$$

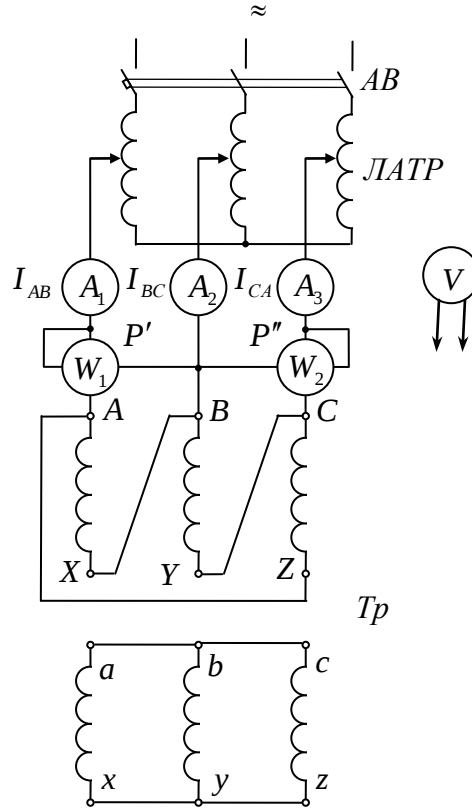


Рисунок 3.2. Схема опыта короткого замыкания трехфазного трансформатора

Под одной из формул рассчитывают установившийся ток короткого замыкания трансформатора при номинальном первичном напряжении $U_{1\phi.ном}$:

$$I_{к.уст} = \frac{U_{1\phi.ном}}{z_k} = \frac{U_{1\phi.ном}}{U_{к.ф.ном}} I_{1\phi.ном} = \frac{100\%}{u_{к\%}} I_{1\phi.ном} = \frac{1}{u_{к*}} I_{1\phi.ном} = \frac{1}{z_{к*}} I_{1\phi.ном}, \quad (3.4)$$

где $u_{к*} = \frac{u_{к\%}}{100\%} = \frac{U_{к.ф.ном}}{U_{1\phi.ном}}$ – напряжение короткого замыкания в относительных

единицах [о.е.]; $z_{к*} = \frac{z_k}{z_{ном}} = \frac{z_k I_{1\phi.ном}}{U_{1\phi.ном}} = \frac{U_{к.ф.ном}}{U_{1\phi.ном}} = u_{к*}$ – сопротивление короткого замыкания в относительных единицах [о.е.].

Следует еще раз подчеркнуть, что как в процентах, так и в относительных единицах напряжение короткого замыкания трансформатора равно сопротивлению короткого замыкания, т.е. $u_{к\%} = z_{к\%}$, $u_{к*} = z_{к*}$.

Отчет должен содержать:

1. Номинальные данные трансформатора и данные, полученные при измерении сопротивлений обмоток;
2. Схемы проведения опытов;
3. Таблицы замеров и подсчетов;
4. Использованные формулы;
5. Характеристики холостого хода и короткого замыкания;
6. Установившийся ток короткого замыкания трансформатора.

Контрольные вопросы

1. Выразите мощности трехфазной системы через фазные и линейные токи и напряжения.
2. Что представляет собой группа соединения обмоток трехфазного трансформатора?
3. Чем объясняется несимметрия токов холостого хода (намагничивающих токов) в трехфазном стержневом трансформаторе?
4. Перечислите способы регулирования вторичного напряжения трансформаторов и поясните их особенности.

Работа № 4. Исследование параллельной работы трехфазных трансформаторов

Цель работы

Целью работы является исследование распределения нагрузки между двумя параллельно работающими трансформаторами.

Проверка правильности соединения обмоток

Для исследования параллельной работы трансформаторов собирают схему, представленную на рис. 4.1. Прежде чем включить трансформаторы на параллельную работу, проверяют корректность схемы подключения клемм трансформаторов к вводным выключателям AB_1 и AB_2 , и к секционному выключателю AB_3 . Для этого **шунтируют** один из контактов выключателя AB_3 , например, между c_I и c_{II} . Подключают трансформаторы к сети с помощью автоматических выключателей AB_1 и AB_2 . Измеряют напряжение между клеммами $a_I - a_{II}$ и $b_I - b_{II}$. Если схема собрана без ошибок, то напряжение ΔU между клеммами $a_I - a_{II}$ и $b_I - b_{II}$ приблизительно равно нулю.

Наличие значительных напряжений ΔU между этими клеммами свидетельствует об ошибке в схеме подключения. Для устранения ошибки необходимо поменять местами фазы одного из трансформаторов и вновь измерить эти напряжения. **Когда окончательно установлена правильность подключения трансформаторов шунт между клеммами c_I и c_{II} убирают.**

Параллельная работа трансформаторов с разными коэффициентами трансформации

С помощью автоматического выключателя AB подключают к сети трехфазный *ЛАТР*, увеличивают его напряжение до 100 В. Затем включают AB_1 и AB_2 . В этом случае два трансформатора работают отдельно в режиме холостого хода. Снимают показания приборов, рассчитывают коэффициенты трансформации, потери мощности.

Определяют относительную разность коэффициентов трансформации, которая позволяет судить о выполнении одного из условий параллельной работы трансформаторов:

$$\Delta k = \frac{k_I - k_{II}}{\sqrt{k_I k_{II}}} 100\% \leq 0,5\%, \quad (4.1)$$

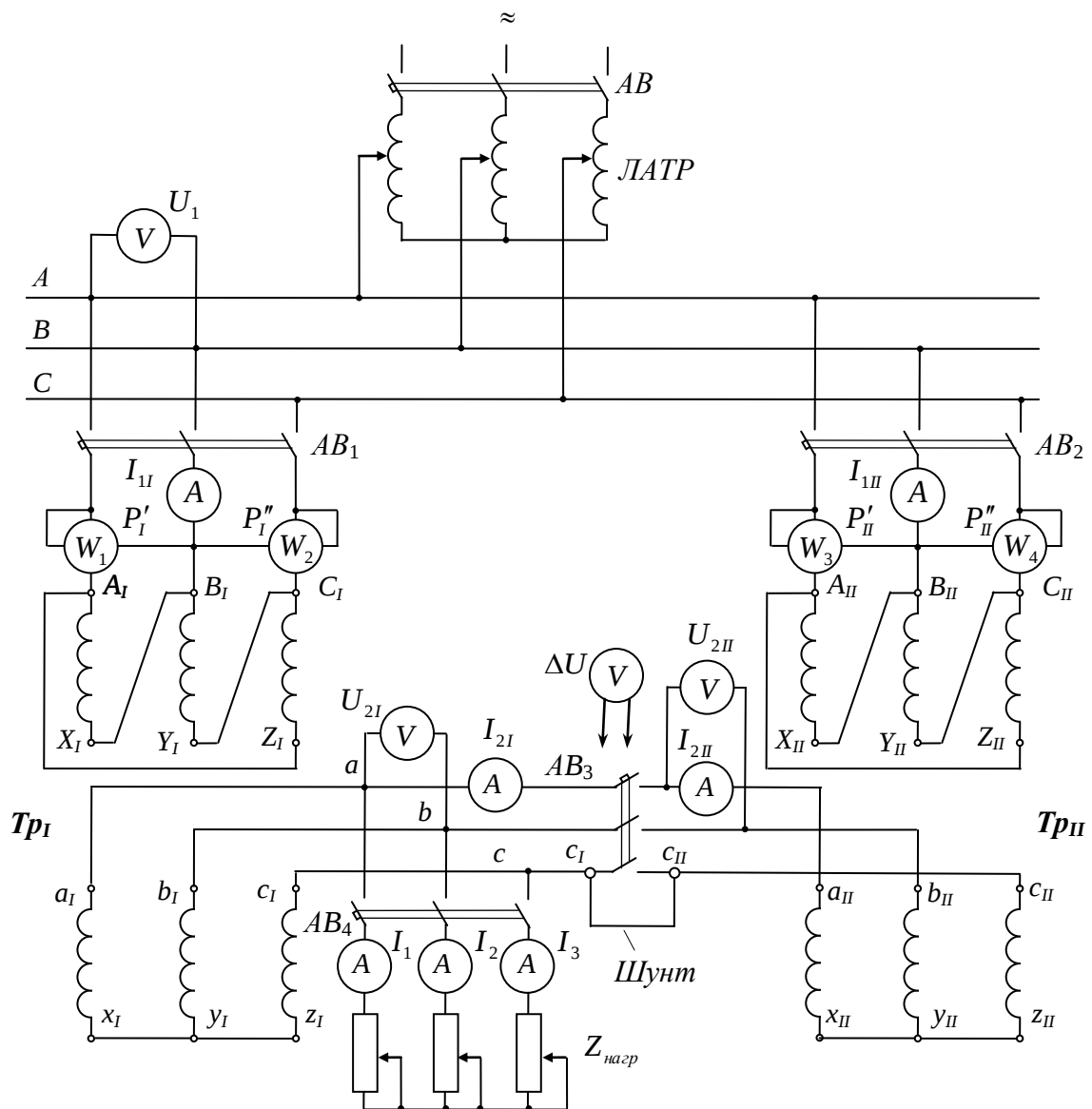


Рисунок 4.1. Схема включения трехфазных трансформаторов на параллельную работу

где $k_I = \frac{U_{1\phi}}{U_{2x.I.\phi}}$, $k_{II} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2x.II.\phi}}$ – коэффициенты трансформации соответственно первого и второго трансформаторов; $U_{1\phi}$, $U_{2x.I.\phi}$, $U_{2x.II.\phi}$ – фазные напряжения трансформаторов в режиме холостого хода.

Результаты измерений и подсчетов заносят в таблицы 4.1 и 4.2.

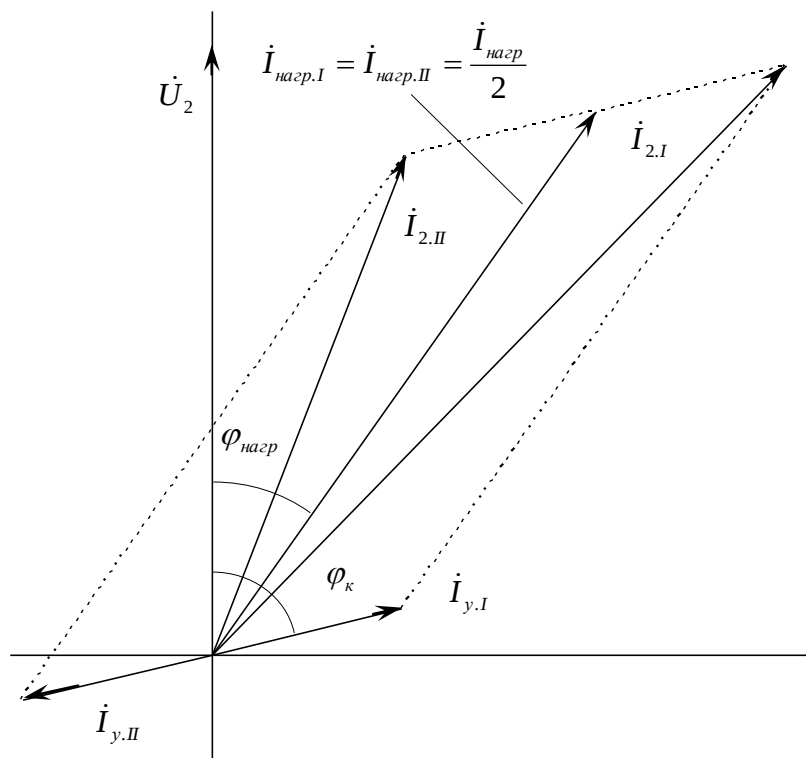


Рисунок 4.2. Векторная диаграмма

После этого исследуют параллельную работу трансформаторов при отсутствии нагрузки. Для этого включают секционный автоматический выключатель AB_3 . Снимают показания приборов, осуществляют расчеты и заносят эти данные в таблицы 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1

№	Измерения													
	$U_1,$ B	$U_{2I},$ B	$U_{2II},$ B	$I_{1I},$ A	$I_{2I},$ A	$I_{1II},$ A	$I_{2II},$ A	$I_1,$ A	$I_2,$ A	$I_3,$ A	$P'_I,$ Bm	$P''_I,$ Bm	$P'_{II},$ Bm	$P''_{II},$ Bm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Таблица 4.2

№	Подсчеты												
	$U_{1\phi},$ B	$U_{2I.\phi},$ B	$U_{2II.\phi},$ B	$I_{нагр},$ A	$\cos \varphi_{нагр}$	$P_I,$ Bm	$P_{II},$ Bm	$P_{I.II},$ Bm	$P_{нагр},$ Bm	$\Delta P,$ Bm	k_I	k_{II}	Δk
1	2		3		4	5	6	7	8	9	10	11	12

На завершающем этапе включают автоматический выключатель AB_4 и исследуют распределение нагрузки между трансформаторами. Полученные данные также заносят в таблицы 4.1 и 4.2.

Используя данные опыта КЗ из лабораторной работы № 3 и результаты, представленные в таблицах 4.1 и 4.2, строят векторную диаграмму токов и

напряжения при параллельной работе трансформаторов на общую нагрузку (рис. 4.2).

Принятые обозначения: I_{1I} I_{1II} – линейные первичные токи, соответственно первого и второго трансформаторов; I_{2I} I_{2II} – вторичные линейные токи; I_1 , I_2 , I_3 – токи нагрузки. P_I , P_{II} – мощности на входе первого и второго трансформаторов.

Формулы для справки: $I_{нагр} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$; $P_I = \pm P'_I \pm P''_I$, $P_{II} = \pm P'_{II} \pm P''_{II}$;

$P_{I,II} = P_I + P_{II}$ – суммарная мощность, потребляемая из сети трансформаторами; $P_{нагр} = 3U_{2,ф} I_{нагр} \cos \varphi_{нагр}$ – активная мощность нагрузки; $\Delta P = P_{I,II} - P_{нагр}$ – потери в двух трансформаторах; φ_k – угол, который определяют из опыта короткого замыкания трансформатора (лабораторная работа № 3).

Отчет должен содержать:

1. Схему проведения опытов;
2. Таблицы замеров и подсчетов;
3. Использованные формулы;
4. Векторную диаграмму.

Контрольные вопросы

1. Какие группы соединения предусмотрены ГОСТом?
2. Каковы условия включения трансформаторов на параллельную работу?
3. Как распределяются ток и мощность нагрузки между параллельно работающими трансформаторами?

Работа № 5. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Цель работы

Целью работы является: практическое ознакомление с конструктивным выполнением асинхронных машин; определение параметров двигателя из опытов холостого хода и короткого замыкания; получение рабочих характеристик двигателя.

Определение начал и концов трехфазной обмотки статора

Начала и концы катушечных групп (фаз) обмотки статора маркируются следующим образом: первая фаза $C1-C4$ (или $A-X$), вторая фаза $C2-C5$ ($B-Y$) и третья $C3-C6$ ($C-Z$). С помощью омметра или любого другого универсального прибора определяют клеммы каждой из фаз. Затем, приняв произвольные обозначения для двух фаз обмотки, например, $C1-C4$ и $C2-C5$, собирают схему, показанную на рис. 5.1. При подключении этих фаз обмотки статора к переменному напряжению лампа, подключенная к оставшейся фазе, загорается (рис 5.1,а) или нет (рис 5.1,б). В первом случае к концу одной обмотки присоединено начало другой (не правильно), во втором – обмотки соединены концами (правильно). Для маркировки третьей фазы её присоединяют к первой, а лампу – ко второй фазе, и повторяют опыт. На рис 5.1,в и рис 5.1,г представлены катушечные группы (фазы) элементарной двухполюсной обмотки и вектора результирующей МДС. В первом случае МДС создает магнитный поток, который пронизывает катушечную группу третьей фазы и наводит в ней ЭДС (лампа горит), а во втором – ЭДС равна нулю.

Определение омических и активных сопротивлений обмоток статора

Омическое сопротивление R_{10m} определяется методом амперметра и вольтметра при включении в цепь постоянного тока. Для вычисления активного сопротивления используется соотношение $r_{1a} = k_r R_{10m}$, в котором k_r – коэффициент, учитывающий увеличение потерь за счет вихревых токов в проводниках обмотки. Его значение принимается равным $k_r = 1,05-1,1$.

Активное сопротивление статорной обмотки r_{1a} приводится к рабочей температуре по формуле

$$r_1 = r_{1a} [1 + \alpha(t - t_{oc})], \quad (5.1)$$

где α – температурный коэффициент материала (для меди $\alpha = 0,004$), t – рабочая температура асинхронного двигателя; t_{oc} – температура окружающей среды.

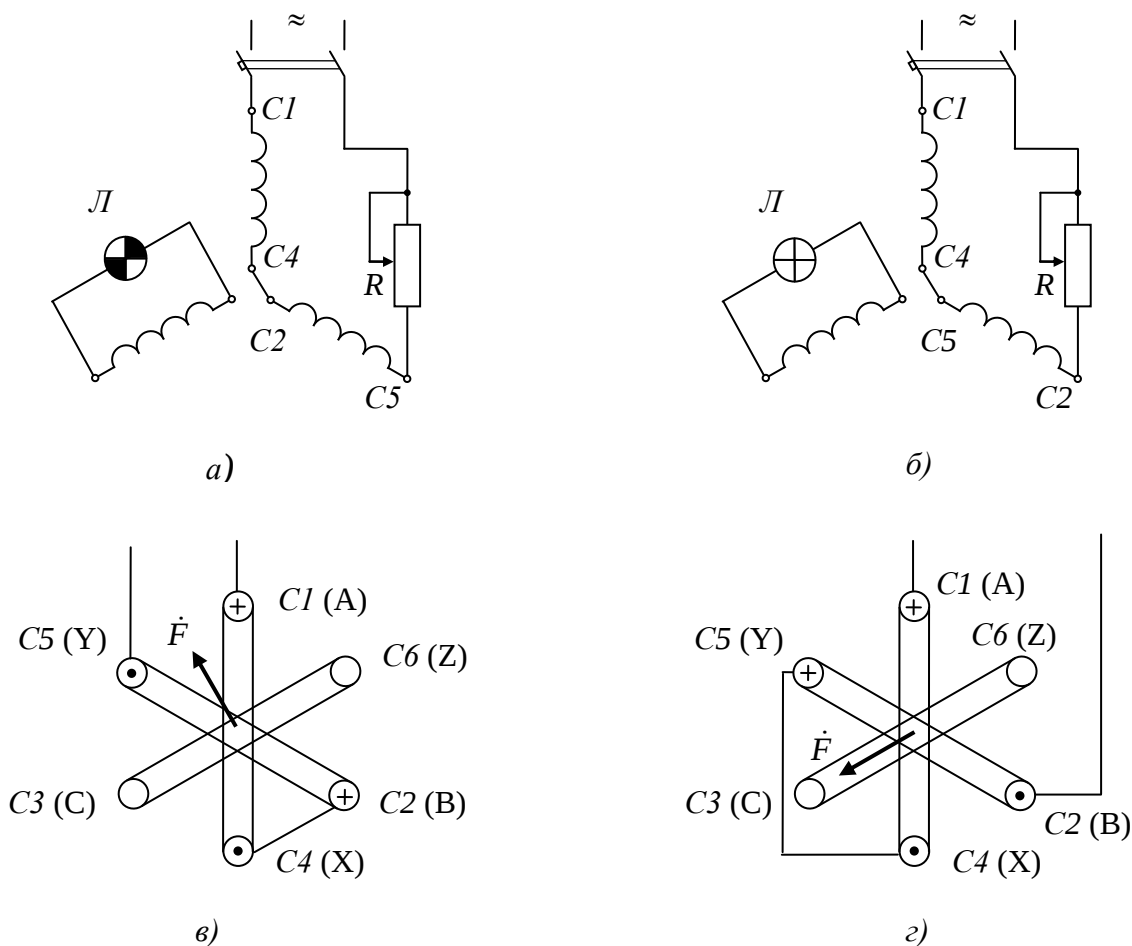


Рисунок 5.1. Определение начал и концов катушечных групп (фаз) обмотки трехфазного асинхронного двигателя

Данные измерений и вычислений заносят в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

№	Из м е р е н и я			В ы ч и с л е н и я			
	$U, В$	$I, А$	$t_{oc}, ^\circ C$	$R_{10м}, Ом$	$r_{1а}, Ом$	$r_1, Ом$	$r_{1cp}, Ом$

Когда испытательный стенд позволяет измерить полезный момент на валу M_2 , скорость вращения ротора ω и активную мощность со стороны сети P_1 , тогда КПД определяется достаточно просто: $\eta = P_2/P_1 = (\omega M_2)/P_1$. В противном случае задача решается косвенным методом, т.е. путем определения потерь в машине.

Потери в асинхронном двигателе

1. Электрические потери в обмотке статора:

$$\Delta P_{эл} = 3I_1^2 r_1, \quad (5.2)$$

где I_1 – ток фазы обмотки статора; r_1 – активное сопротивление фазы, приведенное к рабочей температуре t [$^\circ C$].

2. Магнитные $\Delta P_{\text{магн}}$ и механические $\Delta P_{\text{мех}}$ потери. При изменении нагрузки от нуля до номинальной эти потери принимаются постоянными: $\Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} = \Delta P'_x = \text{const}$. Сумма этих потерь определяется из опыта холостого хода:

$$\Delta P'_x = \Delta P_x - 3I_x^2 r_1, \quad (5.3)$$

где ΔP_x – мощность, потребляемая двигателем в режиме холостого хода (потери ХХ); I_x – ток холостого хода (фазное значение).

Механические потери пропорциональны скорости ротора $\Delta P_{\text{мех}} \equiv \omega$. При увеличении нагрузки на валу двигателя скорость ротора уменьшается. Однако, в стандартном короткозамкнутом асинхронном двигателе скорость уменьшается незначительно, поэтому можно считать, что $\Delta P_{\text{мех}} \approx \text{const}$.

Магнитные потери пропорциональны квадрату индукции, и соответственно, квадрату напряжения $\Delta P_{\text{магн}} \equiv B^2 \equiv U^2$. Следовательно, зависимость $\Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} = f(U^2)$ представляет собой прямую линию. Графический способ разделения потерь $\Delta P_{\text{магн}}$ и $\Delta P_{\text{мех}}$ представлен на рис. 5.2. Поскольку при $U_1 = 0$ потери $\Delta P_{\text{магн}} = 0$, то механические потери определяются отрезком OD , отсекаемым на оси ординат касательной CD . Магнитные потери при данном напряжении определяются как разность $\Delta P_{\text{магн}} = \Delta P'_x - \Delta P_{\text{мех}}$.

3. Электрические потери в обмотке ротора:

$$\Delta P_{\text{эл2}} = sP_{\text{эм}}, \quad (5.4)$$

где s – скольжение; $P_{\text{эм}} = P_1 - (\Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{магн}})$ – электромагнитная мощность, т.е. мощность, передаваемая ротору посредством основного магнитного потока.

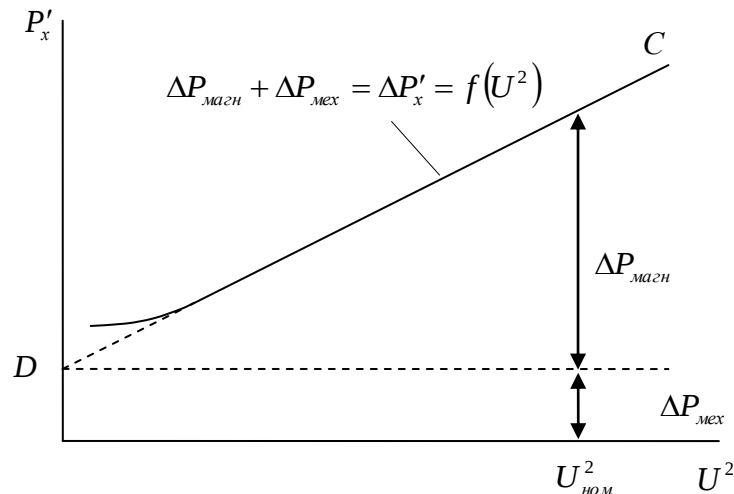


Рисунок 5.2. Разделение потерь $\Delta P_{\text{магн}}$ и $\Delta P_{\text{мех}}$

4. Добавочные потери при номинальной нагрузке принимаются равными:

$$\Delta P_{\text{доб.ном}} = 0,005P_{1\text{ном}} = 0,005P_{2\text{ном}}/\eta_{\text{ном}}. \quad (5.5)$$

Для любой другой нагрузки – $\Delta P_{доб} = \Delta P_{доб.ном} (I_1/I_{1ном})^2$.

КПД

После определения суммы потерь $\Sigma \Delta P$ находят полезную механическую мощность на валу $P_{вал} = P_2$ и КПД двигателя: $\Sigma \Delta P = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{магн} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}$; $P_2 = P_1 - \Sigma \Delta P$; $\eta = P_2/P_1$.

Энергетическая диаграмма асинхронной машины при её работе в двигательном режиме представлена на рис. 5.3. Здесь $P_{эл.сеть} = P_1$ – активная мощность (электрическая), потребляемая из сети; $P_{эм} = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{магн}$ – электромагнитная мощность, передаваемая от статора к ротору посредством основного магнитного потока; $P_{мех} = P_{эм} - \Delta P_{эл2}$ – механическая мощность, развиваемая ротором; $P_{мех.полезн} = P_{мех} - \Delta P_{мех} - \Delta P_{доб}$ – полезная механическая мощность на валу двигателя, которая в двигательном режиме является мощностью на выходе, т.е. $P_{мех.полезн} = P_2$. Эта мощность, наряду с другими данными, указывается на паспортной табличке асинхронного двигателя.

Характеристики холостого хода

К характеристикам холостого хода относятся зависимости $\Delta P_x = f(U_1)$, $I_x = f(U_1)$, $\cos \varphi_x = f(U_1)$, при частоте напряжения $f_1 = f_{1ном} = const$.

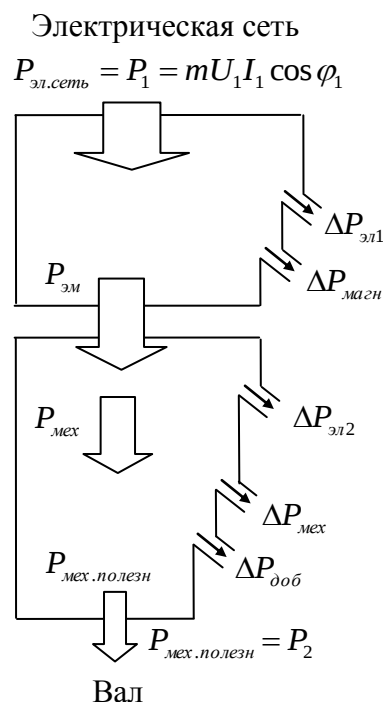


Рисунок 5.3. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

При снятии характеристик используется электрическая схема, представленная на рис. 5.4. Сначала к двигателю подводят напряжение $U_1 = 1,2U_{1ном}$, а затем его плавно понижают до $U_1 = (1; 0,8; 0,6; 0,4)U_{1ном}$. В каждом случае записывают показания приборов. За расчетные фазные напряжения и токи принимаются их средние значения (соединение фаз обмотки статора – Δ):

$$I_x = \frac{I_{AB} + I_{BC} + I_{CA}}{3\sqrt{3}}; \quad (5.6)$$

$$U_1 = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}. \quad (5.7)$$

Мощность, потребляемая двигателем при холостом ходе, равна:

$$\Delta P_x = \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} + 3I_x^2 r_1 = \Delta P'_x + 3I_x^2 r_1. \quad (5.8)$$

Коэффициент мощности определяют по формуле:

$$\cos \varphi_x = \frac{\Delta P_x}{3U_x I_x}. \quad (5.9)$$

При холостом ходе скорость вращения ротора ω мало отличается от угловой скорости вращающегося кругового магнитного поля ω_0 , которую называют синхронной скоростью или скоростью идеального холостого хода.

В силу этого можно принять, что намагничивающий ток равен току

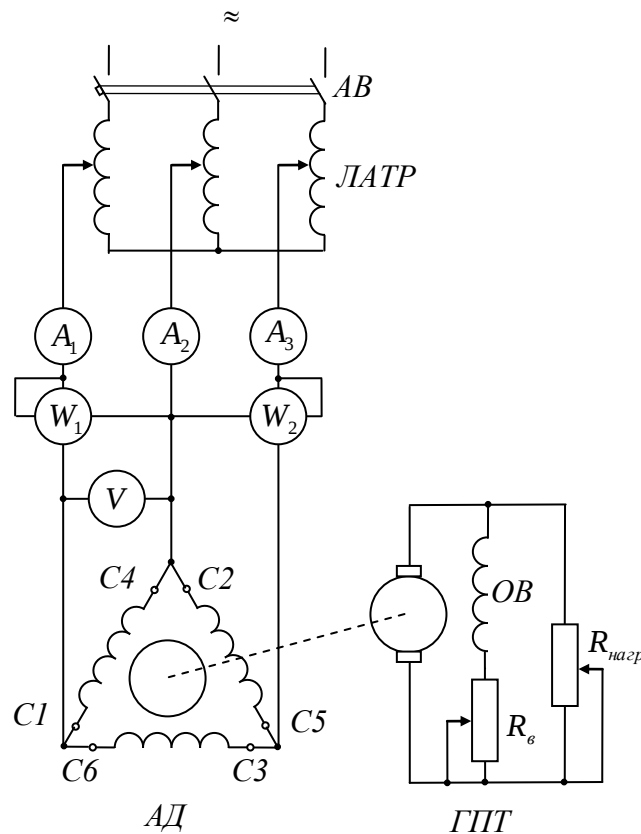


Рисунок 5.4. Схема включения трехфазного асинхронного двигателя

холостого хода $I_\mu = I_x$. Если, кроме этого, пренебречь сопротивлением обмотки статора $Z_1 = r_1 + jx_{\sigma 1}$, как незначительной по сравнению с сопротивлением намагничивающего контура Т-образной схемы замещения $Z_\mu = r_m + jx_m$, то

$$z_x = \frac{U_1}{I_x} \approx z_\mu = \frac{E_1}{I_\mu}, \quad (5.10)$$

где z_x ; I_x – полное сопротивление и ток двигателя в режиме холостого хода при номинальном напряжении на обмотке статора.

Фиктивное активное сопротивление намагничивающего контура r_m , в котором при холостом ходе протекает ток $I_x = I_\mu$ и возникают потери $3I_x^2 r_m$, равные магнитным потерям $\Delta P_{\text{магн}}$, определяют по формуле:

$$r_m = \frac{\Delta P_{\text{магн}}}{3I_x^2}. \quad (5.11)$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя равно:

$$x_m = \sqrt{z_\mu^2 - r_m^2}. \quad (5.12)$$

Данные измерений и вычислений заносят в таблицы 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2

№	Из м е р е н и я							
	U_{AB}, B	U_{BC}, B	U_{CA}, B	I_{AB}, A	I_{BC}, A	I_{CA}, A	P', Bm	P'', Bm
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Таблица 5.3

№	В ы ч и с л е н и я										
	U_1, B	I_1, A	$\Delta P_x, Bm$	$\Delta P_{\text{эл1}}, Bm$	$\Delta P'_x, Bm$	$\Delta P_{\text{магн}}, Bm$	$\Delta P_{\text{мех}}, Bm$	$\cos \varphi_x$	$z_\mu, Ом$	$r_m, Ом$	$x_m, Ом$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Здесь $\Delta P_x = P' \pm P''$.

По полученным данным строят график разделения потерь (рис. 5.2) и характеристики холостого хода $\Delta P_x = f(U_1)$, $I_x = f(U_1)$, $\cos \varphi_x = f(U_1)$.

Характеристики короткого замыкания

К характеристикам короткого замыкания асинхронного двигателя относятся зависимости $\Delta P_\kappa = f(U_\kappa)$, $I_\kappa = f(U_\kappa)$, $\cos \varphi_\kappa = f(U_\kappa)$, при заторможенном роторе и $f_1 = f_{1\text{ном}} = \text{const}$.

Электрическая схема для проведения опыта представлена на рис. 5.4. Сначала устанавливают напряжение, при котором $I_\kappa = 1,25I_{\text{ном}}$, и быстро снимают показания приборов. После этого двигатель отключают от сети для охлаждения. Затем опыты повторяют для $I_\kappa = (1; 0,75; 0,5; 0,25)I_{\text{ном}}$.

За расчетный фазный ток и напряжение принимают их средние значения:

$$I_\kappa = \frac{I_{AB} + I_{BC} + I_{CA}}{3\sqrt{3}}; \quad U_\kappa = U_1 = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}. \quad (5.13)$$

Коэффициент мощности при КЗ:

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{3U_{\kappa} I_{\kappa}}. \quad (5.14)$$

В отличие от трансформатора, асинхронный двигатель при номинальном напряжении имеет значительный ток холостого хода: $I_x = (0,35 - 0,8)I_{ном}$. Однако при проведении опыта КЗ напряжение уменьшают, что позволяет пренебречь током холостого хода $I_x \approx 0$. При таком допущении становится возможным:

1. Упростить выражения для МДС и токов: $\dot{F}_1 = -\dot{F}_2'$, $\dot{I}_{\kappa} = \dot{I}_1 = -\dot{I}_2'$;
2. Перейти к упрощенной схеме замещения (к схеме без намагничивающего контура), состоящей из двух комплексных сопротивлений обмоток статора и ротора: $Z_{\kappa} = Z_1 + Z_2' = r_1 + jx_{\sigma 1} + r_2' + jx_{\sigma 2}' = (r_1 + r_2') + j(x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}') = r_{\kappa} + jx_{\kappa}$.

Магнитные потери при проведении опыта КЗ малы ($\Delta P_{\text{магн}} \equiv U^2$) и поэтому не учитываются. В силу этого полное, активное и индуктивное сопротивление КЗ определяют следующим образом:

$$z_{\kappa} = \frac{U_{\kappa}}{I_{\kappa}}; r_{\kappa} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{3I_{\kappa}^2}; x_{\kappa} = \sqrt{z_{\kappa}^2 - r_{\kappa}^2}. \quad (5.15)$$

Параметры обмоток равны:

$$r_2' = r_{\kappa} - r_1; x_{\sigma 1} \approx x_{\sigma 2}' \approx x_{\kappa}/2. \quad (5.16)$$

Если двигатель имеет пазы открытой или полузакрытой формы, то сопротивление x_{κ} остается практически постоянным. Это связано с тем, что магнитная проницаемость для потоков рассеяния статора и ротора, которые в основном замыкаются через воздушные промежутки, остается неизменной, т.е. $\mu_{\sigma} \approx \text{const}$. В этих условиях $z_{\kappa} = \text{const}$, $\cos \varphi_{\kappa} = \text{const}$, а зависимость $I_{\kappa} = f(U_{\kappa})$ имеет вид прямой, выходящей из начала координат.

При КЗ активная мощность, которую потребляет двигатель из сети, в основном рассеивается в обмотках.

Следовательно, эта мощность пропорциональна квадрату тока $\Delta P_{\kappa} = \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} = 3I_1^2 r_1 + 3(I_2')^2 r_2'$

В свою очередь при $z_{\kappa} = \text{const}$ ток $I_{\kappa} \equiv U_{\kappa}$, а зависимость $\Delta P_{\kappa} = f(U_{\kappa})$ имеет вид параболы (рис. 5.5).

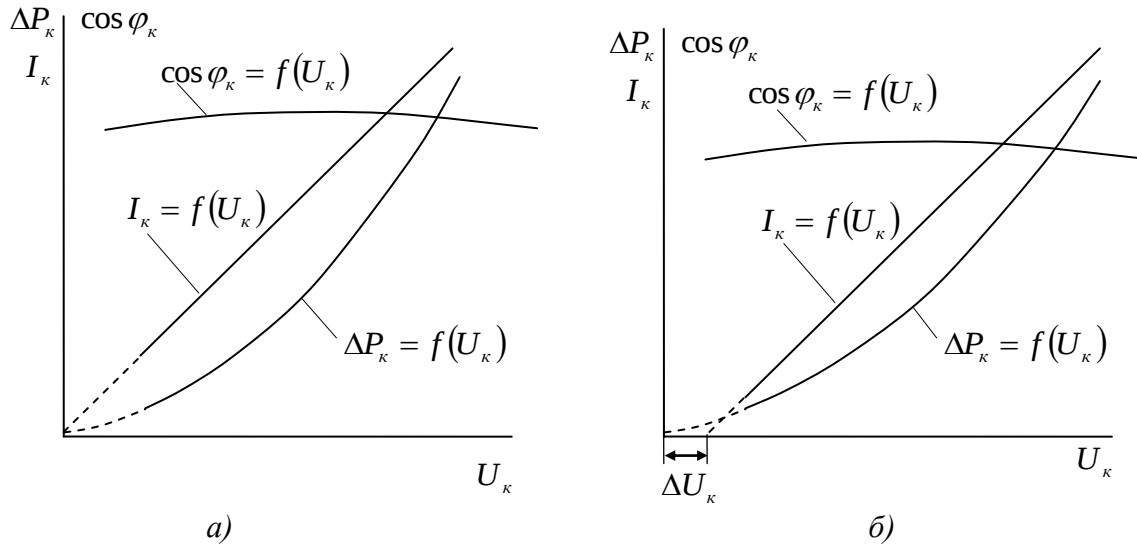


Рисунок 5.5. Характеристики КЗ: а) – двигатель с открытыми пазами ротора; б) – двигатель с закрытыми пазами ротора

По данным опыта КЗ вычисляют начальный пусковой ток $I_{\text{пуск}}$ и начальную пусковую мощность $P_{\text{пуск}}$, т.е. ток и мощность при заторможенном роторе и номинальном напряжении на обмотке статора $U_1 = U_{1\text{ном}}$:

$$I_{\text{пуск}} = I_\kappa \frac{U_{1\text{ном}} - \Delta U_\kappa}{U_\kappa - \Delta U_\kappa}; \quad P_{\text{пуск}} = \Delta P_\kappa \left(\frac{U_{1\text{ном}} - \Delta U_\kappa}{U_\kappa - \Delta U_\kappa} \right)^2, \quad (5.17)$$

где ΔU_κ – напряжение, которое определяется графическим путем (рис. 5.5, б).

Последние формулы носят общий характер. В частном случае, когда отсутствует насыщение и параметры машины неизменны, в них следует принять $\Delta U_\kappa = 0$.

Поскольку при неподвижном роторе $\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{доб}} = \Delta P_2 = 0$ (рис. 5.3), то мощность, потребляемая двигателем, равна

$$\Delta P_\kappa = \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{эл2}}. \quad (5.18)$$

Электромагнитная мощность в этом режиме идет на покрытие электрических потерь в роторе:

$$P_{\text{эм}} = \Delta P_{\text{эл2}} = \Delta P_\kappa - \Delta P_{\text{магн}} - \Delta P_{\text{эл1}}. \quad (5.19)$$

Магнитные потери $\Delta P_{\text{магн}}$ определяют по рис. 5.2 для соответствующего напряжения U_κ .

Момент, развиваемый двигателем при напряжении U_κ , равен:

$$M_\kappa = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_0}, \quad (5.20)$$

где $\omega_0 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p}$ – угловая скорость вращения поля (скорость идеального

холостого хода), рад/с ; $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$ – частота вращения поля, об/мин ;

f_1 – частота напряжения в сети, Гц ; p – число пар полюсов двигателя.

Начальный пусковой момент при $U_1 = U_{1\text{ном}}$ вычисляют по формуле:

$$M_{\text{пуск}} = M_{\kappa} \left(\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\kappa}} \right)^2. \quad (5.21)$$

Кратность тока и момента при пуске: $\kappa_i = I_{\text{пуск}} / I_{1\text{ном}}$; $\kappa_n = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$.

Данные измерений и вычислений заносят в таблицы 5.4 и 5.5. и строят характеристики КЗ (рис. 5.5). В таблице 5.5 $\Delta P_{\kappa} = P' \pm P''$.

Таблица 5.4

№	Из м е р е н и я							
	U_{AB}, B	U_{BC}, B	U_{CA}, B	I_{AB}, A	I_{BC}, A	I_{CA}, A	P', Bm	P'', Bm
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Таблица 5.5

№	В ы ч и с л е н и я										
	U_{κ}, B	I_{κ}, A	$\Delta P_{\kappa}, Bm$	$\cos \varphi_{\kappa}$	$z_{\kappa}, Ом$	$r_{\kappa}, Ом$	$x_{\kappa}, Ом$	$I_{\text{пуск}}, A$	$M_{\text{пуск}}, Нм$	κ_i	$\kappa_{\text{пуск}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Рабочие и механические характеристики

К рабочим характеристикам асинхронного двигателя относятся зависимости $P_1 = f(P_2)$, $I_1 = f(P_2)$, $\cos \varphi_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $s = f(P_2)$, $M_2 = f(P_2)$, при $U_1 = U_{1н} = \text{const}$ и $f_1 = f_{1ном} = \text{const}$ (рис. 5.6).

Электрическая схема для проведения опыта представлена на рис. 5.4. Устанавливают напряжение $U_1 = U_{1ном} = \text{const}$. Плавно увеличивают нагрузку и записывают показания приборов.

Используя данные замеров, находят:

1. $U_1 = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}$ – средние значения фазного напряжения;
2. $I_1 = \frac{I_{AB} + I_{BC} + I_{CA}}{3\sqrt{3}}$ – средние значения фазного тока;
3. $P_1 = P' \pm P''$ – активную электрическую мощность, потребляемую из сети;

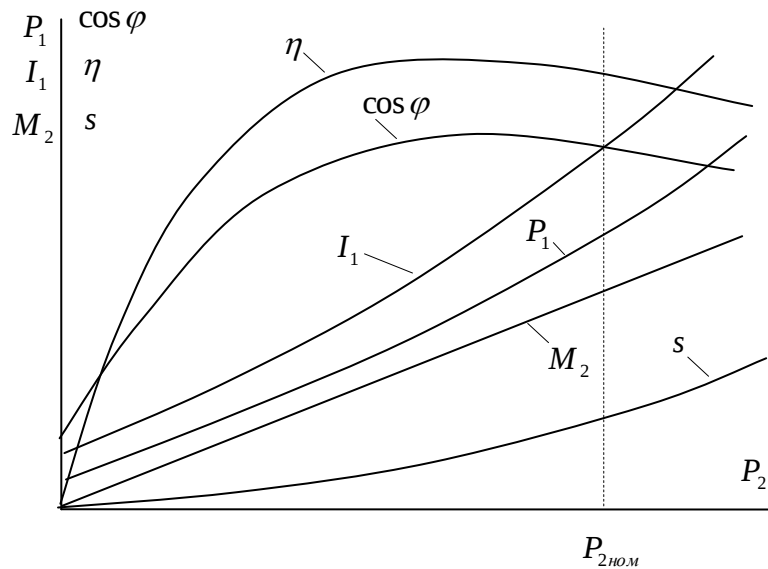


Рисунок 5.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

4. $\omega = (2\pi n_2)/60$ – угловую скорость вращения ротора, где n_2 – частота вращения ротора, *об/мин*;

5. $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ – скольжение ротора относительно поля;

6. $\Delta P_{\text{эл1}} = 3I_1^2 r_1$ – электрические потери в обмотке статора;

7. $P_{\text{эм}} = P_1 - \Delta P_{\text{эл1}} - \Delta P_{\text{магн}}$ – электромагнитную мощность (потери $\Delta P_{\text{магн}}$ берем из опыта холостого хода при $U_1 = U_{1\text{ном}}$);

8. $\Delta P_{\text{эл2}} = sP_{\text{эм}}$ – электрические потери в роторе;

9. $P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} - \Delta P_{\text{эл2}}$ – механическую мощность, развиваемую ротором;

10. $\Delta P_{\text{доб}} = 0,005P_{1\text{ном}} (I_1/I_{1\text{ном}})^2$ – добавочные потери;

11. $P_{\text{вал}} = P_2 = P_1 - \Delta P_{\text{эл1}} - \Delta P_{\text{магн}} - \Delta P_{\text{эл2}} - \Delta P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{доб}} = P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{доб}}$ – механическую мощность на валу, которая в двигательном режиме является полезной механической мощностью двигателя, т.е. P_2 (потери $\Delta P_{\text{мех}}$ берем из опыта ХХ);

12. $\eta = P_2/P_1$ – КПД двигателя;

13. $M_2 = \frac{P_2}{\omega}$ – полезный механический момент на валу;

14. $M = \frac{P_{\text{мех}}}{\omega} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_0}$ – электромагнитный момент;

15. $\Delta M = \frac{\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}}{\omega} = M - M_2$ – момент, обусловленный

механическими и добавочными потерями.

Данные измерений и вычислений заносят в таблицы 5.6 и 5.7.

Таблица 5.6

№	Измерения									Вычисления			
	U_{AB}, B	U_{BC}, B	U_{CA}, B	I_{AB}, A	I_{BC}, A	I_{CA}, A	P', Bm	P'', Bm	$n_2, об/мин$	U_1, B	I_1, A	P_1, Bm	$\cos \varphi_1$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Таблица 5.7

№	Вычисления											
	$\omega, рад/с$	s	$\Delta P_{эл1}, Bm$	$P_{эм}, Bm$	$\Delta P_{эл2}, Bm$	$P_{мех}, Bm$	$P_{допл}, Bm$	P_2, Bm	η	$M, Hм$	$M_2, Hм$	$\Delta M, Hм$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

На основе полученных данных строят рабочие характеристики (рис. 5.6) и механическую характеристику двигателя $\omega = f(M)$ (рис. 5.7).

В данном случае на рис. 5.7 представлена часть механической характеристики, которая соответствует двигательному режиму работы асинхронной машины.

Следует отметить, что в курсе электропривода обычно используется механическая характеристика в виде зависимости $\omega = f(M)$, а в курсе электрических машин – зависимость $M = f(s)$.

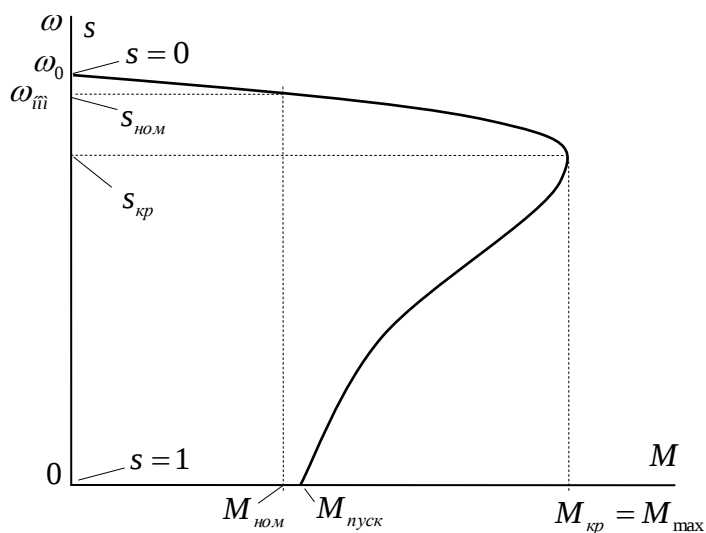


Рисунок 5.7 Механическая характеристика асинхронного двигателя.

$M_{кр}$ – критический момент; $s_{кр}$ – критическое скольжение

На основе механической характеристики, полученной при изменении скольжения в диапазоне $s = \pm\infty$, делается вывод о том, что асинхронная машина, подключенная к сети переменного тока, может работать в трех

режимах: двигательном, генераторном (рекуперативном) и противовключения.

Однако, если за основу брать преобразуемую машиной мощность и потери, то она может работать в пяти режимах [2, 3]. Соответствующие кривые и энергетические диаграммы асинхронной машины, подтверждающие это, приведены на рис. 5.8. Данные представлены в относительных единицах ($S_{баз} = S_{ном} = P_2 / (\eta \cos \varphi)$). Здесь $P_{эл} = f(s)$ – зависимость от скольжения активной электрической мощности, потребляемой или отдаваемой в сеть асинхронной машиной; $P_{мех} = f(s)$ – механическая мощность на валу машины; $P_{эм} = f(s)$ – электромагнитная мощность; $M = f(s)$ – механическая характеристика машины; $s_{эл1}$, $s_{эл2}$ – скольжения идеального электрического холостого хода, при которых электрическая мощность $P_{эл} = 0$. Следует отметить, что в относительных единицах скорость идеального холостого хода равна $\omega_0 = 1$.

Из рис. 5.8 следует, что машина при изменении скольжения в интервалах, указанных в скобках, может работать в следующих пяти режимах:

1) Режим противовключения ($s_{Д.Првкл} = 1 < s < +\infty$). В этом режиме активная мощность поступает как со стороны сети, так и со стороны ротора. Эта мощность рассеивается в виде потерь, а ток более чем в 5-7 раз превышает номинальное значение. Пограничную точку $s_{Д.Првкл} = s_{КЗ.Рмех} = 1$ между режимом противовключения и двигательным режимом называют точкой короткого замыкания. Тем самым подчеркивая величину тока в обмотке статора, который в этом режиме в 5-7 раз превосходит номинальный. Аналогичное превышение тока наблюдается и в обмотке ротора. Следует отметить, что при этом механическая мощность двигателя равна нулю $P_{мех} = \omega M_2 = 0$, поскольку равна нулю угловая скорость ротора $\omega = 0$. В силу этого, эту точку можно назвать точкой короткого замыкания по механической мощности, по аналогии с коротким замыканием в сети, при котором полная электрическая мощность нагрузки равна нулю $S_{КЗ} = UI_{КЗ} = 0$, поскольку равно нулю сопротивление нагрузки $z_{нагр} = 0$ и напряжение на ней $U = 0$;

2) Двигательный режим ($s_{ХХ.Д} < s < s_{Д.Првкл} = 1$). В этом режиме машина потребляет из сети активную мощность $P_{эл}$, которая за вычетом потерь преобразуется в полезную механическую мощность на валу $P_{мех} = P_{эл} - \Delta P$;

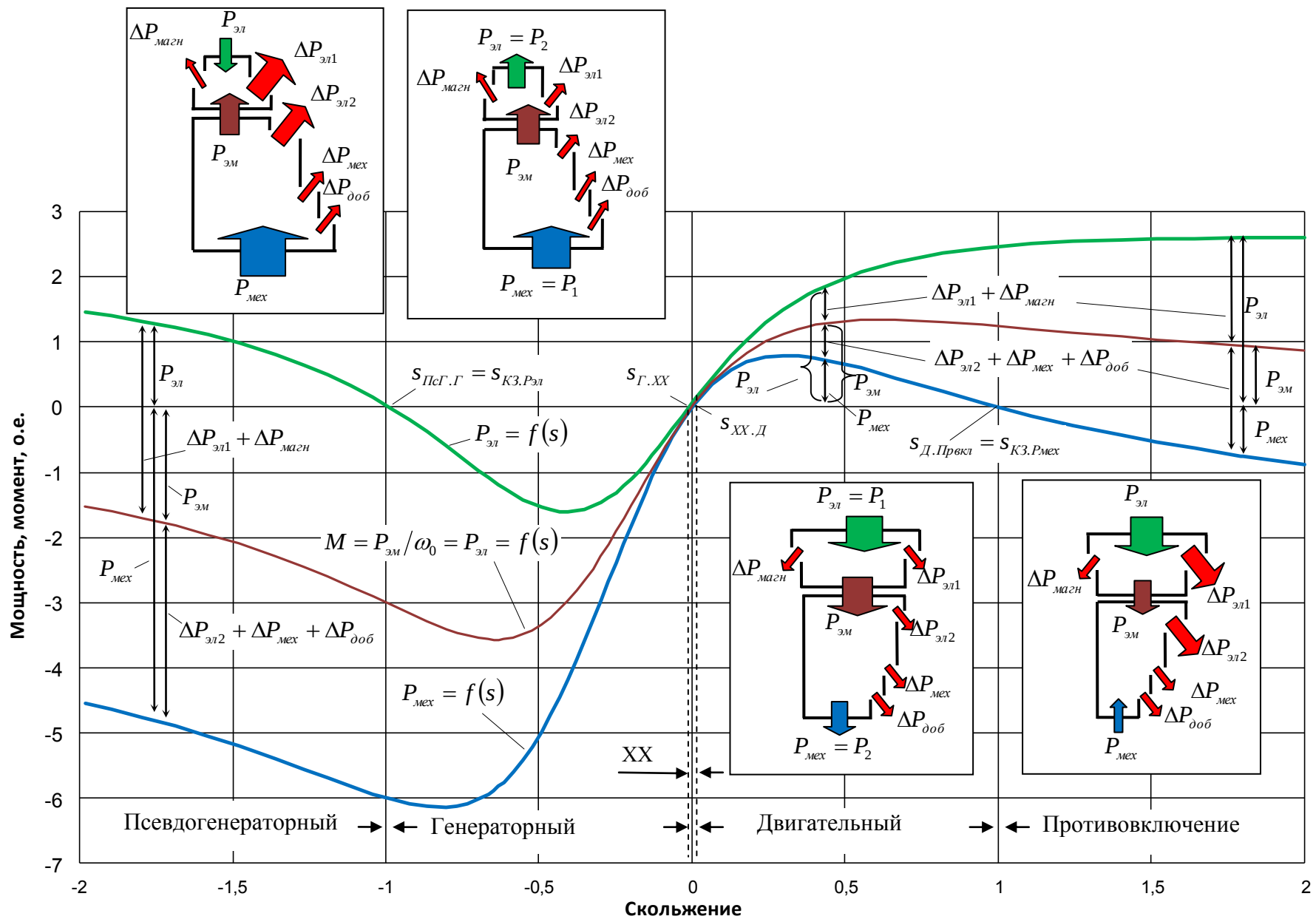


Рисунок 5.8. Здесь $M = P_{эм}$ (o.e.), т.к. в относительных единицах $\omega_0 = 1$ (o.e.)

3) Режим холостого хода ($s_{Г.XX} < s < s_{XX.Д}$). В этом режиме асинхронная машина потребляет активную мощность, как со стороны сети, так и со стороны вала, которая идет на покрытие потерь $P_{эл} + P_{мех} = \Delta P$. При этом ток в обмотке статора имеет минимальное значение и носит в основном реактивный (намагничивающий) характер. В зависимости от мощности и количества полюсов он обычно составляет $I_{XX} = (0,2 \div 0,8) I_{ном}$. В пограничной точке $s_{Г.XX}$ электрическая активная мощность равна нулю $P_{эл} = 0$, и все потери в машине покрываются за счет механической мощности $\Delta P = P_{мех}$. В точке $s_{XX.Д}$ – наоборот, полезная механическая мощность на валу равна нулю $P_{мех} = 0$, а потери покрываются за счет электрической активной мощности $\Delta P = P_{эл}$;

4) Генераторный или рекуперативный режим ($s_{ПсГ.Г} < s < s_{Г.XX}$). В этом режиме, механическая мощность, поступающая с вала, преобразуется в электрическую активную мощность и за вычетом потерь в асинхронной машине поступает в сеть. В пограничной точке между генераторным и псевдогенераторным режимом $s_{ПсГ.Г}$ электрическая активная мощность равна нулю $P_{эл} = 0$, как и при работе в точке $s_{Г.XX}$. Однако ток в обмотке статора в этом случае соизмерим с током при неподвижном роторе (механическом коротком замыкании) и достигает значений $I_1 = (5 \div 7) I_{ном}$.

5) Псевдогенераторный или псевдорекуперативный режим ($-\infty < s < s_{ПсГ.Г}$). В этом режиме потери столь существенны, что для покрытия потерь машина потребляет не только электрическую активную мощность со стороны сети, но и механическую мощность со стороны вала, т.е. $P_{эл} + P_{мех} = \Delta P$. По аналогии с точкой $s_{Д.Прекл} = s_{КЗ.Рмех}$ между двигательным режимом и режимом противовключения, эту точку можно назвать точкой короткого замыкания по активной электрической мощности т.е. $s_{ПсГ.Г} = s_{КЗ.Рэл}$. Следует отметить, что напряжение, а также реактивная мощность и ток в этой точке больше нуля, поскольку последние идут на создание магнитных полей асинхронного двигателя.

Таким образом, при работе в режиме холостого хода, в режиме противовключения, а также в псевдогенераторном режиме асинхронная машина потребляет активную мощность, как со стороны сети, так и со стороны вала, которая идет на покрытие в ней потерь. Однако в последних двух случаях потери соизмеримы и достигают опасных значений, которые превосходят потери в режиме холостого хода более чем в 25-50 раз.

Следует отметить, что более подробная информация о диапазонах скольжений при работе асинхронной машины в пяти режимах представлена в [3]. Прилагаемая к этой статье программа расчета, написанная на Octave (MATLAB), а также визуально-блочная модель, разработанная в расширении SimPowerSystems системы MATLAB, доступны по ссылке [10].

Отчет должен содержать:

1. Номинальные данные двигателя;
2. Схему включения;
3. Таблицы измерений и вычислений;
4. Используемые формулы;
5. Характеристики холостого хода и график разделения потерь $P_{\text{магн}}$ и $P_{\text{мех}}$;
6. Характеристики КЗ;
7. Рабочие характеристики;
8. Механическую характеристику.

Контрольные вопросы

1. Перечислите условия создания кругового вращающегося магнитного поля в электрических машинах переменного тока.
2. Начертите однослойную трехфазную обмотку машины переменного тока ($Z_1 = 6, 2p = 2$).
3. Начертите двухслойную трехфазную обмотку машины переменного тока ($Z_1 = 6, 2p = 2$).
4. Перечислите достоинства и недостатки двухслойной трехфазной обмотки.
5. Объясните принцип работы асинхронного двигателя.
6. Почему относительная величина тока холостого хода ($I_x/I_{1\text{ном}}$) у асинхронного двигателя больше, чем у трансформатора такой же мощности?
7. Почему при уменьшении нагрузки снижается коэффициент мощности асинхронного двигателя?
8. Перечислите способы уменьшения пускового тока асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
9. Как осуществить реверс в трехфазном асинхронном двигателе?
10. Достоинства и недостатки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Работа № 6. Исследование асинхронного конденсаторного двигателя с трехфазной обмоткой статора

Цель работы

Целью работы является: расчет емкости конденсаторов; получение рабочих характеристик конденсаторного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора; определение степени использования мощности машины; построение векторной диаграммы.

Расчет емкости конденсаторов

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором может быть использован для работы от однофазной сети. В этом случае такой двигатель работает как конденсаторный. Одна из возможных схем включения трехфазного двигателя приведена на рис. 6.1. Машина постоянного тока, представленная на рис. 6.1, используется в качестве нагрузочной машины. Она работает в режиме автономного генератора и создает тормозящий момент на валу конденсаторного двигателя. При частоте тока 50 Гц значение емкости рабочего конденсатора C_p для схемы, представленной на рис. 6.1, ориентировочно можно определить по формуле:

$$C_p \approx \frac{4800 I_{ном}}{U_{ном}}, \text{ мкФ.} \quad (6.1)$$

Здесь $I_{ном}$ – номинальный (фазный) ток обмотки статора; $U_{ном} \approx U_{сеть}$ – номинальное (фазное) напряжение двигателя, которое равно напряжению однофазной сети.

Следует отметить, что в установившемся режиме работы двигателя напряжение на конденсаторе больше напряжения сети, поэтому для данной схемы включения рабочее напряжение конденсатора должно быть $U_{конд} \geq 1,15 U_{сеть}$. Если емкость рабочего конденсатора $C_{раб}$ не обеспечивает нормальный пуск двигателя, то параллельно $C_{раб}$ следует включить пусковой конденсатор $C_{пуск} = (2 \div 4) C_{раб}$.

При использовании трехфазного асинхронного двигателя по схеме однофазного конденсаторного двигателя его полезная мощность обычно не превышает 70–80% номинальной мощности.

Рабочие характеристики

К рабочим характеристикам асинхронного двигателя относятся зависимости $P_{1кд} = f(P_{2кд})$, $I_{кд} = f(P_{2кд})$, $\cos \varphi_{кд} = f(P_{2кд})$, $\eta = f(P_{2кд})$, $s = f(P_{2кд})$, $M_2 = f(P_{2кд})$, при $U_1 = U_{1ном} = const$, $f_1 = f_{1ном} = const$ и $C_p = const$ (рис. 5.6).

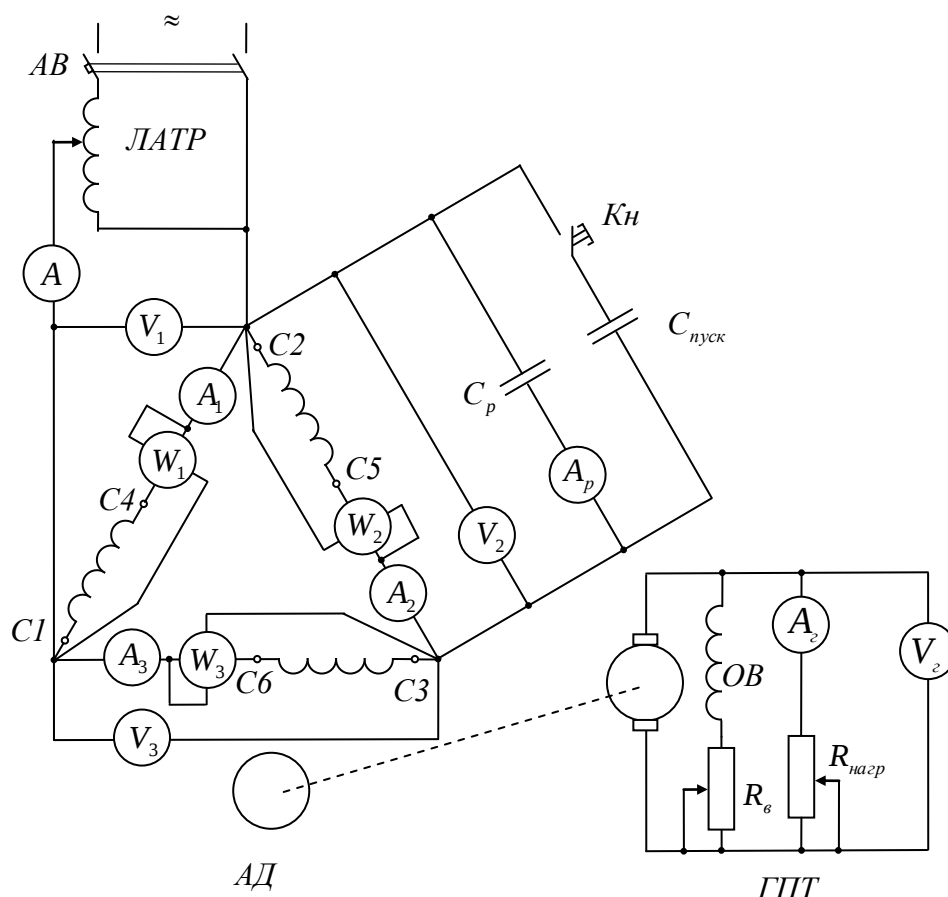


Рисунок 6.1. Схема включения асинхронного конденсаторного двигателя с трехфазной обмоткой статора

После пуска отключают пусковой конденсатор $C_{\text{пуск}}$. Плавно увеличивают нагрузку и снимают 5–6 замеров. В последнем замере ток в первой фазе (клеммы $C1-C4$) увеличивают до значения $I_1 = (1,1 \div 1,2)I_{\text{ном}}$.

При вычислении полезной механической мощности на валу двигателя используют кривую КПД нагрузочной машины при её работе в генераторном режиме: $\eta_z = f(P_{2z})$. Тогда нагрузка на валу двигателя равна $P_{2\kappa\delta} = \frac{P_{2z}}{\eta_z} = \frac{U_z I_z}{\eta_z}$

а полезный механический момент – $M_2 = \frac{P_{2\kappa\delta}}{\omega}$.

Коэффициент использования мощности конденсаторного двигателя с трехфазной обмоткой статора при номинальном однофазном напряжении равен: $\kappa_{\text{исп}} = \frac{P_{2\text{ном.кд}}}{P_{2\text{ном}}}$,

где: $P_{2\text{ном.кд}}$ – номинальная мощность конденсаторного двигателя, когда в одной из фаз обмотки, например, в первой, ток равен номинальному значению $I_1 = I_{\text{ном}}$, а в остальных фазах токи не превышают этого значения, т.е. $I_2 \leq I_{\text{ном}}$, $I_3 \leq I_{\text{ном}}$; $P_{2\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя при его работе

в трехфазной сети. Эта мощность указывается на щитке трехфазного двигателя.

Коэффициент мощности двигателя равен: $\cos \varphi_{\kappa\delta} = \frac{P_{1\kappa\delta}}{U_1 I_{\kappa\delta}}$, где $I_{\kappa\delta}$,

$P_{1\kappa\delta} = P_1 + P_2 + P_3$ – ток и мощность, потребляемые двигателем из сети. Сумму потерь и КПД находят из выражений: $\Sigma \Delta P = P_{1\kappa\delta} - P_{2\kappa\delta}$, $\eta = P_{2\kappa\delta} / P_{1\kappa\delta}$.

Емкость рабочего конденсатора уточняют по результатам замеров

$C_{\text{раб. зам}} = \frac{I_{\text{конд}}}{2\pi f_1 U_2}$. Здесь f_1 – частота сети.

Данные измерений и вычислений заносят в таблицы 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1

№	Из м е р е н и я													
	U_1 ,В	U_2 ,В	U_3 ,В	$I_{\kappa\delta}$,А	I_1 ,А	I_2 ,А	I_3 ,А	I_p ,А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	P_3 , Вт	n_2 , об/мин	I_c , А	U_c , В
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Таблица 6.2

№	В ы ч и с л е н и я										
	ω , рад/с	s	$\cos \varphi_{\kappa\delta}$	$P_{1\kappa\delta}$, Вт	$P_{2\kappa\delta}$, Вт	$\Sigma \Delta P$, Вт	η	M_2 , Нм	$\kappa_{исп}$	C_p , мкФ	$C_{\text{р. зам}}$, мкФ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Векторная диаграмма конденсаторного двигателя

Векторная диаграмма конденсаторного двигателя с трехфазной обмоткой статора, включенного по схеме рис. 6.1, представлена на рис. 6.2.

Векторы токов и напряжений в этой диаграмме связаны следующим образом: $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{U}_3$; $\dot{I}_3 = \dot{I}_{\text{конд}} + \dot{I}_2$; $\dot{I}_{\kappa\delta} = \dot{I}_1 + \dot{I}_3$, где $\dot{I}_{\kappa\delta}$ – вектор тока, потребляемого двигателем из сети; $\dot{I}_{\text{конд}}$ – вектор тока конденсатора.

При построении векторной диаграммы в масштабе напряжения откладывают векторы $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, $\dot{U}_3$, а в масштабе тока – векторы $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ и $\dot{I}_3$. Углы между соответствующими векторами токов и напряжений определяют

из следующих выражений: $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}$; $\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{U_2 I_2}$; $\cos \varphi_3 = \frac{P_3}{U_3 I_3}$.

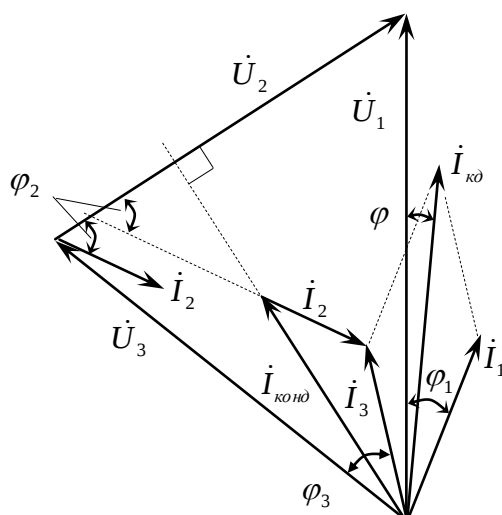


Рисунок 6.2 Векторная диаграмма

Отчет должен содержать:

1. Номинальные данные двигателя;
2. Схему включения;
3. Таблицы измерений и вычислений;
4. Используемые формулы;
5. Рабочие характеристики;
6. Кривые $I_1 = f(s)$, $I_2 = f(s)$, $I_3 = f(s)$;
7. Векторную диаграмму двигателя.

Контрольные вопросы

1. Почему однофазный двигатель не создает пускового момента?
2. С какой целью в цепь пусковой обмотки однофазного двигателя включают фазосмещающий элемент?
3. Чем отличается однофазный двигатель от конденсаторного двигателя?
4. Как можно повысить пусковой момент в конденсаторном двигателе?
5. Начертите несколько электрических схем, которые позволяют использовать трехфазный асинхронный двигатель в однофазной сети?
6. Почему коэффициент мощности конденсаторного двигателя выше, чем у трехфазного двигателя?

Работа № 7. Исследование трехфазного синхронного генератора

Цель работы

Целью работы является: практическое ознакомление с конструктивным выполнением синхронных машин; определение параметров генератора; получение характеристик холостого хода и короткого замыкания; построение нагрузочной, внешних и регулировочных характеристик.

Характеристика холостого хода

Характеристикой холостого хода называется зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения при номинальной частоте вращения ротора и отсутствии нагрузки, т.е. $E_0 = f(I_e)$ при $n = n_n = const$ и $I = 0$.

Для снятия характеристики используется схема, представленная на рис. 7.1.

Первый замер производят при токе возбуждения $I_e = 0$. Плавно увеличивают ток возбуждения и фиксируют значения восходящей ветви кривой ЭДС.

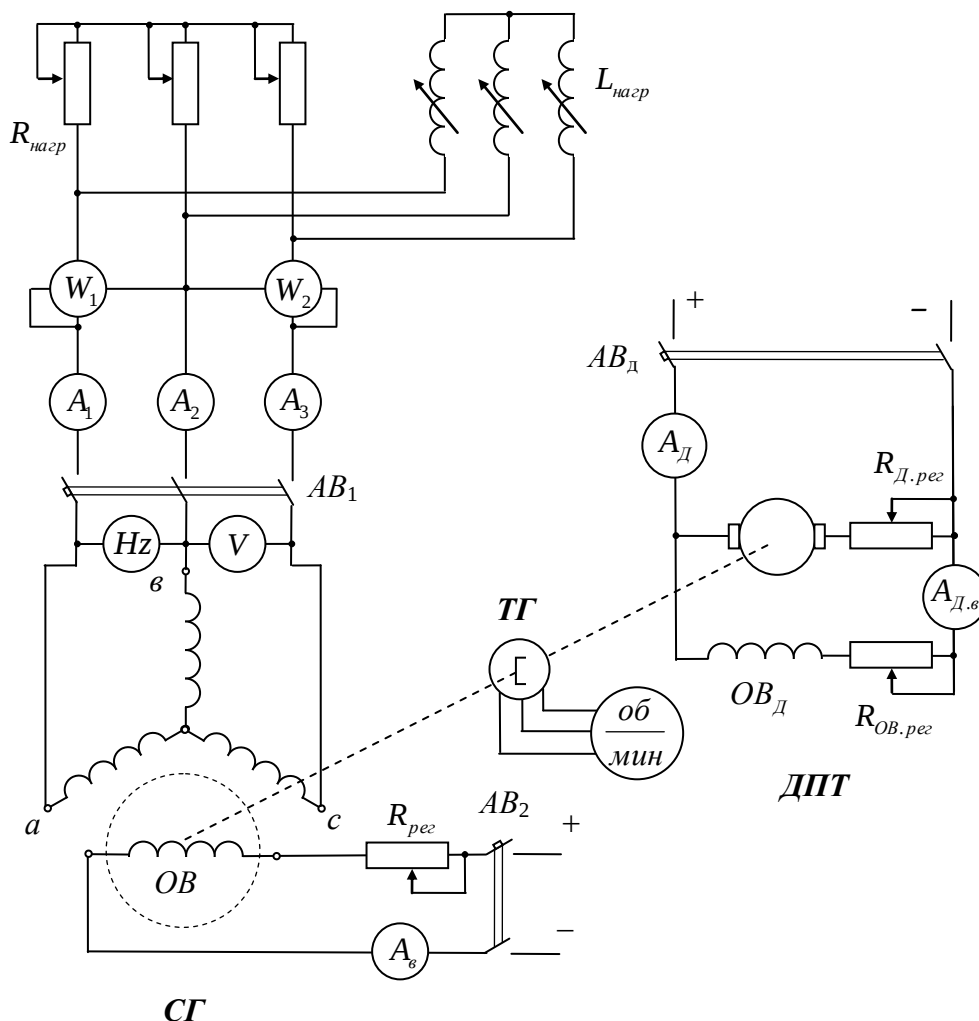


Рисунок 7.1. Схема автономного синхронного генератора

Для предотвращения разброса точек кривой $E_0 = f(I_e)$ нельзя регулировать ток возбуждения в сторону его уменьшения. После достижения

$E_0 = (1,2 \div 1,3)U_n$ плавно уменьшают ток возбуждения и снимают значения нисходящей ветви ЭДС. Последний замер проводят при $I_e = 0$.

Разность ординат восходящей и нисходящей ветвей зависимости $E_0 = f(I_e)$ объясняется явлением гистерезиса.

Обычно при построении диаграммы напряжений и определении параметров за характеристику холостого хода принимается средняя линия, перенесенная параллельно самой себе так, чтобы её начало совпало с началом координат.

Данные исследования заносят в таблицу 7.1.

Формулы для справки: $U = (U_{ab} + U_{bc} + U_{ca})/3$; $E_0 = U$ – при соединении обмотки статора в треугольник; $E_0 = U/\sqrt{3}$ – при соединении обмотки статора в звезду.

Таблица 7.1

№	Из м е р е н и я					В ы ч и с л е н и я	
	$f_1,$ $Гц$	$I_e,$ A	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$U,$ B	$E_0,$ B
1	2	3	4	5	6	7	8

По полученным данным построить характеристику холостого хода.

Характеристика короткого замыкания

Зависимость тока статора от тока возбуждения $I_k = f(I_e)$ при номинальной скорости вращения ротора $n = n_{ном} = const$, когда обмотка статора замкнута накоротко $U = 0$.

Уравнение установившегося режима явнополюсного генератора имеет вид:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jx_q \dot{I}_q - jx_d \dot{I}_d - r_1 \dot{I}, \quad (7.1)$$

где $\dot{E}_0$, $\dot{U}$ – ЭДС холостого хода и напряжение генератора; r_1 – активное сопротивление обмотки статора; $\dot{I}$, $\dot{I}_q$, $\dot{I}_d$ – ток статора и его составляющие по поперечной и продольной осям; x_q , x_d – синхронные индуктивные сопротивления якоря по продольной и поперечной осям. Эти сопротивления имеют две составляющие:

$$\left. \begin{aligned} x_q &= x_{aq} + x_\sigma; \\ x_d &= x_{ad} + x_\sigma, \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

где x_{aq} , x_{ad} – соответствующие индуктивные сопротивления реакции якоря; x_σ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря.

При коротком замыкании реакция якоря синхронного генератора продольная размагничивающая, т.е. ток короткого замыкания ограничивается в основном синхронным индуктивным сопротивлением по продольной оси x_d . Реакция якоря продольная размагничивающая. Машина не насыщена.

Если пренебречь активным сопротивлением фазы обмотки якоря ($r_1 \approx 0$), то уравнение синхронного генератора примет следующий вид: $\dot{E}_0 = jx_d \dot{I}_d = jx_d \dot{I}_k$. В этом случае ненасыщенное значение синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси $x_{d\infty}$ можно определить графически (рис. 7.2) как $x_{d\infty} \approx E_{0\infty} / I_k$. Величина ЭДС $E_{0\infty}$ откладывается на прямолинейной части характеристики холостого хода или на её продолжении.

Зависимости $E_0 = f(I_g)$ и $I_k = f(I_g)$ позволяют определить отношение короткого замыкания (ОКЗ) синхронного генератора, которое равно

$$\text{ОКЗ} = \frac{I_{k0}}{I_{ном}}. \quad (7.3)$$

Здесь $I_{г0}$ – ток возбуждения в режиме ХХ, при котором $E_0 = U_{ном}$, а $I_{к0}$ – установившийся ток короткого замыкания при этом токе возбуждения, т.е. $I_{г0}$ (рис. 7.2).

С учетом того, что $I_{к0} = E_{0\infty K} / x_{d\infty}$ получим

$$\text{ОКЗ} = \frac{I_{к0}}{I_{ном}} = \frac{E_{0\infty K}}{x_{d\infty} I_{ном}}. \quad (7.4)$$

Таким образом, ОКЗ связано с параметрами машины и является постоянной для данной машины. ОКЗ характеризует главные показатели машины – габариты, вес, изменение напряжения, устойчивость при параллельной работе, ток короткого замыкания. В гидрогенераторах $\text{ОКЗ} \approx 1 \dots 1,4$, а в турбогенераторах $\text{ОКЗ} \approx 0,5 \dots 0,7$. При небольшом значении ОКЗ машина имеет небольшой воздушный зазор и большое синхронное индуктивное сопротивление $x_{d\infty}$. В этом случае возрастает реакция якоря и как следствие возрастает изменение напряжения под действием нагрузки, снижается устойчивость генератора при параллельной работе. При этом машина имеет меньшие размеры, вес и ток КЗ. Увеличение ОКЗ приводит к улучшению энергетических характеристик машины, однако при этом возрастают её габариты, вес и стоимость.

При проведении опыта КЗ ток возбуждения плавно увеличивают от нуля до значения, при котором $I_k = I_{ном}$.

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 7.2.

Таблица 7.2

№	Из м е р е н и я					В ы ч и с л е н и я		
	$f_1,$ $\Gamma\text{ц}$	$I_g,$ A	$I_1,$ A	$I_2,$ A	$I_3,$ A	$I_k,$ A	$x_{d\infty},$ $Ом$	ОКЗ
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Здесь $I_{\kappa} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$.

Характеристику короткого замыкания строят совместно с характеристикой холостого хода (рис. 7.2).

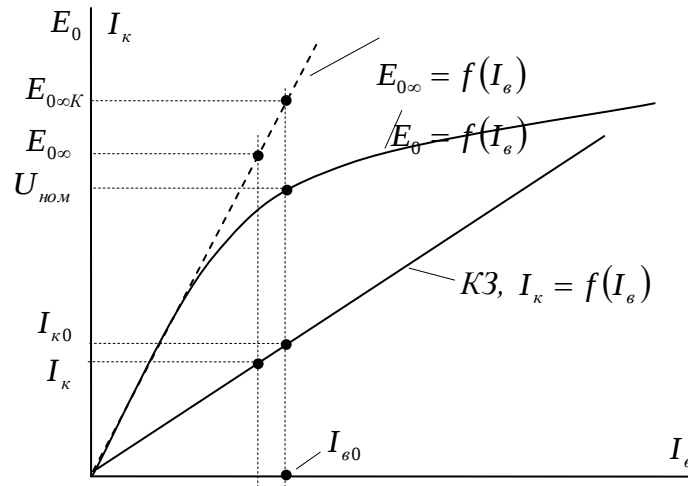


Рисунок 7.2– Определение ненасыщенного значения синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси

Нагрузочная характеристика

Нагрузочной характеристикой называется зависимость $U = f(I_{\epsilon})$ при $n = n_1 = const$, $I = const$, $\cos \varphi = const$.

Индукционная нагрузочная характеристика снимается по схеме, приведенной на рис. 7.1, при работе генератора на другую синхронную машину или на реактивную катушку с переменной индуктивностью. Удовлетворительные результаты получаются, если коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi \leq 0,2$. При снятии характеристики плавно увеличивают ток возбуждения машины. Значение коэффициента мощности подсчитывают по формуле:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI}. \quad (7.5)$$

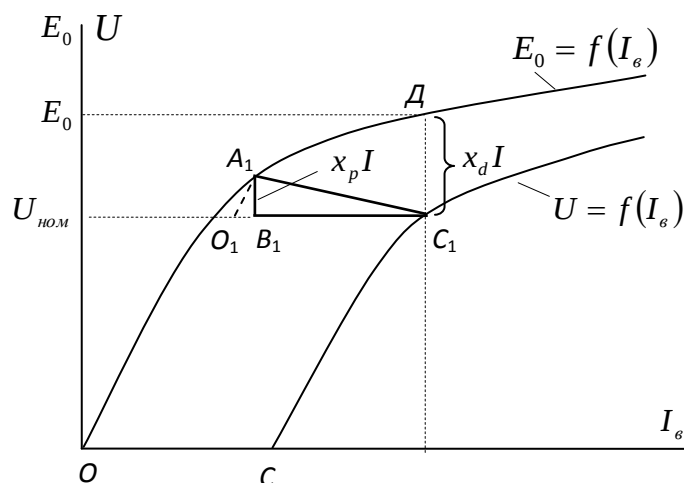


Рисунок 7.3– Построение реактивного треугольника

В одной системе координат строят характеристику холостого хода и индукционную нагрузочную характеристику (рис. 7.3).

Положение точки C определяется из характеристики короткого замыкания (рис. 7.2) по току, для которого снималась индукционная нагрузочная характеристика, т.е. $I = I_k = \text{const}$.

Через точку C_1 , соответствующую номинальному напряжению $U_{\text{ном}}$, проводят линию, параллельную оси абсцисс и откладывают на ней отрезок $O_1C_1 = OC$. Прямая, параллельная начальному участку характеристики холостого хода, проведенная из точки O_1 , определяет положение точки A_1 . Опустив перпендикуляр A_1B_1 на отрезок O_1C_1 , получим реактивный треугольник $A_1B_1C_1$. Поскольку реакция якоря при чисто индуктивной нагрузке является продольной размагничивающей, то отрезок DC_1 пропорционален насыщенному значению синхронного индуктивного сопротивления x_d , а искомое сопротивление равно:

$$x_d = \frac{E_0 - U}{I}. \quad (7.6)$$

Сторона реактивного треугольника A_1B_1 в масштабе напряжения представляет собой падение напряжения на расчетном индуктивном сопротивлении рассеяния (сопротивлении Потье) обмотки якоря $x_p I$.

Для явнополюсных машин индуктивное сопротивление рассеяния якоря равно:

$$x_\sigma = \frac{x_p}{1,1 \div 1,3}. \quad (7.7)$$

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицы 7.3 и 7.4.

Таблица 7.3

№	Из м е р е н и я									
	$I_{\epsilon},$ A	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$I_1,$ A	$I_2,$ A	$I_3,$ A	$f_1,$ $Гц$	$P',$ $Вт$	$P'',$ $Вт$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Таблица 7.4

№	В ы ч и с л е н и я							
	$U_{\lambda},$ B	$U_{\phi},$ B	$I,$ A	$P,$ $Вт$	$\cos \varphi$	$x_d,$ $Ом$	$x_p,$ $Ом$	$x_{\sigma},$ $Ом$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Внешние характеристики

Внешней характеристикой генератора называется зависимость $U = f(I)$ при $n = n_1 = const$, $I_{\epsilon} = const$, $\cos \varphi = const$.

Изменение нагрузки сопровождается изменением напряжения генератора. Это обусловлено реакцией якоря, падением напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния и активном сопротивлении обмотки якоря.

При активно индуктивном характере нагрузки (отстающем токе) появляется продольная размагничивающая составляющая реакции якоря. Причем, чем меньше коэффициент мощности $\cos \varphi < 1$ (индуктивный), тем больше снижается напряжение. При активно–емкостном характере нагрузки продольная составляющая реакции якоря является намагничивающей. Напряжение с ростом нагрузки возрастает, достигает некоторого максимума, а затем начинает снижаться. Это снижение обусловлено насыщением генератора, которое ограничивает намагничивающее действие реакции якоря, и увеличением падения напряжения на сопротивлениях обмотки якоря $(r + jx_{\sigma})I$.

Внешние характеристики могут строиться как при увеличении нагрузки, так и при её уменьшении.

В первом случае при работе генератора на холостом ходу ($I = 0$) устанавливают такой ток возбуждения $I_{\epsilon} = const$, при котором $U = E_0 = U_{ном}$.

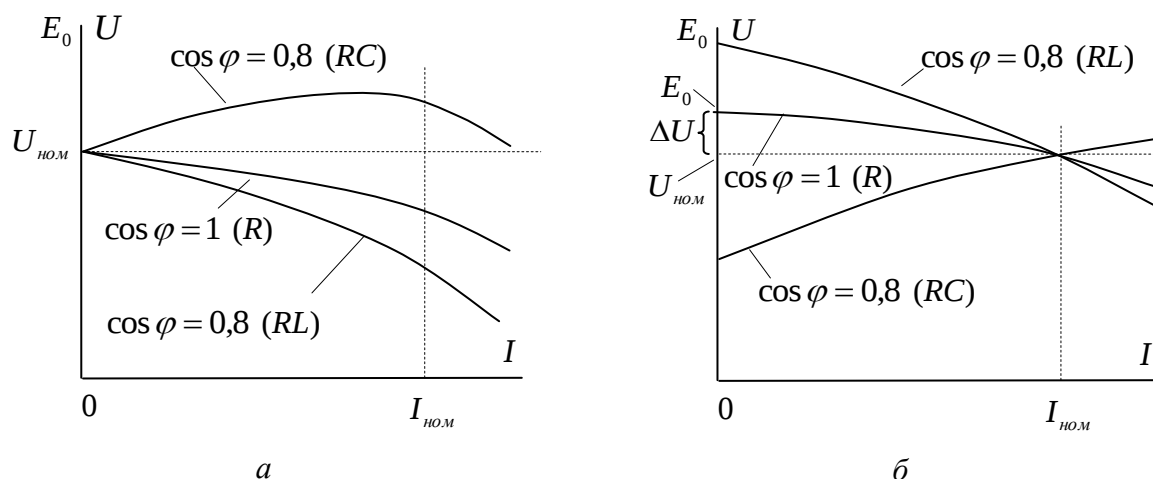


Рисунок 7.4. Внешние характеристики синхронного генератора:

a – при увеличении нагрузки с точки $U = U_{ном}$, $I = 0$;

б – при уменьшении нагрузки с точки $U = U_{ном}$, $I = I_{ном}$

Увеличивают нагрузку генератора от нуля до номинального значения и снимают показания приборов (рис. 7.4, *a*).

Во втором случае снятие характеристики начинают с точки $U = U_{ном}$, $I = I_{ном}$. При этом ток возбуждения поддерживают неизменным, а нагрузку плавно уменьшают до нуля (рис. 7.4, *б*).

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 7.5 и 7.6. Строят внешние характеристики и определяют процентное повышение напряжения при сбросе нагрузки (рис. 7.4, *б*):

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_{ном}}{U_{ном}}. \quad (1.8)$$

Таблица 7.5

№	Из м е р е н и я									
	$I_{\phi},$ <i>A</i>	$U_{ab},$ <i>B</i>	$U_{bc},$ <i>B</i>	$U_{ca},$ <i>B</i>	$I_1,$ <i>A</i>	$I_2,$ <i>A</i>	$I_3,$ <i>A</i>	$f_1,$ <i>Гц</i>	$P',$ <i>Bm</i>	$P'',$ <i>Bm</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Таблица 7.6

№	В ы ч и с л е н и я				
	$U_{\phi},$ <i>B</i>	$I,$ <i>A</i>	$P,$ <i>Bm</i>	$\cos \varphi$	$\Delta U,$ <i>о.е.</i>
1	2	3	4	5	6

Регулировочные характеристики

Регулировочной характеристикой называется зависимость $I_{\phi} = f(I)$ при $U = U_{ном} = const$, $n = n_1 = const$, $\cos \varphi = const$.

По регулировочной характеристике можно судить о том, как следует регулировать ток возбуждения при изменении нагрузки для поддержания неизменным напряжения генератора. Эта характеристика позволяет судить о диапазоне изменения тока возбуждения, что важно для выбора

соответствующей аппаратуры, предназначенной для регулирования (стабилизации) напряжения генератора.

Регулировочные характеристики снимаются по схеме, приведенной на рис. 7.1. В режиме холостого хода устанавливают ток возбуждения, при котором $E_0 = U_{ном}$. Плавно увеличивают ток возбуждения и ток нагрузки. При этом поддерживают неизменным значение напряжения. Необходимо иметь в виду, что регулирование тока возбуждения производят только в одном направлении, например, в сторону его увеличения.

По полученным данным строят регулировочные характеристики.

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 7.7.

Таблица 7.7

№	Из м е р е н и я											Вычислени я	
	$I_g,$ A	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$I_1,$ A	$I_2,$ A	$I_3,$ A	$P',$ Bm	$P'',$ Bm	$\cos \varphi$	$f_1,$ $Гц$	I	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Отчет должен содержать:

1. Номинальные данные исследуемого генератора;
2. Схемы проведения опытов;
3. Таблицы измерений и вычислений;
4. Использованные формулы;
5. Характеристики генератора.

Контрольные вопросы

1. Какова конструкция явнополюсного и неявнополюсного синхронного генератора?
2. Объясните принцип работы синхронного генератора.
3. Что такое реакция якоря и как она влияет на работу генератора?
4. Можно ли регулировать напряжение автономного синхронного генератора изменением частоты вращения?
5. Почему внешние характеристики генератора, снятые при различном характере нагрузки, не совпадают?
6. Как поддержать неизменным напряжение синхронного генератора при изменении величины и характера нагрузки?
7. Какие системы возбуждения применяются для синхронных машин?
8. Почему характеристика короткого замыкания СГ является линейной?

Работа № 8. Исследование параллельной работы синхронного генератора с сетью

Цель работы

Целью работы является: ознакомление с методами синхронизации и включение генератора на параллельную работу с сетью; регулирование активной и реактивной мощностей, построение угловой и U – образных характеристик синхронного генератора.

Методы синхронизации при включении генератора на параллельную работу с сетью

Точная синхронизация генератора при его включении на параллельную работу с сетью (или с другим синхронным генератором) возможна при совпадении чередования фаз генератора и сети, при совпадении их частот и действующих значений напряжений, а также при совпадении их фаз относительно нагрузки:¹

1. $U_{A.CM} \Rightarrow U_{B.CM} \Rightarrow U_{C.CM}; U_{A.c} \Rightarrow U_{B.c} \Rightarrow U_{C.c};$
2. $f_{CM} = f_c;$
3. $\dot{U}_{CM} = \dot{U}_c$, при этом $\Delta \dot{U} = \dot{U}_{CM} - \dot{U}_c = 0.$

Выполнение условий точной синхронизации проверяется с помощью синхроскопа. Простейший синхроскоп – ламповый. Он состоит из трех ламп накаливания, которые могут быть включены по двум схемам: на «вращение» или на «погасание» света.

При использовании синхроскопа на «вращение» света (рис. 8.1) условия точной синхронизации соблюдаются, если лампа L_3 не горит, а лампы L_1 и L_2 горят с одинаковой яркостью. При несоблюдении условий синхронизации лампы поочередно загораются, создавая эффект вращения света. Скорость и направление вращения света можно изменять с помощью приводного двигателя. В данном случае с помощью двигателя постоянного тока (ДПТ).

По мере приближения частоты ЭДС генератора к частоте сети скорость вращения света уменьшается.

¹ В некоторых учебниках фазы напряжений генератора и сети рассматриваются не относительно нагрузки, а относительно друг друга. Естественно, что в этом случае напряжения находятся в противофазе. Такой подход, с одной стороны, позволяет более наглядно раскрыть вопросы, связанные с регулированием реактивной мощности, однако, с другой, затрудняет понимание процессов, связанных с синхронизацией генератора с сетью и работой синхроскопа.

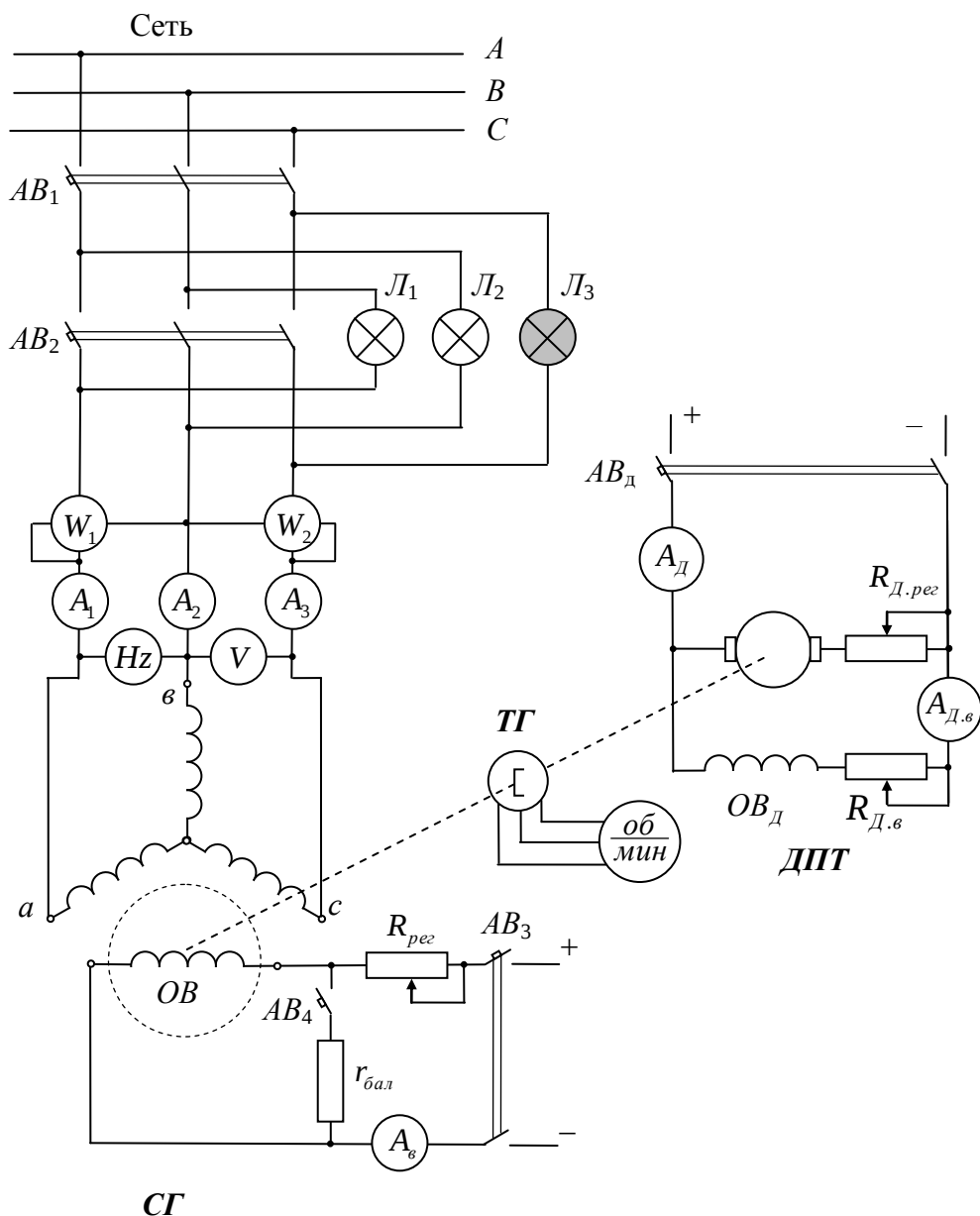
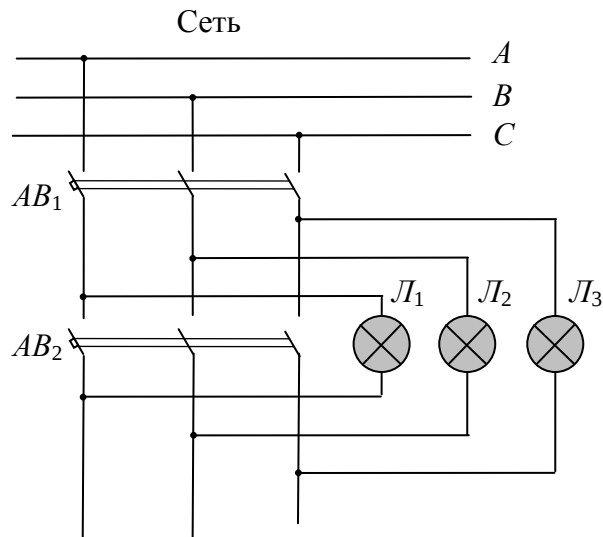


Рисунок 8.1. Схема включения трехфазного синхронного генератора на параллельную работу с сетью

В синхроскопе с «погасанием» света каждая лампа включается в разрыв определенной фазы (рис. 8.2). Условия точной синхронизации выполняются, если все три лампы не горят. При невыполнении условий синхронизации лампы вспыхивают и гаснут. Путем изменения частоты вращения приводного двигателя, который вращает ротор синхронного генератора, добиваются уменьшения частоты, с которой вспыхивают и гаснут лампы синхроскопа.



К синхронному генератору

Рисунок 8.2. Соединения ламп синхроскопа по схеме «погасание» света

Возможен случай, когда лампы, включенные по схеме на «погасание», создают эффект вращения света, и наоборот, включенные по схеме на «вращение» света одновременно гаснут и загораются. Такое явление обусловлено тем, что чередование фаз генератора отличается от чередования фаз сети. В этом случае необходимо поменять местами две любые фазы генератора или сети.

Для подключения исследуемого генератора к сети запускают приводной двигатель (ДПТ), который вращает ротор синхронного генератора. Частоту вращения ротора контролируют с помощью тахогенератора (ТГ) и доводят её до номинального значения $n = n_{ном}$. Плавное увеличивают ток возбуждения генератора и устанавливают ЭДС генератора равную напряжению сети, т.е. $E_0 = U_c$. Включают автоматический выключатель AB_1 . Плавное изменяют скорость приводного двигателя и наблюдают за поведением ламп синхроскопа. Когда условия точной синхронизации начинают соблюдаться, включают AB_2 , и генератор начинает работать параллельно с сетью.

При грубой синхронизации (самосинхронизации) генератор подключают к сети в невозбужденном состоянии при скорости ротора близкой к синхронной. При этом обмотку возбуждения генератора замыкают на балластное сопротивление $r_{бал} = (4...6)r_e$ для предотвращения возникновения перенапряжений (r_e – сопротивление обмотки возбуждения). После подключения генератора к сети обмотку возбуждения с помощью автоматических выключателей AB_4 и AB_3 переключают с балластного сопротивления $r_{бал}$ на источник постоянного тока и плавное увеличивают ток возбуждения. При этом генератор втягивается в синхронизм и работает параллельно с сетью. Следует подчеркнуть, что грубая синхронизация, как и точная, возможна только при совпадении чередования фаз генератора и сети.

Регулирование активной мощности генератора

Синхронный генератор является электромеханическим преобразователем энергии, поэтому активную мощность генератора P_2 (электрическую), которую он отдает в сеть, регулируют посредством изменения механической мощности, подводимой к валу машины $P_1 = M\omega$.

При параллельной работе генератора с сетью угловая скорость ротора в установившемся режиме остается неизменной $\omega = \text{const}$. Следовательно, регулирование P_1 и P_2 , возможно только путем изменения вращающего момента M на валу генератора, т.е. за счет первичного двигателя. Например, в ТЭС и АЭС это достигается путем изменения количества пара, поступающего на паровую турбину, а в ГЭС – за счет изменения количества воды, подаваемого на гидротурбину.

Исследуемый генератор подключают к сети. Изменяют момент первичного двигателя и ток возбуждения генератора I_e , добиваясь режима, при котором ток якоря равен $I = 0$. Этот режим является режимом холостого хода генератора. Ток возбуждения в дальнейшем не изменяют $I_e = \text{const}$.

Плавно увеличивают момент на валу приводного двигателя и фиксируют показания приборов от $I = 0$ до $I = I_{\text{ном}}$.

Данные измерений и вычислений заносят в таблицы 8.1 и 8.2.

Таблица 8.1

№	Из м е р е н и я										
	$I_e,$ A	$n,$ об/мин	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$I_1,$ A	$I_2,$ A	$I_3,$ A	$f_1,$ Гц	$P',$ Вт	$P'',$ Вт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Таблица 8.2

№	В ы ч и с л е н и я								
	$U,$ B	$I,$ A	$P,$ Bm	$S,$ BA	$Q,$ BAp	$\theta,$ $град$	$\cos \varphi$	$P_{\max},$ Bm	k_n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Формулы для справки (соединение обмотки статора – звезда):

$$P_{\kappa} = P' \pm P''; \quad U_1 = \frac{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}{3\sqrt{3}}; \quad I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}; \quad S = 3U_1 I; \quad Q = \sqrt{S^2 - P^2};$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

Угловая характеристика активной мощности и электромагнитного момента

Электромагнитная мощность синхронного генератора $P_{\text{эм}}$ зависит от угла нагрузки θ , т.е. угла между векторами ЭДС $\dot{E}_0$ и напряжения $\dot{U}$.

Зависимость $P_{эм} = f(\theta)$ при $E_0 = const$ и $U = const$ называется угловой характеристикой электромагнитной мощности, а зависимость $M = f(\theta)$ – угловой характеристикой электромагнитного момента синхронной машины. Если пренебречь потерями, которые в крупных машинах относительно малы, то мощность на выходе генератора P_2 будет равна электромагнитной мощности $P_{эм}$. В этом случае зависимость $P_2 \approx P_{эм} = f(\theta)$ называют угловой характеристикой активной мощности генератора.

Уравнение угловой характеристики активной (электромагнитной) мощности явнополюсного генератора имеет следующий вид:

$$P_2 \approx P_{эм} = \underbrace{\frac{mE_0U}{x_d} \sin \theta}_I + \underbrace{\frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta}_{II}, \quad (8.1)$$

где m – число фаз; x_d – насыщенное значение синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси; x_q – синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси.

В свою очередь, используя уравнение (8.1) можно рассчитать и электромагнитный момент генератора, поскольку $M = P_{эм}/\omega$, где ω – угловая синхронная скорость вращения ротора

Угловая характеристика генератора представлена на рис. 8.3. Первая (I) составляющая уравнения (8.1) называется основной составляющей, вторая (II) – реактивной составляющей.

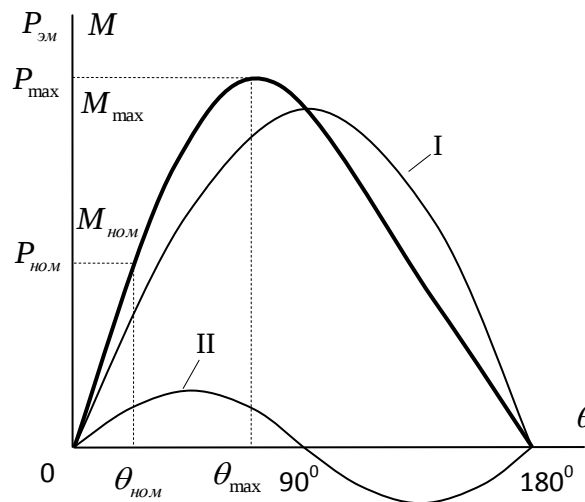


Рисунок 8.3. Угловая характеристика электромагнитной мощности и момента

В общем случае насыщение магнитной системы машины при изменении нагрузки также изменяется, т.е. величина x_d зависит от нагрузки.

Однако, если не учитывать изменение x_d и использовать его ненасыщенное значение $x_{d\infty}$, то расчет угловой характеристики значительно

упрощается. Следует отметить, что сопротивление x_q практически не зависит от нагрузки.

Для определения ненасыщенных значений синхронных индуктивных сопротивлений x_d и x_q проводят экспериментальные исследования методом малого скольжения.

Ротор синхронной машины вращают с небольшим скольжением по отношению к полю. Обмотка возбуждения $ОВ$ разомкнута (рис. 8.1). При $U = const$ ток в фазе статора изменяется от $I_{\max} = \frac{U}{x_q}$ до $I_{\min} = \frac{U}{x_d}$. Из этих выражений определяем x_q и x_d . Подводимое напряжение равно $U \approx 0,25U_{ном}$.

При построении угловой характеристики (рис. 8.3) угол нагрузки θ изменяют от 0° до 180° с шагом $10^\circ \dots 15^\circ$. По угловой характеристике определяют максимальную мощность $P_{\max}$ генератора при данном значении ЭДС E_0 . По экспериментальным данным электрической мощности P находим соответствующие углы нагрузки (рис. 8.3) и заносим их значения в таблицу 8.2.

Рассчитываем перегрузочную способность (статическую перегружаемость) синхронной машины и коэффициент запаса статической устойчивости при номинальной нагрузке:

$$k_{пер} = \frac{P_{\max}}{P_{ном}}; \quad (8.2)$$

$$k_{зан} = \frac{(P_{\max} - P_{ном})}{P_{ном}}. \quad (8.3)$$

Регулирование реактивной мощности и U – образные характеристики генератора

Регулирование реактивной мощности генератора Q при неизменной активной мощности $P = const$ производится путем изменения тока возбуждения I_ϵ . При этом активная составляющая тока якоря I_a , соответствующая заданному моменту, остается неизменной

$$I_a = I \cos \varphi = \frac{P}{mU} = \frac{M\omega}{mU} = const. \quad (8.4)$$

Ток якоря, который можно представить в виде $\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_p$, изменяется только за счет реактивной составляющей

$$I_p = I \sin \varphi = \frac{Q}{mU} = var. \quad (8.5)$$

Для оценки изменения тока якоря при изменении тока возбуждения используют так называемые U – образные характеристики, которые представляют собой зависимость тока якоря от тока возбуждения $I = f(I_\epsilon)$

при неизменной активной мощности $P = const$, напряжении $U = const$ и частоте сети $f_1 = const$ (рис. 8.4).

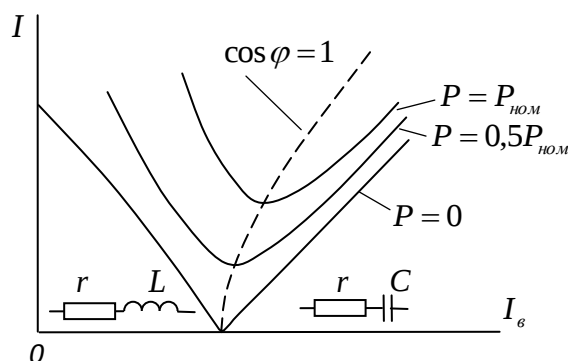


Рисунок 8.4. U – образные характеристики генератора

Для снятия U – образных характеристик включают генератор на параллельную работу. При неизменной активной мощности генератора, например, $P = 0$, плавно увеличивают ток возбуждения от нуля до некоторого значения, при котором $I = I_{ном}$, и снимают показания приборов. Затем с помощью приводного двигателя увеличивают активную мощность генератора, например, до $P = 0,5P_{ном}$. Плавно увеличивают ток возбуждения и снимают показания приборов.

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицы 8.3 и 8.4. и строят U – образные характеристики генератора.

Таблица 8.3

№	Из м е р е н и я								
	$I_g,$ A	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$I_1,$ A	$I_2,$ A	$I_3,$ A	$P',$ Bm	$P'',$ Bm
1	2		4	5	6	7	8	9	10

Таблица 8.4

№	В ы ч и с л е н и я					
	$U,$ B	$I,$ A	$P,$ Bm	$S,$ BA	$Q,$ BAp	$\cos \varphi$
1	2	3	4	5	6	7

Отчет должен содержать:

1. Номинальные данные исследуемого генератора;
2. Схемы проведения опытов;
3. Таблицы измерений и вычислений;
4. Используемые формулы;
5. Угловую характеристику генератора;
6. U – образные характеристики генератора.

Контрольные вопросы

1. Назовите два способа синхронизации и поясните, когда они применяются.
2. Назовите условия точной синхронизации.
3. Объясните назначение синхроскопа.
4. Назовите условия грубой синхронизации (самосинхронизации) и поясните необходимость выполнения этих условий.
5. От чего зависит значение максимальной электромагнитной мощности генератора?
6. Как увеличить активную мощность синхронного генератора, который работает параллельно с сетью?
7. Что такое перегрузочная способность синхронной машины или коэффициент статической перегружаемости?
8. Как изменить характер реактивной мощности синхронного генератора, который работает параллельно с сетью?
9. Как перевести синхронный генератор в режим синхронного двигателя?
10. Покажите на угловой характеристике область устойчивой работы синхронного генератора.
11. Как перевести синхронный двигатель в режим источника реактивной мощности?
12. Конструкция и назначение синхронного компенсатора.

Работа № 9. Исследование генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Цель работы

Целью работы является ознакомление с конструкцией генератора и снятие следующих характеристик: холостого хода; внешней; регулировочной; нагрузочной; короткого замыкания.

Измерение сопротивлений обмоток генератора

Измерение сопротивлений обмоток производят перед началом испытаний, когда температура обмоток не отличается от температуры окружающей среды. Сопротивления измеряют с помощью омметра или методом амперметра и вольтметра. По схеме рис. 9.1,а определяют сопротивление цепи якоря $R_{a.oc}$ (индекс от англ. *armature*) с учетом сопротивлений последовательно соединенных обмоток и переходного сопротивления щеточного контакта:

$$R_{a.oc} = \frac{U}{I} = r_{оя} + r_{ко} + r_{одп} + r_{нов} + r_{щ}, \quad (9.1)$$

где $r_{оя}$ – обмотка якоря; $r_{ко}$ – компенсационная обмотка; $r_{одп}$ – обмотка добавочных полюсов; $r_{нов}$ – последовательная обмотка возбуждения; $r_{щ} = \Delta U_{щ} / I$ – переходное сопротивление щеточного контакта; $\Delta U_{щ} \approx 2 B$ – переходное падение напряжения на пару электрографитовых щеток.

Ток якоря поддерживается при этом в пределах 10...20 % от номинального.

Измерение сопротивления якорной цепи производится по схеме, представленной на рис. 9.1,а. Если сопротивление обмотки возбуждения имеет небольшое значение, то оно определяется по схеме рис. 9.1,б, в противном случае – по рис. 9.1,в.

По результатам трех-четырех замеров определяют среднее значение сопротивления $R_{a.oc.cp}$ при температуре окружающей среды t_{oc} , которое затем приводится к рабочей температуре t по формуле:

$$R_a = R_{a.oc.cp} [1 + \alpha(t - t_{oc})], \quad (9.2)$$

где α – температурный коэффициент (для меди $\alpha = 0,004$).

Аналогично приводится к рабочей температуре сопротивление параллельной обмотки возбуждения R_g .

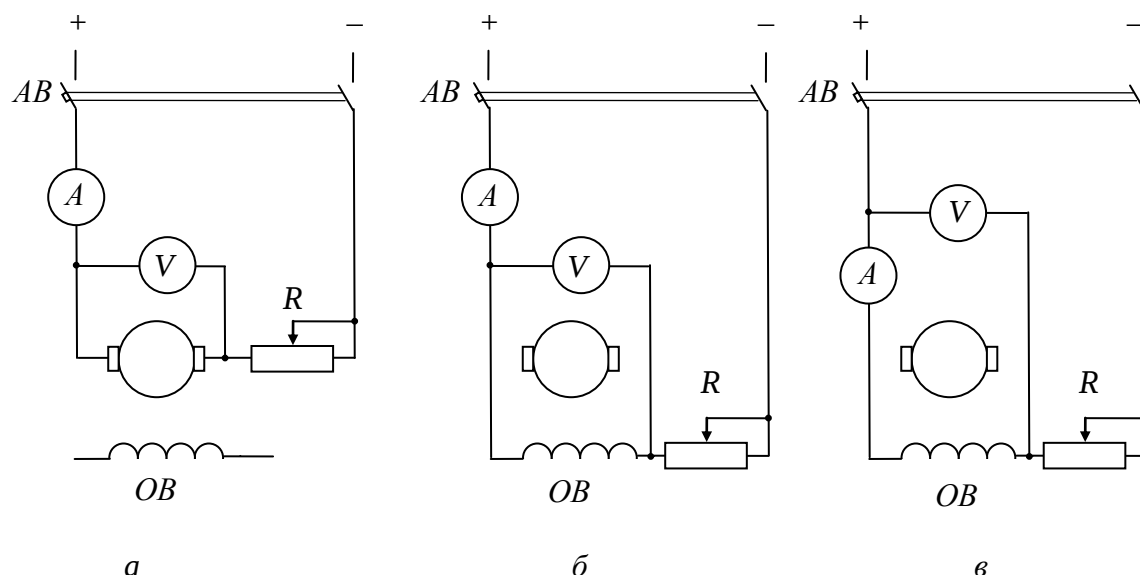


Рисунок 9.1. Схемы измерения сопротивлений

Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу 9.1.

Таблица 9.1

№	Измерения		Вычисления			Измерения		Вычисления		
	U, B	I_a, A	$R_{a0}, Ом$	$R_{a0cp}, Ом$	$R_a, Ом$	U, B	I_{ϵ}, A	$R_{\epsilon0}, Ом$	$R_{\epsilon0cp}, Ом$	$R_{\epsilon}, Ом$
1	2		4	5	6	7	8	9	10	11

Характеристика холостого хода

Характеристикой холостого хода генератора параллельного возбуждения называется зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения при постоянной (номинальной) частоте вращения якоря и отсутствии нагрузки:

$$E_0 = f(I_{\epsilon}) \text{ при } n = n_{ном} = const \text{ и } I = 0.$$

При работе генератора параллельного возбуждения в режиме холостого хода ток нагрузки равен нулю ($I = 0$), а ток якоря равен току возбуждения ($I_a = I_{\epsilon}$). В этом случае, пренебрегая реакцией якоря, т.к. $I_{\epsilon} \ll I_{ном}$, можно считать, что ЭДС генератора равна:

$$E_0 = U_0 + R_a I_{\epsilon}, \quad (9.3)$$

где U_0 – напряжение генератора в режиме холостого хода.

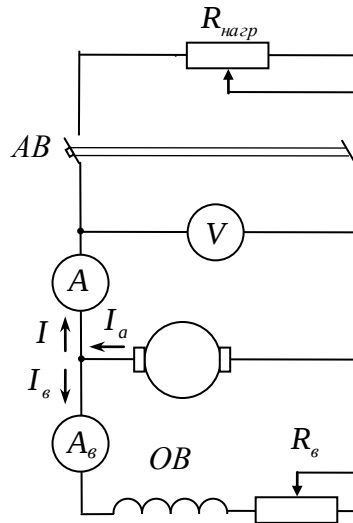


Рисунок 9.2. Схема генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Следует отметить, что у ГПТ независимого возбуждения $E_0 = U_0$, т.к. в режиме холостого хода у него $I_a = 0$.

Схема генератора представлена рис. 9.2. Первый замер выполняется при разомкнутой обмотке возбуждения. Затем, замкнув цепь, увеличивают ток возбуждения, пока напряжение не достигнет значения $(1,2...1,25)U_{ном}$. После этого уменьшают ток возбуждения и снимают показания приборов.

Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения располагается в первом квадранте и имеет две ветви: восходящую 1 и нисходящую 2 (рис. 9.3).

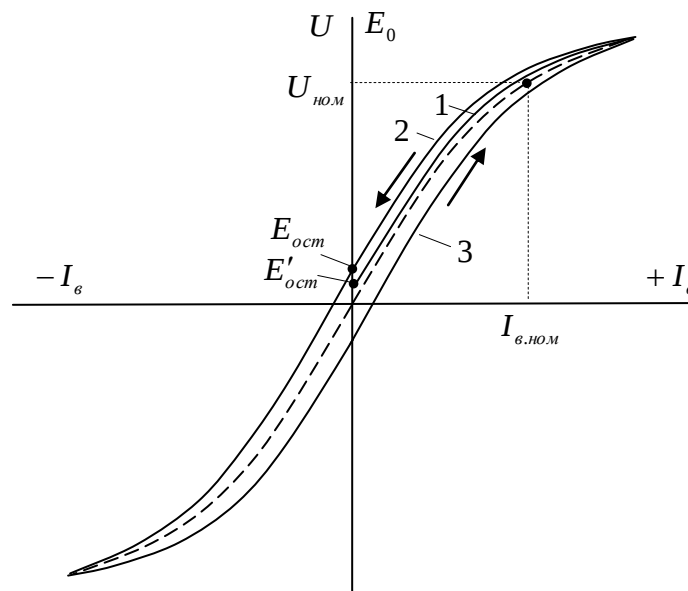


Рисунок 9.3. Характеристики холостого хода генераторов параллельного и независимого возбуждения

Нисходящая ветвь, вследствие возросшего остаточного потока, проходит несколько выше восходящей $E_{ост} > E'_{ост}$.

Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения проходит через все квадранты, поскольку в таком генераторе можно изменить направление тока в обмотке возбуждения (кривые 2 и 3). Следует отметить, что в третьем квадранте ветвь 2 является восходящей, а 3 – нисходящей. Кривая 2 совместно с кривой 3 образуют гистерезисную петлю, определяющую свойства магнитной системы генератора.

За расчетную характеристику холостого хода принимают среднюю линию между ветвями, проходящую через начало координат (показано пунктиром). Точка номинального напряжения обычно лежит на колене расчетной кривой.

Данные измерений и вычислений заносят в таблицу 9.2 и строят характеристику холостого хода.

Таблица 9.2

№	Восходящая ветвь			Нисходящая ветвь		
	Измерения		Вычисления	Измерения		Вычисления
	$I_e,$ A	$U_0,$ B	$E_0,$ B	$I_e,$ A	$U_0,$ B	$E_0,$ B
1	2	3	4	5	6	7

Внешняя характеристика

Внешней характеристикой ГПТ параллельного возбуждения называется зависимость напряжения генератора от тока нагрузки при постоянном сопротивлении цепи возбуждения и номинальной частоте вращения: $U = f(I)$ при $R_e = const$ и $n = n_{ном} = const$.

Снятие внешней характеристики возможно:

1. при таком неизменном сопротивлении цепи возбуждения, при котором напряжение холостого хода равно номинальному;
2. при таком неизменном сопротивлении цепи возбуждения, при котором ток нагрузки и напряжение равны номинальным значениям.

Для определения номинального изменения напряжения при сбросе нагрузки и неизменном сопротивлении цепи возбуждения используют следующее выражение (рис. 9.4):

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}}, \quad (9.4)$$

где U_0 – напряжение на холостом ходу после сброса номинальной нагрузки.

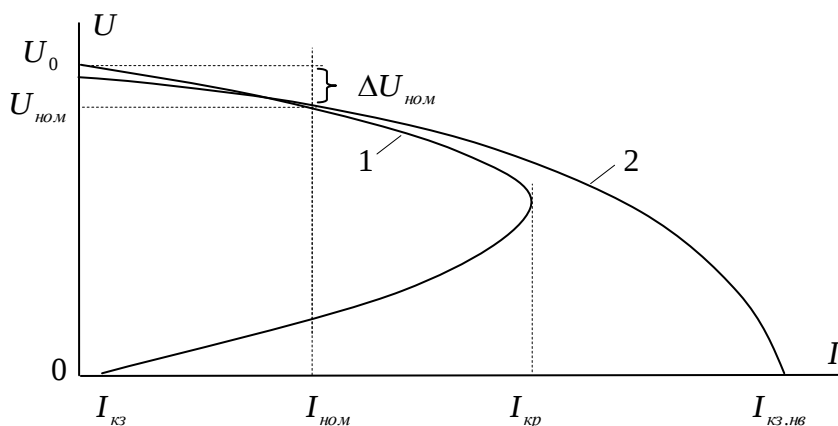


Рисунок 9.4. Внешние характеристики генераторов:

1 – параллельного возбуждения; 2 – независимого возбуждения

При уменьшении сопротивления нагрузки напряжение генератора уменьшается (кривая 1, рис. 9.4). Последнее объясняется следующими причинами: увеличением внутреннего падения напряжения $R_a I_a$; увеличением размагничивающего действия реакции якоря; уменьшением тока возбуждения при снижении напряжения вследствие первых двух причин. Ток нагрузки при этом возрастает до определенного критического значения $I_{кр}$. Дальнейшее уменьшение сопротивления приводит к уменьшению тока, т.к. генератор теряет возбуждение. Когда сопротивление нагрузки $R_{нагр} = 0$, т.е. при коротком замыкании в обмотке якоря протекает ток, обусловленный остаточной ЭДС.

ГПТ независимого возбуждения имеет более жесткую внешнюю характеристику (кривая 2) и больший ток короткого замыкания $I_{кз.нв}$ по сравнению с ГПТ параллельного возбуждения (кривая 1). Это объясняется тем, что в ГПТ независимого возбуждения ток возбуждения не зависит от сопротивления нагрузки, т.е. $I_e = const$.

Потери и КПД генератора

Получаемая от первичного двигателя механическая мощность P_1 за вычетом механических потерь $\Delta P_{мех}$, магнитных потерь $\Delta P_{магн}$, добавочных потерь $\Delta P_{доб}$, потерь в якорной цепи $\Delta P_{эл} = I^2 R_a$ и потерь на возбуждение $\Delta P_e = I_e^2 R_e$, преобразуется в электрическую мощность P_2 (рис. 9.5).

Уравнения мощностей имеют следующий вид:

$$P_1 = P_2 + \Sigma \Delta P = UI + \Delta P_e + \Delta P_{эл} + \Delta P_{доб} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех}; \quad (9.5)$$

$$P_1 = P_{эм} + \Delta P_{доб} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех}; \quad (9.6)$$

$$P_2 = P_{эм} - \Delta P_{эл} - \Delta P_e, \quad (9.7)$$

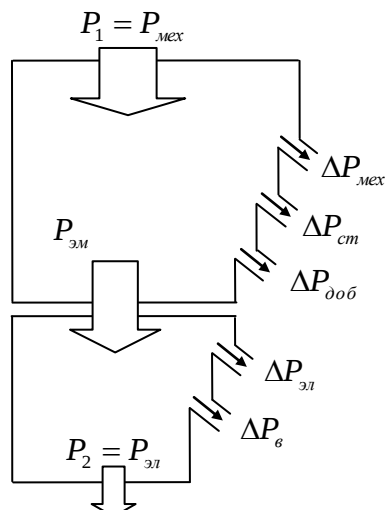


Рисунок 9.5. Энергетическая диаграмма ГПТ
параллельного возбуждения

где $P_{эм} = EI_a$ – электромагнитная мощность; $\Delta P_{доб} = 0,01P_{2ном} (I/I_{ном})^2$ – добавочные потери некомпенсированного генератора.

Для определения постоянных потерь $\Delta P_{магн} + \Delta P_{мех}$, т.е. потерь, которые при $n = n_{ном} = const$ не зависят от нагрузки, вал генератора отсоединяют от вала приводного двигателя и подключают генератор к сети. Затем при $U = U_{ном}$ и $n = n_{ном}$ измеряют токи холостого хода I_x и возбуждения $I_в$. Рассчитывают ток якоря в режиме холостого хода $I_{а.х} = I_x - I_в$ и, сделав допущение о том, что в этом режиме $\Delta P_{доб} \approx 0$, находят постоянные потери при $U = U_{ном}$ и $n = n_{ном}$:

$$\begin{aligned} \Delta P_{магн.ном} + \Delta P_{мех.ном} &= P_x - \Delta P_в - \Delta P_a = \\ &= U_{ном} I_x - U_{ном} I_в - I_{а.х}^2 R_a = (U_{ном} - I_{а.х} R_a) I_{а.х} \end{aligned} \quad (9.8)$$

После этого восстанавливают механическое соединение вала генератора с валом приводного двигателя и проводят исследования. Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 9.3.

Таблица 9.3

№	Измерения				Вычисления					
	$U,$ B	$I,$ A	$I_в,$ A	$n = n_{ном},$ $об/мин$	$I_a,$ A	$E,$ B	$P_2,$ Bm	$P_1,$ Bm	η	$\Delta U_{ном}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Для справки: $E = U + I_a R_a$ – в генераторном режиме; $E = U - I_a R_a$ в двигательном режиме.

Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика ГПТ представляет собой зависимость тока возбуждения $I_в$ от тока нагрузки I при постоянном и номинальном

напряжении на зажимах генератора $U_{ном}$ и номинальной скорости вращения $n_{ном}$:

$$I_{\epsilon} = f(I) \text{ при } U = U_{ном} = const, n = n_{ном} = const.$$

По регулировочной характеристике можно судить о том, как необходимо изменять ток возбуждения с изменением нагрузки, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным.

Снятие характеристики производится следующим образом.

При холостом ходе и номинальной скорости вращения устанавливается ток возбуждения, при котором напряжение равно номинальному значению. Затем, поддерживая неизменной скорость, увеличивают нагрузку, производя такое регулирование тока возбуждения, при котором $U = U_{ном} = const$.

Полученные данные заносят в таблицу 9.4.

Таблица 9.4

№	Измерения			
	I, A	I_{ϵ}, A	$U = U_{ном}, B$	$n = n_{ном}, об/мин$
1	2	3	4	5

Нагрузочная характеристика

Зависимость напряжения от тока возбуждения при неизменной частоте вращения и неизменном токе нагрузки называется нагрузочной характеристикой:

$$U = f(I_{\epsilon}) \text{ при } I = const, n = n_{ном} = const.$$

Частным случаем нагрузочной характеристики является характеристика холостого хода, при которой $I = 0$.

Снятие нагрузочной характеристики производится следующим образом. На холостом ходу при $n = n_{ном} = const$ устанавливают напряжение несколько превышающее номинальное. Затем подключают нагрузку и, регулируя её сопротивление, устанавливают нужный ток из диапазона $(0,5...1)I_{ном}$. Далее, уменьшают сопротивление нагрузки и осуществляют такое уменьшение тока возбуждения, при котором ток нагрузки остается неизменным.

Данные измерений и вычислений заносят в таблицу 9.5.

Таблица 9.5

№	Измерения				Вычисления
	U, B	I, A	I_{ϵ}, A	$n = n_{ном}, об/мин$	E, B
1	2	3	4	5	6

В одних координатных осях строим расчетную характеристику холостого хода, нагрузочную характеристику и реактивный (характеристический) треугольник (рис. 9.5). Катет треугольника ab пропорционален падению напряжения в цепи якоря ($R_a I_a$), другой катет bc пропорционален размагничивающему действию реакции якоря (в масштабе тока якоря).

При неизменном токе возбуждения $I_e = I_{e.ном}$ переход от режима холостого хода $I = 0$ к работе с номинальной нагрузкой $I = I_{ном}$ сопровождается уменьшением ЭДС (отрезок $fd > bd$). Такое снижение ЭДС вызвано размагничивающим действием реакции якоря. С другой стороны, ЭДС на холостом ходу E_0 (отрезок cg) и под нагрузкой E (отрезок bd) могут быть равны, если компенсировать действие реакции якоря за счет увеличения тока возбуждения с I_{e0} до $I_{e.ном}$. Разность этих токов (отрезок $gd = cb$) представляет собой размагничивающую МДС реакции якоря, выраженную в масштабе тока возбуждения.

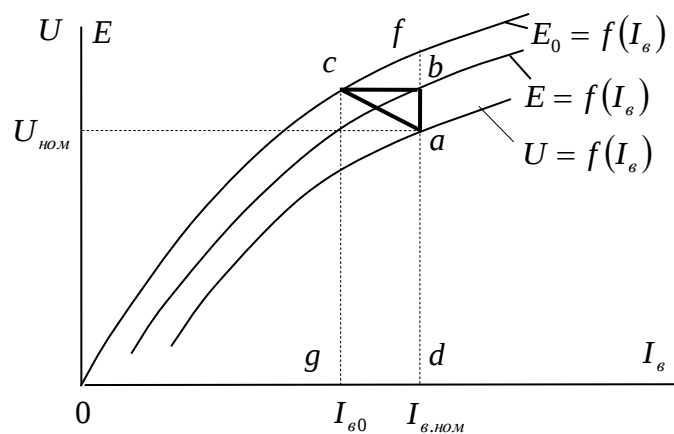


Рисунок 9.5. Нагрузочная характеристика и реактивный треугольник ГПТ

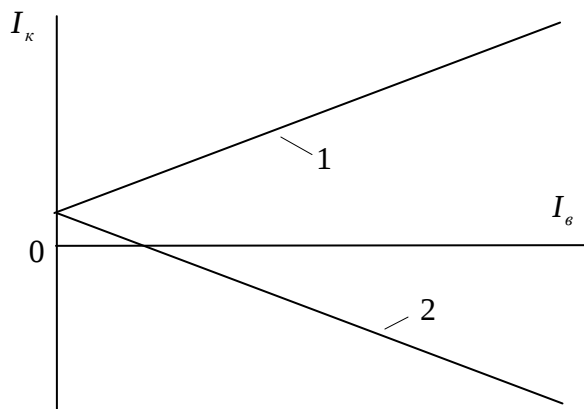


Рисунок 9.6. Характеристика короткого замыкания

Характеристика короткого замыкания

Характеристика короткого замыкания представляет собой зависимость тока короткого замыкания I_k (тока якоря) от тока возбуждения I_g при номинальной частоте вращения и напряжении на зажимах генератора, равном нулю:

$$I_k = f(I_g) \text{ при } n = n_{ном} = const \text{ и } U = 0.$$

Поскольку при коротком замыкании напряжение генератора равно нулю, то характеристика короткого замыкания может быть снята только при независимом возбуждении.

При проведении опыта короткого замыкания для ограничения тока якоря ($I_k \leq I_{ном}$) существенно снижают ток возбуждения ($I_g \ll I_{г.ном}$). В силу этого магнитная система генератора не насыщена, а характеристика короткого замыкания прямолинейна.

При снятии характеристики короткого замыкания магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, может совпадать по направлению с остаточным потоком или быть направленным против него. В первом случае при увеличении от нуля тока возбуждения ток якоря будет возрастать (кривая 1, рис. 9.6), а во втором – будет уменьшаться, пройдет нулевое значение, изменит свой знак и начнет увеличиваться (кривая 2).

Данные замеров заносят в таблицу 9.6.

Таблица 9.6

№	Измерения			
	$I_g,$ А	$I_a,$ А	$U,$ В	$n = n_{ном},$ об/мин
1	2	3	4	5

Отчет должен содержать:

1. Номинальные данные генератора и значения, полученные при измерении сопротивлений;
2. Схемы проведения опытов;
3. Таблицы измерений и вычислений;
4. Использованные формулы;
5. Характеристики: холостого хода; внешнюю; КПД; регулировочную; нагрузочную; короткого замыкания.

Контрольные вопросы

1. Принцип работы ГПТ.
2. Каково назначение коллектора в генераторе и двигателе?
3. Какие способы возбуждения применяются в ГПТ? Начертите соответствующие электрические схемы.
4. Почему ГПТ параллельного возбуждения имеет более мягкую внешнюю характеристику по сравнению с генератором независимого возбуждения?
5. Какие условия необходимы для самовозбуждения ГПТ?
6. Перечислите способы улучшения коммутации в машинах постоянного тока.

Работа № 10. Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Цель работы

Цель работы: закрепление сведений о свойствах двигателя параллельного возбуждения путем опытного получения его характеристик; сравнение возможных способов регулирования скорости вращения; знакомство со способами ограничения пускового тока.

Измерение сопротивлений обмоток

Сопротивления обмоток двигателя измеряются точно также как и генератора постоянного тока (см. лабораторную работу № 9).

Регулировочная характеристика

Регулировочной характеристикой называется зависимость тока возбуждения от тока якоря при номинальных значениях напряжения и скорости вращения:

$$I_g = f(I_a) \text{ при } U = U_{ном} = const \text{ и } n = n_{ном} = const.$$

Перед пуском исследуемого двигателя необходимо убедиться в том, что сопротивление регулировочного (пускового) реостата $R_{рег}$ (рис. 10.1) полностью введено, а сопротивление реостата в цепи обмотки возбуждения равно $R_g = 0$.

После разгона сопротивление $R_{рег}$ плавно уменьшают до нуля.

Регулировочные характеристики начинают снимать с режима холостого хода. Затем постепенно нагружают двигатель, а ток возбуждения двигателя с помощью реостата, включенного в цепь обмотки возбуждения R_g , уменьшают так, чтобы частота вращения якоря оставалась неизменной.

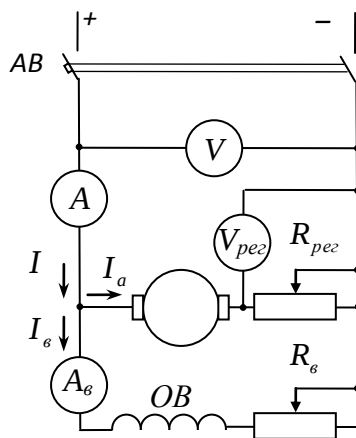


Рисунок 10.1– Схема двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Данные замеров заносят в таблицу 10.1.
Таблица 10.1

№	Измерения				Вычисления
	I , A	I_{ϵ} , A	$n = n_{ном}$, об/мин	U , B	I_a , A
1	2	3	4	5	6

По полученным данным строят регулировочную характеристику.

Потери и КПД

Часть потребляемой двигателем электрическая мощность $P_1 = UI$ идет на покрытие потерь в цепи обмотки возбуждения $\Delta P_{\epsilon} = UI_{\epsilon}$, потерь в цепи обмотки якоря $\Delta P_{эл} = I_a^2 R$. Здесь $R = R_a + R_{рег}$ – сопротивление цепи якоря с учетом регулировочного сопротивления. Оставшаяся часть преобразуется в механическую мощность, т.е. является электромагнитной мощностью $P_{эм} = P_1 - \Delta P_{\epsilon} - \Delta P_{эл}$. Разность электромагнитной (механической) мощности на валу $P_{эм}$ и потерь (магнитных $\Delta P_{магн}$, механических $\Delta P_{мех}$ и добавочных $\Delta P_{доб}$) представляет собой полезную механическую мощность на валу двигателя, т.е. $P_2 = P_{эм} - \Delta P_{магн} - \Delta P_{мех} - \Delta P_{доб}$ (Рис. 10.2).

Таким образом, электрическая мощность, потребляемая из сети, и полезная мощность на валу двигателя связаны следующим образом: $P_2 = P_1 - \Sigma \Delta P$, где $\Sigma \Delta P = \Delta P_{\epsilon} + \Delta P_{эл} + \Delta P_{магн} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}$ – сумма всех потерь в ДПТ.

КПД двигателя: $\eta = P_2 / P_1$.

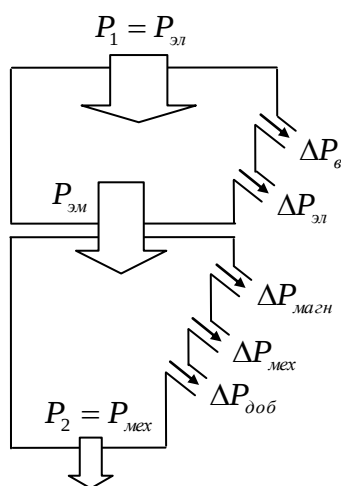


Рисунок 10.2. Энергетическая диаграмма ДПТ параллельного возбуждения

Значения потерь $\Delta P_{магн}$, $\Delta P_{мех}$ определяются в соответствии с методикой, которая была изложена в лабораторной работе № 9. Добавочные потери при работе некомпенсированной машины в двигательном режиме принимаются равными $\Delta P_{доб} = 0,01 P_{1ном} (I_a / I_{a.ном})^2 = 0,01 U_{ном} I_{ном} (I_a / I_{a.ном})^2$.

Электромагнитный и полезный моменты ДПТ

Электромагнитную мощность $P_{эм}$ можно представить как разность подводимой мощности и соответствующих потерь (рис. 10.2):

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_\delta - \Delta P_a. \quad (10.1)$$

На основе этого выражения и с учетом того, что в двигательном режиме $I = I_a + I_\delta$, а $E = U - I_a R$, определим электромагнитную мощность и электромагнитный момент двигателя:

$$\begin{aligned} P_{эм} &= P_1 - \Delta P_\delta - \Delta P_a = UI - UI_\delta - I_a^2 R = \\ &= U(I - I_\delta) - I_a^2 R = (U - I_a R)I_a = EI_a; \end{aligned} \quad (10.2)$$

$$M = M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega} = \frac{EI_a}{\omega}. \quad (10.3)$$

Здесь $R = R_a + R_{рег}$ – сопротивление якорной цепи с учетом регулировочного сопротивления, $\omega = 2\pi n/60$ – угловая скорость вращения, рад/с; n – частота вращения, об/мин.

С другой стороны электромагнитную мощность можно представить как сумму полезной механической мощности на валу P_2 и потерь в роторе:

$$P_{эм} = P_2 + \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}. \quad (10.4)$$

Поделив правую и левую части этого выражения на угловую скорость вращения, получим:

$$M = M_2 + \Delta M, \quad (10.5)$$

где $M = P_{эм}/\omega$ – электромагнитный момент машины; $M_2 = P_2/\omega$ – полезный механический момент на валу; $\Delta M = (\Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}})/\omega$ – момент, обусловленный магнитными, механическими и добавочными потерями.

Таким образом, электромагнитный момент M уравнивает момент нагрузки на валу $M_2 = M_{\text{нагр}}$, создаваемый рабочей машиной, и момент ΔM , обусловленный соответствующими потерями в роторе.

Следует отметить, что расчет электропривода обычно осуществляют относительно электромагнитного момента M . При этом момент ΔM прибавляют к моменту нагрузки при работе машины в двигательном режиме $M_c = M_{\text{нагр}} + \Delta M$ или вычитают, при работе в тормозном режиме $M_c = M_{\text{нагр}} - \Delta M$. При таком подходе $M = M_c$, где M_c – момент, который называют статическим моментом нагрузки (или приведенным моментом нагрузки или моментом сопротивления нагрузки).

Рассчитываем потери в роторе $(\Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}})$, момент, обусловленный этими потерями, и полезный момент на валу двигателя:

$$\Delta M = (\Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}})/\omega; \quad (10.6)$$

$$M_2 = M - \Delta M. \quad (10.7)$$

Более подробная информация об электромагнитном и полезном моментах, а также о статическом моменте нагрузки двигателей постоянного тока изложена в статье [11].

Рабочие характеристики

К рабочим характеристикам двигателя постоянного тока относятся зависимости $P_1 = f(P_2)$, $I = f(P_2)$, $n = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $M = f(P_2)$, $M_2 = f(P_2)$, при $U = U_{ном} = const$ и $I_{\epsilon} = I_{\epsilon.ном} = const$.

Электромеханическая и механическая характеристики

Зависимость угловой скорости ω (или частоты вращения n) от тока якоря I_a называется электромеханической характеристикой: $\omega = f(I_a)$ (или $n = f(I_a)$).

Зависимость угловой скорости ω (или частоты вращения n) от электромагнитного момента M называется механической характеристикой: $\omega = f(M)$ (или $n = f(M)$).

Эти характеристики называют естественными, если они получены при $U = U_{ном} = const$, $I_{\epsilon} = I_{\epsilon.ном} = const$ и $R_{pez} = 0$, в противном случае их называют искусственными.

Механическая характеристика двигателя в общем случае может иметь возрастающий или падающий характер. В первом случае с увеличением нагрузки преобладает размагничивающее влияние реакции якоря, а во втором – внутреннее падение напряжения, т.е. $R_a I_a$.

Работа двигателя устойчива только при падающей механической характеристике.

Для снятия электромеханической, механической и рабочих характеристик используют схему, представленную на рис. 4.1. Первый замер производят на холостом ходу. Затем увеличивают нагрузку на валу вплоть до номинального значения. Тормозной момент (нагрузку) на валу ДПТ создают с помощью ГПТ параллельного возбуждения.

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицы 10.2 и 10.3.

Таблица 10.2

№	Измерения					Вычисления			
	U , B	I , A	I_{ϵ} , A	$n = n_{ном}$, $об/мин$	U_{pez} , B	I_a , A	P_1 , Bm	P_{ϵ} , Bm	$P_{эл}$, Bm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Таблица 10.3

№	Вычисления									
	$P_{ст} + P_{мех}$, Bm	$P_{доб}$, Bm	ΣP , Bm	P_2 , Bm	η	ω , $рад/с$	$P_{эм}$, Bm	M , Hm	M_2 , Hm	ΔM , Hm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

На основе полученных данных строят рабочие характеристики.

Регулирование частоты вращения

ЭДС, электромагнитный момент и напряжение ДПТ можно выразить следующим образом:

$$E = k\Phi\omega; \quad (10.8)$$

$$M = k\Phi I_a; \quad (10.9)$$

$$U = E + I_a R. \quad (10.10)$$

Здесь $k = \frac{pN}{2\pi a}$ – конструктивный коэффициент машины; p – число пар полюсов; N – число проводников якоря; a – число параллельных ветвей; Φ – магнитный поток.

Совместное решение этих выражений позволяет получить уравнения электромеханической (скоростной) $\omega = f(I_a)$ и механической $\omega = f(M)$ характеристик машины постоянного тока:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_a R}{k\Phi} = \omega_0 - \Delta\omega; \quad (10.11)$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (10.12)$$

Здесь $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ и скорость идеального холостого хода, когда ток якоря $I_a = 0$;

$\Delta\omega = \frac{I_a R}{k\Phi} = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$ – изменение скорости, вызванное статическим моментом нагрузки механизма M_c . Следует отметить, что в установившемся режиме $M_c = M$.

Таким образом, скорости вращения ДПТ можно регулировать: изменением напряжения U ; изменением сопротивления цепи якоря $R = R_a + R_{рег}$; изменением потока возбуждения Φ .

Искусственные механические характеристики снимают: при $U < U_{ном}$, $I_{\phi} = I_{\phi.ном}$, $R_{рег} = 0$; при $R_{рег} > 0$, $U = U_{ном}$, $I_{\phi} = I_{\phi.ном}$; при $I_{\phi} < I_{\phi.ном}$, $U = U_{ном}$, $R_{рег} = 0$.

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицы 10.4 и 10.5.

Таблица 10.4

№	Измерения				
	$U,$ B	$I,$ A	$I_{\phi},$ A	$n = n_{ном},$ $об/мин$	$U_{рег},$ B
1	2	3	4	5	6

Таблица 10.5

№	Вычисления							
	$I_a,$ A	$P_1,$ Bm	$P_{\phi},$ Bm	$P_{эл},$ Bm	$P_{эм},$ Bm	$\omega,$ $рад/с$	$M,$ Hm	$R_{рег},$ $Ом$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Здесь $R_{рег} = U_{рег} / I_a$.

По данным таблицы 4.3 и таблицы 4.5 строят естественную и искусственные механические характеристики (рис. 10.3).

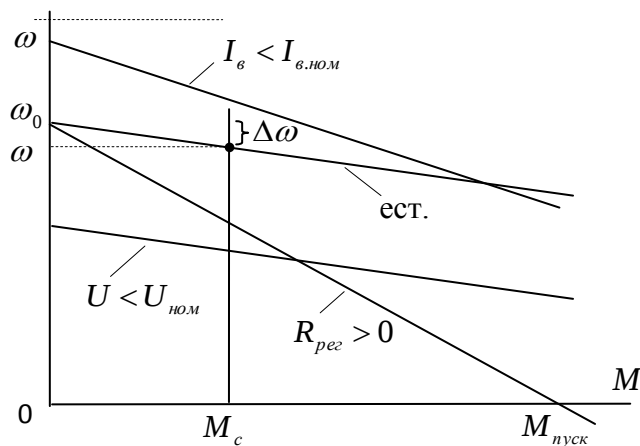


Рисунок 10.3– Механические характеристики ДПТ

Отчет должен содержать:

1. Номинальные данные двигателя и значения сопротивлений цепи якоря и возбуждения, полученные при измерении;
2. Схемы проведения опытов;
3. Таблицы измерений и вычислений;
4. Использованные формулы;
5. Характеристики: регулировочные; рабочие; механические.

Контрольные вопросы

1. Конструкция и принцип работы коллекторной машины постоянного тока.
2. Какие способы регулирования скорости вращения возможны в ДПТ параллельного возбуждения?
3. Почему при увеличении нагрузки ДПТ уменьшается скорость вращения?
4. Как изменить направление вращения ДПТ?
5. Какие способы ограничения пускового тока применяются в ДПТ?
6. Начертите механические характеристики ДПТ параллельного и последовательного возбуждения.
7. Какова разница в конструкции коллекторных двигателей постоянного и переменного тока?

Литература

1. Джендубаев А.-З.Р. Точный расчет по каталожным данным коэффициента полезного действия силовых трансформаторов электрических сетей. // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. № 5. С. 34-37.
2. Джендубаев А.-З.Р. Псевдорекуперативный режим работы асинхронной машины. // Электротехника. – 2006. № 8. – С. 17-21.
3. Джендубаев А.-З.Р. Пять режимов работы асинхронной машины с короткозамкнутым ротором, подключенной к сети переменного тока // Известия Северо-Кавказской государственной гуманитарно-технологической академии. 2017. № 2. С. 17-32.
[http://ncshta.ru/sites/default/files/u1/kadr/2017_N2\(11\).pdf](http://ncshta.ru/sites/default/files/u1/kadr/2017_N2(11).pdf)
4. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978.
5. Беспалов В.Я. Электрические машины / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013.
6. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. ч. 2. – М.–Л.: Энергия, 1965.
7. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.
9. Черных И.В. Моделирование электрических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink / И.В. Черных – М.: ДМК Пресс, СПб.: Питер, 2008.– 288с.
10. http://ncshta.ru/sites/default/files/u1/kadr/AM_5_mode.zip
11. Джендубаев А.-З.Р. Электромагнитный полезный и статический момент электропривода. // Электричество. – 1999, № 2, – С.58-59.

ДЖЕНДУБАЕВ Абрек-Заур Рауфович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Лабораторный практикум для студентов III курса, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение»

Корректор Чагова О. Х.
Редактор Чагова О. Х.

Сдано в набор 16.09.2025 г.
Формат 60х84/16
Бумага офсетная.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 4,88
Заказ № 5201
Тираж 100 экз

Оригинал-макет подготовлен
в Библиотечно-издательском центре СКГА
369000, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36

