

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н. В. Бочарова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям
для студентов магистратуры
по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2023

УДК 631.371

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
М.С. Харитонов

Бочарова, Н. В.

Электрические машины: учеб.-метод. пособие по практическим занятиям для студентов магистратуры по напр. подг. 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника профиль электроснабжение / Н. В. Бочарова. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 23 с.

В учебно-методическом пособии представлены практические задания и методические рекомендации по их выполнению, а также задания и вопросы для самостоятельной работы. Практические занятия предназначены для приобретения навыков выполнения расчетов в области электрических машин.

Табл. – 4, рис. – 3, список лит. – 5 наименований

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией Института морских технологий, энергетики и строительства 23.12.2022 г., протокол № 4

УДК 631.371

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2023 г.
© Бочарова Н. В., 2023 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
Практический блок № 1 «Расчет трансформаторов»	5
Практические задания, предлагаемые для самостоятельного решения	10
Практический блок № 2 «Расчет синхронных машин».....	12
Практические задания, предлагаемые для самостоятельного решения.....	14
Практический блок № 3 «Расчет электрических машин постоянного тока».....	16
Практические задания, предлагаемые для самостоятельного решения	20
Рекомендуемая литература.....	22

ВВЕДЕНИЕ

Практическое занятие представляет собой занятие по решению прикладных задач. Практическое занятие всегда опирается на известный теоретический материал, который изложен в лекции. Поэтому практическое занятие должно быть нацелено на формирование определенных знаний, умений, навыков в области расчета электрических машин. Студенты должны всегда видеть ведущую идею курса и ее связь с практикой. Цель занятия всегда должна быть понятна студенту. Это придает практическому занятию актуальность, утверждает необходимость овладения опытом профессиональной деятельности, связывает его с практикой жизни. Результатом практических занятий для студентов должно являться:

- закрепление и углубление знаний теоретического характера;
- научиться приемам решения практических задач, овладеть навыками и умениями выполнять расчеты, графические и другие виды заданий;
- научиться работать с различными источниками информации: книгами, стандартами, справочной и научной литературой, ресурсами Интернет;
- научиться самостоятельно овладевать способами и приемами самообучения, саморазвития и самоконтроля.

Выполнение практических заданий к каждому занятию позволяет успешно подготовиться к зачету и овладеть профессиональными умениями и навыками.

Учебно-методическое пособие имеет блочную структуру. В каждом блоке рассматривается определенная электрическая машина, способы расчета параметров и построения характеристик данной машины. По каждому блоку предусмотрена аудиторная работа и задания для самостоятельного решения. Аудиторная работа по блоку в зависимости от сложности и объема материала может занимать более одного практического занятия.

В результате выполнения заданий практикума студент должен

знать:

принцип действия современных типов электрических машин; особенности их конструкции; уравнения, схемы замещения и характеристики электрических машин;

уметь:

использовать полученные знания при эксплуатации электрических машин;

владеть:

навыками элементарных расчетов и испытаний электрических машин.

Практический блок № 1

Тема: «Расчет трансформаторов»

Цель: формирование знаний, умений, навыков в области расчета однофазных и трехфазных трансформаторов.

Методические рекомендации

Рассматривая физические процессы, возникающие в трансформаторе необходимо обратить особое внимание на то положение, что при изменении нагрузки трансформатора в широких пределах (от холостого хода до номинального режима) магнитный поток может считаться практически постоянным и равным магнитному потоку в режиме холостого хода. Это в свою очередь определяет постоянство потерь в стали, которые легко определяются из режима холостого хода.

При рассмотрении режима установившегося короткого замыкания получается, что магнитный поток в сердечнике трансформатора настолько мал, что им можно пренебречь, а следовательно, при этом режиме потери в стали трансформатора практически равны нулю, а потери в меди (в обмотках трансформатора) равны потерям при номинальной нагрузке трансформатора. Величины токов, напряжений и мощностей, полученные из режимов холостого хода и установившегося короткого замыкания, позволяют определить основные параметры трансформатора.

При построении векторных диаграмм трансформатора следует иметь в виду, что лишь первый шаг является произвольным. Пусть, например, из произвольно выбранной точки в произвольном направлении проведен вектор тока I_2^1 , остальные построения будут уже обусловлены, с одной стороны, заданными значениями угла φ_2 и напряжения U_2^1 , с другой - уравнениями напряжений и токов для вторичной и первичной обмоток трансформатора.

При рассмотрении изменения вторичного напряжения следует обратить внимание на активную нагрузку. При активной нагрузке $\varphi_2 = 0$ и поэтому формула процентного изменения напряжения приводится к виду $\Delta U\% = \beta u_{ка}$. Отсюда следует, что при номинальной нагрузке величиной ΔU можно пренебречь, т. к. $u_{ка} = 1-2\%$.

В теории трансформаторов пользуются схемой замещения. Возможность представить трансформатор его схемой замещения вытекает из теории четырехполюсника, поскольку трансформатор может рассматриваться как четырехполюсник. Подобная же схема замещения используется и в теории асинхронных машин вследствие существования некоторой аналогии между процессами в асинхронной машине и трансформаторе.

В паспорте трехфазных трансформаторов дается номинальная мощность и мощность потерь всех трех фаз: под номинальными напряжениями понимаются линейные напряжения на зажимах трансформатора в режиме

холостого хода, а под номинальными токами – линейные токи независимо от схемы соединения обмоток.

После изучения раздела студенты должны:

знать: основные элементы конструкции трансформатора; выражение для коэффициента трансформации; уравнения электрического и магнитного состояния трансформатора;

понимать: назначение опытов холостого хода и короткого замыкания; сущность «приведения» параметров вторичной обмотки трансформатора к первичной; различие опыта короткого замыкания и режима короткого замыкания; причины изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора; принципы построения векторных диаграмм для различных нагрузок;

уметь: анализировать различные режимы работы трансформаторов; читать паспорт трансформатора; включать приемники и электроизмерительные приборы для определения напряжений, токов и мощностей; предвидеть последствия коммутационных изменений в цепи нагрузки на электрическое состояние трансформатора.

Примеры решения задач, рассматриваемых на практическом занятии по теме «Расчет трансформаторов»

Задача 1.

Для трехфазного трансформатора мощностью $S_n = 100$ кВА, соединение обмоток которого Y/Y_0-0 , известно: номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора $U_{1н} = 6000$ В, напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки трансформатора $U_{2н} = 400$ В, напряжение короткого замыкания $u_k = 5.5$ %, мощность короткого замыкания $P_k = 2400$ Вт, мощность холостого хода $P_0 = 600$ Вт, ток холостого хода $I_0 = 0.07 I_n$.

Определить:

1. Сопротивление обмоток трансформатора r_1, x_1, r_2, x_2 , сопротивление намагничивающей ветви z_0 и его составляющие r_0 и x_0 , которыми заменяется магнитная цепь трансформатора, угол магнитных потерь δ .

2. Построить характеристики трансформатора: зависимость вторичного напряжения от нагрузки, зависимость КПД от нагрузки (коэффициент мощности нагрузки принять равным 0.75).

3. Построить векторную диаграмму трансформатора при нагрузке, составляющей 0.8 от номинальной мощности трансформатора S_n и $\cos \varphi_2 = 0.75$.

4. Составить T-образную схему замещения трансформатора.

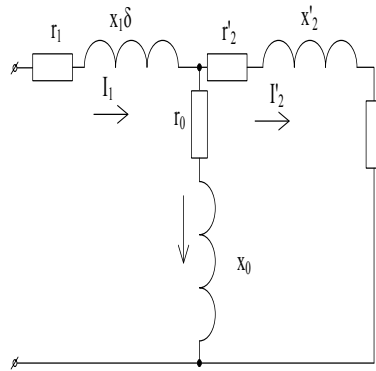


Рисунок 1 - Т-образная схема замещения трансформатора

Решение.

Определяем номинальный ток первичной обмотки:

$$I_{H1} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{1H}} = \frac{100 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9.6 \text{ A.}$$

Определяем ток холостого хода и $\cos \varphi_0$:

$$I_0 = 0.07I_{H1} = 0.07 \cdot 9.6 = 0.67 \text{ A};$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1H}I_0\sqrt{3}} = \frac{600}{6000 \cdot 0.67\sqrt{3}} = 0.086; \varphi_0 = 85^\circ.$$

Определяем угол магнитных потерь:

$$\delta = 90^\circ - \varphi_0 = 90^\circ - 85^\circ = 5^\circ.$$

Определяем сопротивления обмоток.

Сопротивления короткого замыкания:

$$Z_K = \frac{U_{K\Phi}}{I_{K\Phi}} = \frac{0.055 \cdot 6000}{3 \cdot 9.6} = 19.9 \text{ Ом};$$

$$R_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_K^2} = \frac{2400}{9.6^2 \cdot 3} = 8.7 \text{ Ом};$$

$$Z_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} = \sqrt{19.9^2 - 8.7^2} = 17.9 \text{ Ом};$$

Сопротивления первичной обмотки:

$$r_1 = r_2 = \frac{r_K}{2} = \frac{8.7}{2} = 4.35 \text{ Ом};$$

$$x_{\sigma 1} = x_{\sigma 2} = \frac{17.9}{2} = 8.95 \text{ Ом}.$$

Сопротивления вторичной обмотки:

$$r_2 = \frac{r_2}{k^2} = \frac{4.35}{225} = 0.0193 \text{ Ом};$$

$$x_{\sigma 2} = \frac{x_{\sigma 2}}{k^2} = \frac{8.95}{225} = 0.0398 \text{ Ом},$$

где $k = \frac{U_{1H}}{U_{20}} = \frac{6000}{400} = 15.$

Определяем сопротивления намагничивающей цепи:

$$Z_0 = \frac{U_{H\Phi}}{I_{H\Phi}} = \frac{6000}{0.67\sqrt{3}} = 5180 \text{ Ом};$$

$$x_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} = \frac{600}{3 \cdot 0.67^2} = 447 \text{ Ом};$$

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - x_0^2} = \sqrt{5180^2 - 447^2} = 5160 \text{ Ом}.$$

Для построения внешней характеристики определяем потерю напряжения на вторичной обмотке трансформатора:

$$\Delta U_{2\%} = (u_a\% \cos \varphi_2 + u_p\% \sin \varphi_2),$$

где $u_a\%$ и $u_p\%$ - соответственно активное и реактивное падение напряжений;

$$u_a\% = u_k\% \cos \varphi_k; \quad \cos \varphi_k = \frac{r_k}{z_k}; \quad u_a\% = 5.5 \frac{8.7}{19.9} = 2.4\%;$$

$$u_p\% = \sqrt{u_k^2\% - u_a^2\%} = \sqrt{5.5^2 + 2.4^2} = 4.95\%.$$

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора определяем по формуле:

$$U_2 = \frac{U_{20}}{100} (100 - \Delta U_2\%).$$

Задаваясь различными значениями β , определяем напряжение U_2 :

β	$\Delta U_2\%$	$U_2, \text{В}$	кпд
0,1	-	-	0,555
0,025	-	-	0,757
0,05	-	-	0,904
0,1	0,507	397,97	0,924
0,2	1,014	395,94	0,956
0,3	1,521	393,92	0,965
0,4	2,028	391,89	0,967
0,5	2,535	389,86	0,969
0,6	3,042	387,83	0,967
0,7	3,549	385,80	0,966
0,8	4,056	383,78	0,964
0,9	4,563	381,75	0,963
1,0	5,070	379,72	0,962

Для построения зависимости КПД от нагрузки расчет нужно провести по формуле:

$$\text{КПД} = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}$$

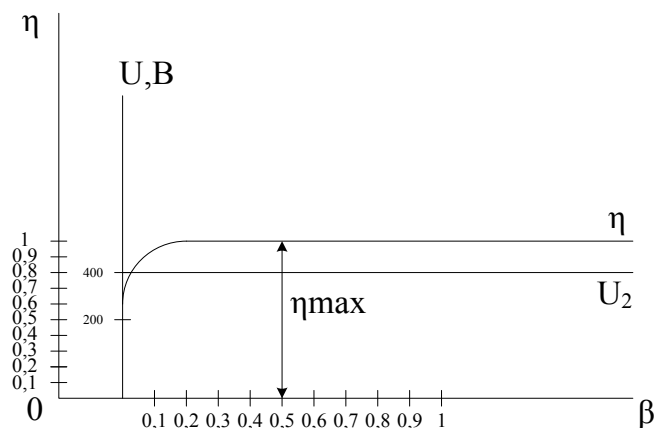


Рисунок 2 - Зависимость вторичного напряжения и КПД трансформатора от коэффициента загрузки.

Определяем, при какой нагрузке трансформатор имеет максимальный КПД:

$$\beta_M = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{600}{2400}} = 0.5; \text{ КПД}_M = 0.969.$$

Построение векторной диаграммы начнем с вектора фазного напряжения $U_{2\phi}$, величина которого для $\beta = 0.80$ и $\cos \varphi_2 = 0.75$ будет равна:

$$U_{2\phi} = \frac{383.78}{\sqrt{3}} = 222 \text{ В.}$$

Приведенное значение вторичного напряжения
 $U_2^1 = U_{2\phi} = 222 \cdot 1.5 = 3330 \text{ В.}$

Вектор тока I_2^1 отстает по фазе от вектора U_2^1 на заданный угол φ_2 и равен

$$I_2 = 0.8 I_{2H} = 0.8 \frac{S_H}{\sqrt{3} U_{2H}} = 0.8 \frac{100 \cdot 1000}{1.73 \cdot 400} = 115.6 \text{ А}$$

Падения напряжения на вторичной обмотке:

$$r_2^1 I_2^1 = 4/35 \cdot 7/72 = 33/6 \text{ В;}$$

$$x_2^1 I_2^1 = 8.95 \cdot 7.72 = 68.3 \text{ В.}$$

Электродвижущую силу E_2^1 находим из уравнения электрического состояния, составленного по второму закону Кирхгофа, для вторичной цепи:

$$E_2^1 = U_2^1 + z_2^1 I_2^1.$$

Вектор потока Φ_m отстает от вектора E_2^1 на 90° ; а ток холостого хода I_0 опережает поток на угол потерь δ .

Ток в первичной обмотке трансформатора I_1 получаем из уравнения намагничивающих сил:

$$I_1 = I_0 + I_2^1, \quad I_2^1 = -\frac{I_2}{K}.$$

Вектор напряжения первичной обмотки трансформатора U_1 определяем из уравнения электрического состояния, составленного по второму закону Кирхгофа для первичной цепи: $U_1 = E_1 + z_1 I_1$. Ток I_1 определяем по диаграмме.

$$r_1 I_1 = 4,35 \cdot 7,76 = 33,8 \text{ В;}$$

$$x_1 I_1 = 8,95 \cdot 7,76 = 69,4 \text{ В.}$$

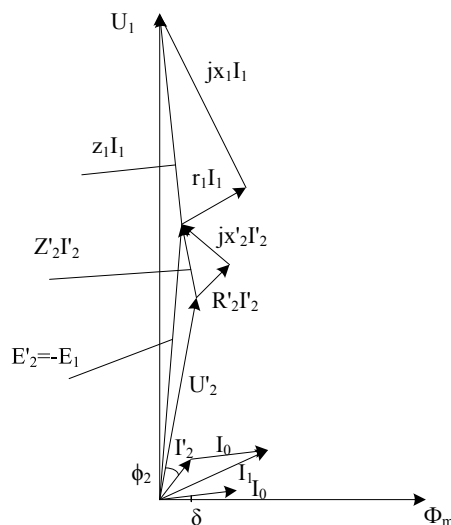


Рисунок 3 - Векторная диаграмма трансформатора

Задача 2.

Два трехфазных трансформатора одной и той же номинальной мощностью $S_{н1} = S_{н11} = 400$ кВА, с одинаковыми группами соединений и номинальными напряжениями должны быть включены для параллельной работы на общую нагрузку. В результате опыта короткого замыкания установлены значения напряжения короткого замыкания обоих трансформаторов: $u_{к1} = 5.5$ %, $u_{к11} = 5$ %. Определить, можно ли в этих условиях довести нагрузку каждого из трансформаторов до его номинальной мощности.

Решение.

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1k}}; z_k = \frac{U_{кф.}}{I_{1н}}; r_k = \frac{P_k}{3I_{1н}^2}; x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2};$$

При $I_{н1} = I_{н11}$ имеем:

$$\frac{z_{к1}}{z_{к11}} = \frac{u_{к1}}{u_{к11}}$$

$$\frac{I_1}{I_{11}} = \frac{z_{к11}}{z_{к1}}, \frac{S_1}{S_{11}} = \frac{I_1}{I_{11}} = \frac{u_{к11}}{u_{к1}} = \frac{5}{5.5} = 0.9.$$

Таким образом, длительная нагрузка первого трансформатора должна быть снижена на 10 % и не должна превышать $0.9S_{н1} = 0.9 \cdot 400 = 360$ кВА. Второй трансформатор может быть нагружен до $S_{н11} = 400$ кВА. Общая максимальная нагрузка установки должна быть ниже суммарной номинальной мощности трансформаторов на 400 кВА (трансформатор с большим напряжением короткого замыкания может быть использован лишь на 90 %.)

Практические задания, предлагаемые для самостоятельного решения.

Задача 1

Для трехфазного трансформатора, параметры которого приведены в таблице, определить коэффициент мощности $\cos \varphi_0$, коэффициент мощности $\cos \varphi$ при нагрузках $\beta = 0.7$ и $\cos \varphi_2 = 1$, $\beta = 0.7$ и $\cos \varphi_2 = 0.75$, сопротивления первичной и вторичной обмоток r_1, x_1, r_2, x_2 , а также z_0, r_0, x_0 , угол магнитных потерь δ . Построить векторную диаграмму трансформатора для нагрузки $\beta = 0.8$ и $\cos \varphi_2 = 0.75$. Построить внешнюю характеристику и зависимость КПД от нагрузки для $\cos \varphi_2 = 0.75$. Начертить Т-образную схему замещения трансформатора. Варианты заданий указаны в табл. 1.

Таблица 1 - Варианты заданий для решения задачи 1

Группы соединений	S_n , кВА	$U_{1н}$, В	$U_{2н}$, В	u_k , %	P_k , Вт	P_0 , Вт	I_0 , %
1. У/У ₀ -0	10	6300	400	5,0	335	105	10,0
2. У/Δ-11	20	6300	230	5,0	600	180	9,0
3. У/У ₀ -0	30	10000	400	5,0	850	300	9,0
4. У/У ₀ -0	50	10000	400	5,0	1325	440	8,0
5. У/У ₀ -0	75	10000	230	5,0	1875	590	7,5
6. У/Δ-11	100	10000	525	5,0	2400	730	7,5
7. У/У ₀ -0	180	10000	525	5,0	4100	1200	7,0
8. У/Δ-11	240	10000	525	5,0	5100	1600	7,0
9. У/У ₀ -0	320	35000	10500	6,5	6200	2300	7,5
10. У/У ₀ -0	420	10000	525	5,0	7000	2100	6,5
11. У/У ₀ -0	25	10000	230	4,7	690	125	3,0
12. У/Δ-11	25	6000	400	4,5	600	125	3,0
13. У/Δ-11	25	10000	400	4,7	690	125	3,0
14. У/У ₀ -0	40	10000	230	4,5	880	180	3,0
15. У/У ₀ -0	40	6000	230	4,5	880	180	3,0
16. У/У ₀ -0	40	6000	400	4,7	1000	180	3,0
17. У/Δ-11	40	10000	400	4,0	690	125	3,2
18. У/Δ-11	63	6000	230	4,5	1280	260	2,8
19. У/Δ-11	63	6000	400	4,5	1280	260	2,8
20. У/Δ-11	63	10000	230	4,7	1470	260	2,8

Вопросы для самоконтроля по теме

1. Назначение и принцип действия трансформатора.
2. Почему обмотки высшего и низшего напряжений размещают на общем стержне?
3. Напишите уравнение магнитодвижущих сил в трансформаторе.
4. Объясните, почему магнитный поток трансформатора практически не зависит от нагрузки.
5. Какие потери трансформатора являются постоянными и какие – переменными?
6. Напишите уравнения электрического состояния для первичной и вторичной обмоток и объясните смысл каждого из членов этих уравнений.
7. Как устроен трехфазный трансформатор?
8. Чем определяется группа соединения трехфазного трансформатора?
9. Что понимают под напряжением короткого замыкания?
10. Чем определяется температура нагрева работающего трансформатора?
11. Объясните причину изменения первичного тока силового трансформатора при изменении нагрузки, присоединенной к его вторичной обмотке.
12. Что называют коэффициентом трансформации трансформатора?
13. В чем состоит явление рассеяния в трансформаторе? Как выражается ЭДС рассеяния обмоток?

14. Что называют приведенными значениями величин вторичной обмотки?

15. Почему в опыте короткого замыкания мощность потерь в стали настолько мала, что ею можно пренебречь?

16. Почему в опыте холостого хода мощность потерь в меди настолько мала, что ей можно пренебречь?

Практический блок № 2

Тема: «Расчет синхронных машин»

Цель: формирование знаний, умений и навыков в области расчета синхронных машин

Методические рекомендации

Важное место в теории синхронных машин занимает работа синхронной машины, присоединенной к сети, которая питается мощными генераторами. Исходят из предположения, что общая мощность этих генераторов несоизмерима велика по сравнению с мощностью рассматриваемой синхронной машины (сеть большой мощности). В соответствии с этим считают, что любое изменение режима работы рассматриваемой машины не в состоянии оказать заметного влияния на электрическое состояние сети, которое может, таким образом, считаться неизменным.

Синхронная машина, присоединенная к сети, может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. В обоих режимах вращение ротора происходит с синхронной скоростью без каких-либо устройств для поддержания синхронизма.

Трехфазная система токов в обмотке якоря создает вращающееся магнитное поле. Это поле может быть заменено полюсной системой, скользящей вдоль внутренней поверхности статора с постоянной скоростью, равной скорости вращения магнитного поля. Две вращающиеся полюсные системы – ротора и воображаемая, эквивалентная вращающемуся магнитному полю, - неподвижны одна относительно другой. Между ними возникают силы магнитного притяжения, которые могут быть уподоблены упругим связям, соединяющим обе системы. Благодаря этим связям достигается синхронность вращения ротора и магнитного поля якоря.

Если будет превышен, известный предел нагрузки машины, то произойдет разрыв упругих связей. После этого скорость вращения ротора становится уже независимой от скорости вращения магнитного поля. Это явление называется выпадением из синхронизма. Работа синхронной машины в таком режиме невозможна.

Очень важную роль в синхронной машине играет реакция якоря, т.е. воздействие намагничивающей силы якоря на основное поле машины, создаваемое намагничивающей силой обмотки возбуждения. Амплитудное значение магнитного потока в синхронной машине задается величиной

напряжения в сети (так же как в трансформаторе и в асинхронном двигателе). Магнитный поток создается намагничивающей силой, которая складывается из намагничивающей силы обмотки возбуждения и намагничивающей силы обмотки якоря. Для неизменности амплитудного значения магнитного потока необходимо, чтобы результирующая намагничивающая сила также оставалась неизменной. Всякое изменение тока возбуждения ротора влечет за собой изменение величины и фазы тока в якоре и соответственно изменение намагничивающей силы якоря. В частности, если вследствие увеличения тока в обмотке возбуждения э.д.с. якоря (по модулю) станет больше, чем напряжение в сети («перевозбуждение»), то синхронная машина, работающая в режиме двигателя, принуждается к потреблению тока из сети, опережающего по фазе напряжение в сети. Иными словами, синхронный двигатель в этих условиях представляет собой активно-емкостную нагрузку.

знать: содержание терминов: синхронная скорость, круговое вращающееся магнитное поле, поток полюса, способы изменения направления вращения поля; устройство и области применения синхронных машин; условные обозначения трехфазных асинхронных двигателей на схемах; вид характеристик холостого хода, нагрузочной, внешней, регулировочной для генераторного режима и механической характеристики для двигательного режима;

понимать: принцип возбуждения многополюсного вращающегося магнитного поля; принцип действия синхронной машины в режимах двигателя, генератора и компенсатора;

уметь: осуществлять пуск синхронного двигателя; снимать характеристики синхронной машины в различных режимах работы.

Рассмотрим примеры решения задач по теме «Синхронные машины»

Примеры решения задач, рассматриваемых на практических занятиях по теме «Синхронные машины»

Задача 1.

Трехфазный синхронный генератор мощностью $S_H = 500$ кВА и номинальным напряжением $U_{лн} = 3,2$ кВ работает с коэффициентом мощности $\cos\varphi_{1H} = 0,9$. Обмотка фазы статора соединена звездой. При этом частота вращения $n = 600$ об./мин., КПД генератора при номинальной нагрузке $\eta_H = 92\%$. Соединение фазных обмоток статора по схеме Y.

Требуется определить активную и реактивную мощность генератора при номинальной нагрузке, ток в обмотке статора, требуемую первичному двигателю мощность и вращающий момент при непосредственном механическом соединении валов генератора и первичного двигателя.

Решение. Для определения номинальной активной и реактивной мощности генератора используем выражения

$$P_H = S_H \cos\varphi_{1H} = 500 \cdot 0,9 = 450 \text{ кВт},$$

$$Q_H = S_H \sin j_{HT} = S_H \sin(\arccos j_{HT}) = 500 \cdot \sin(\arccos 0,9) = 217,94 \text{ кВт.}$$

Номинальный ток в линейном проводе генератора

$$I_H = S_H / U_{ЛH} = \cos \varphi_{1H} = 500 / 3,2 = 156,25 \text{ А.}$$

Для соединения фазных обмоток по схеме звезда Y ток в фазах обмотки статора $I_{фH}$ найдем через величину линейного тока $I_{ЛH}$

$$\sqrt{3} I_{фH} = I_{ЛH} / = 156,25 / 1,73 = 90,32 \text{ А.}$$

Мощность первичного двигателя при непосредственном механическом соединении валов генератора и первичного двигателя выразим из формулы

$$P_{дв} = 100\% P_H / \eta_H = 100\% 450 / 92 = 489,1 \text{ кВт.}$$

Электромагнитный момент первичного двигателя при непосредственном соединении валов генератора и первичного двигателя

$$M_{ЭМ} = P_{дв} / \omega = 60 P_{дв} / (2\pi n) = 60 489,1 \cdot 10^3 / (2 \cdot 3,14 \cdot 600) = 7788,7 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Практические задания, предлагаемые для самостоятельного решения

Трехфазный синхронный генератор мощностью S_H и номинальным напряжением $U_{ЛH}$ работает с коэффициентом мощности $\cos \varphi_{1H}$. Обмотка фазы статора соединена звездой или треугольником. При этом частота вращения n , КПД генератора при номинальной нагрузке η_H .

Для нечетных номеров вариантов следует принять соединение фазных обмоток статора по схеме Y, для четных – по схеме Δ.

Требуется определить активную и реактивную мощность генератора при номинальной нагрузке ток в обмотке статора, требуемую первичному двигателю мощность и вращающий момент при непосредственном механическом соединении валов генератора и первичного двигателя. Числовые значения заданных величин исходных данных для каждого из вариантов указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Варианты заданий для решения задачи 1.

Вариант	S_H , кВт·А	$U_{ЛH}$, кВ	$\cos \varphi_{1H}$	n , об/мин	$\eta_{ном}$, %
1	12500	10,5	0,80	600	92,1
2	10000	6,3	0,85	750	92,3
3	8000	10,5	0,87	1000	91,4
4	63000	6,3	0,90	1500	92,5
5	5000	10,5	0,92	600	92,2
6	4000	6,3	0,95	750	91,3

окончание таблицы 2

Вариант	$S_H, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$U_{1H}, \text{кВ}$	$\cos\varphi_{1H}$	$n, \text{об/мин}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$
7	630	10,5	0,98	1000	92,6
8	800	6,3	1	1500	92,4
9	10000	10,5	0,80	600	91,9
10	12800	6,3	0,85	750	92,2
11	63000	10,5	0,87	1000	90,7
12	8000	6,3	0,90	1500	90,8
13	4000	10,5	0,92	600	92
14	5000	6,3	0,95	750	90,9
15	3150	10,5	0,98	1000	90,8
16	2500	6,3	1	1500	92,1
17	2000	10,5	0,80	600	92,3
18	1600	6,3	0,85	750	92,4
19	1250	10,5	0,87	1000	92,2
20	1000	6,3	0,90	1500	91,1
21	800	10,0	0,92	600	90,7
22	630	6,3	0,95	750	90,8
23	630	10,5	0,98	1000	92,4
24	800	6,3	1	1500	92,1
25	1000	10,5	0,80	600	90,4
26	1250	6,3	0,85	750	90,5
27	1600	10,5	0,87	1000	90,8
28	2000	6,3	0,90	1500	90,9
29	2500	10,5	0,92	600	92,1
30	3150	6,3	0,95	750	92,3

Вопросы для самоконтроля по теме:

1. Каковы устройство и принцип действия синхронного двигателя?
2. Какие типы роторов используются в турбо- и гидрогенераторах и почему?
3. Что называется угловой характеристикой синхронной машины и какое значение она имеет для оценки статической устойчивости машины при параллельной работе с сетью?
4. Что является обязательным условием преобразования энергии в синхронной машине?
5. При каких условиях синхронный двигатель представляет собой активно-емкостную нагрузку?
6. Как отражается на режиме работы элементов электропередачи

уменьшение мощности потребителя?

7. Почему не разрешается работа потребителей электрической энергии с малым коэффициентом мощности?

8. Как используются синхронные двигатели для улучшения коэффициента мощности предприятий?

9. Как образуется вращающий электромагнитный момент синхронных двигателей?

10. Как влияет регулирование тока возбуждения I_B синхронного двигателя на изменение угла θ ?

11. Как реагирует трехфазный синхронный двигатель на увеличение нагрузки на его валу?

12. Какой ток возбуждения синхронного двигателя называется нормальным; исходя из каких соображений выбирается его величина?

13. Как осуществляется пуск синхронных двигателей?

14. Почему при пуске синхронных двигателей обмотка возбуждения ротора замыкается на внешнее активное сопротивление?

17. В каких условиях и где синхронный двигатель работает в качестве синхронного компенсатора?

18. Сравните свойства, конструкцию и характеристики синхронного и асинхронного двигателей.

19. Как влияет на механическую характеристику синхронного двигателя снижение питающего напряжения?

20. Перечислите условия и порядок включения синхронных машин на параллельную работу с трехфазной системой.

21. Какие явления сопровождают выпадение синхронных машин из синхронизма?

22. Как избежать выпадения из синхронизма синхронных машин?

23. Как осуществляется регулирование реактивной мощности синхронных машин?

24. Возможна ли работа синхронного двигателя с $\cos\varphi = 1$?

25. Почему трехфазная обмотка переменного тока располагается на статоре, электромагниты постоянного тока – на роторе, а не наоборот?

Практический блок № 3

Тема: «Расчет электрических машин постоянного тока»

Цель: формирование знаний, умений и навыков в области расчета электрических машин постоянного тока

Методические рекомендации

Изучение электрических машин постоянного тока надо начинать с их устройства и принципа работы. Учитывая, что машина постоянного тока

обратима, т. е. может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, изучение таких вопросов, как коллектор, реакция якоря, электромагнитный момент, возбуждение и ряд других, необходимо рассматривать в сопоставлении для обоих режимов. Очень важно правильно понимать связь между напряжением на зажимах U , ее ЭДС E и падением напряжения $I_n r_n$ в обмотке якоря для генераторного и двигательного режимов:

$$\text{для генератора } E = U + I_n r_n;$$

$$\text{для двигателя } U = E + I_n r_n.$$

Изучая работу машин постоянного тока в режиме двигателя, надо обратить особое внимание на пуск, регулирование скорости вращения и вращающий момент двигателя, а в режиме генератора – на самовозбуждение. Характеристики генераторов и двигателей дают наглядное представление об эксплуатационных свойствах электрических машин.

После изучения данной темы студент должен:

знать: основные конструктивные элементы машин постоянного тока: статор, обмотка статора, якорь, обмотка якоря; термины: щеточно-коллекторный узел, геометрическая и физическая нейтраль, реакция якоря, коммутация, противо-ЭДС.; классификацию машин постоянного тока по способу возбуждения; внешние характеристики генераторов постоянного тока всех способов возбуждения; механические характеристики двигателей постоянного тока всех способов возбуждения; способы пуска двигателей постоянного тока; способы регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока;

понимать: назначение основных конструктивных элементов машин постоянного тока; принцип действия генератора и двигателя постоянного тока; уравнения электрического состояния генератора и двигателя постоянного тока; назначение пусковых и регулировочных сопротивлений; энергетические диаграммы генератора и двигателя постоянного тока;

уметь: включать в сеть, регулировать скорость и реверсировать двигатель постоянного тока; отличать по внешнему виду машину постоянного тока от других типов электрических машин; ориентироваться в паспортных данных машины и определять и определять номинальный момент; выбирать двигатель применительно к заданным техническим условиям.

Примеры решения задач, рассматриваемых на практическом занятии по теме «Машины постоянного тока»

Задача 1.

Для генератора параллельного возбуждения с номинальными данными: $P_n=5.2$ кВт, $U_n=230$ В и скорость вращения $n_n=2860$ об./мин. Сопротивление обмотки якоря $r_a=0.75$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $r_b=154$ Ом, механические и магнитные потери составляют 4 % от номинальной мощности генератора. Определить момент на валу первичного двигателя.

Решение.

Номинальный ток нагрузки

$$I_H = \frac{P_H}{U_H} = \frac{5.2 \cdot 1000}{230} = 22.5 \text{ А}$$

Ток возбуждения

$$I_B = \frac{U_H}{I_H} = \frac{230}{154} = 1.5$$

Ток якоря при номинальной нагрузке

$$I_{я.н.} = I_H + I_B = 22.6 + 1.5 = 24.1 \text{ А}$$

ЭДС генератора

$$E = U_H + r_{я} I_{я.н.} = 230 + 0.75 \cdot 24.1 = 248 \text{ В}$$

Потери в обмотке якоря и в цепи возбуждения:

$$\Delta P_{я} = r_{я} I_{я.н.}^2 = 0.75 \cdot 24.1^2 = 435 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_B = r_B I_B^2 = 154 \cdot 1.5^2 = 346 \text{ Вт.}$$

Сумма механических и магнитных потерь

$$\Delta P_{мех.} + \Delta P_{маг.} = 0.04 \cdot 5.2 \cdot 1000 = 208 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери при номинальной нагрузке

$$\sum \Delta P = 435 + 345 + 208 = 0.989 \text{ кВт.}$$

Мощность на валу первичного двигателя

$$P_{мех.н} = \sum \Delta P + P_H = 0.989 + 5.2 = 6.189 \text{ кВт.}$$

Кпд генератора при номинальной нагрузке

$$\frac{P_H}{P_{мех.н}} \cdot 100 = \frac{5.2}{6.189} \cdot 100 = 84 \%$$

Момент на валу первичного двигателя при номинальной нагрузке генератора

$$M_d = 9550 \cdot \frac{P_{мех.н}}{n_H} = 9550 \cdot \frac{6.189}{2860} = 20.7 \text{ Нм.}$$

Задача 2.

Двигатель параллельного возбуждения, присоединенный к сети с напряжением $U_H = 220 \text{ В}$, потребляет при номинальной нагрузке ток $I_H = 20.5 \text{ А}$, а при холостом ходе - $I_0 = 2.35 \text{ А}$. Сопротивление обмотки якоря $r_{я} = 0.75 \text{ Ом}$, а цепи возбуждения $r_B = 258 \text{ Ом}$. Номинальная скорость вращения $n_H = 1025 \text{ об./мин}$. Определить номинальную мощность двигателя (на валу), номинальный кпд, номинальный вращающий момент, пусковой ток при пуске двигателя без пускового реостата, сопротивление пускового реостата для условия $I_H = 2.5 I_H$ и пусковой момент при пуске двигателя с реостатом. При решении принять, что магнитные и механические потери не зависят от нагрузки.

Решение.

Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_H = P_{1H} - \sum \Delta P,$$

где $\sum \Delta P$ - потери в двигателе, P_{1H} - потребляемая мощность :

$$P_{1H} = U_H I_H = 220 \cdot 20.5 = 4510 \text{ Вт} = 4.51 \text{ кВт.}$$

Для определения потерь в цепи якоря и цепи возбуждения надо знать ток в цепи якоря $I_{я.н}$ и ток возбуждения I_B :

$$I_B = \frac{U_H}{I_B} = \frac{220}{258} = 0.85 \text{ А};$$

$$I_{я.н} = I_H - I_B = 20.5 - 0.85 = 19.65 \text{ А.}$$

Потери в обмотке якоря и в цепи возбуждения:

$$\Delta P_{я.н} = r_{я} I_{я.н}^2 = 0.75 \cdot 19.65^2 = 290 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_B = r_B I_B^2 = 258 \cdot 0.85^2 = 186 \text{ Вт.}$$

Магнитные и механические потери:

$$\Delta P_{\text{маг}} = P_0 - \Delta P_{я0} - \Delta P_B,$$

где $P_0 = U_H I_0 = 220 \cdot 2.35 = 517 \text{ Вт}$; $\Delta P_{я0}$ – потребляемая мощность при холостом ходе двигателя:

$$\Delta P_{я.н} = r_{я}(I_0 - I_B)^2 = 0.75(2.35 - 0.85)^2 = 1.7 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{\text{маг}} = 517 - 1.7 - 186 = 329.3 \text{ Вт};$$

$$\sum \Delta P = 290 + 186 + 329.3 = 805.3 \text{ Вт};$$

$$P_H = 4510 - 805.3 = 3704.7 \text{ Вт} = 3.71 \text{ кВт.}$$

Номинальный КПД

$$\frac{P_H}{P_{1H}} \cdot 100 = \frac{3.71}{4.51} = 82.2 \text{ \%}.$$

Номинальный вращающий момент

$$M_H = 9550 \frac{P_{\text{мех.н}}}{n_H} = 9550 \frac{3.71}{1025} = 34.6 \text{ Нм.}$$

Пусковой ток двигателя при пуске без реостата

$$I_{\text{п}} = \frac{U_H}{r_{я}} = \frac{220}{0.75} = 293 \text{ А.}$$

Сопротивление пускового реостата определяется из равенства

$$I_{\text{п}} = 2.5 I_{я.н} = \frac{U_H}{r_{я} + r_p},$$

откуда

$$r_p = \frac{U_H}{I_{\text{п}}} - r_{я} = \frac{220}{2.5 \cdot 19.65} - 0.75 = 3.73 \text{ Ом.}$$

Определяем пусковой момент двигателя при пуске с реостатом. Известно, что вращающий момент двигателя определяется уравнением

$$M = C_M \Phi I_{я.н}.$$

Для режима номинальной нагрузки выражение принимает вид

$$M_H = C_M \Phi I_{я.н},$$

а для пускового режима

$$M_{\text{п}} = C_M \Phi I_{\text{п}}.$$

Полагая магнитный поток в двигателе постоянным, найдем отношение моментов

$$\frac{M_H}{M_{\text{п}}} = \frac{I_{я.н}}{I_{\text{п}}},$$

$$M_{\text{п}} = 34.6 \frac{2.5 \cdot 19.65}{19.65} = 86.5 \text{ Нм.}$$

Практические задания, предлагаемые для самостоятельного решения

Задача 1.

Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением характеризуется следующими номинальными величинами: Напряжение U_n ; мощность P_n . Мощности потерь в номинальном режиме в % от P_n : в цепи якоря $P_{я}$, в цепи возбуждения $P_{в}$.

Определить:

1. Номинальный ток нагрузки генератора I_n ;
2. Номинальный ток возбуждения $I_{в}$;
3. Номинальный ток якоря $I_{я}$;
4. Сопротивление цепи якоря;
5. ЭДС якоря при токе, равном номинальному;
6. Сопротивление цепи возбуждения при токе возбуждения, равном номинальному;
7. Сопротивление обмотки возбуждения, принимая, что при холостом ходе генератора и полностью выведенном реостате в цепи возбуждения ток в этой цепи составляет $1.5 I_{вн}$;
8. Величину сопротивления реостата, который должен быть введен в цепь возбуждения для того, чтобы напряжение U_0 на зажимах якоря при холостом ходе стало равным напряжению U_n при номинальной нагрузке.

Варианты заданий для решения задач 1 приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Варианты заданий для решения задачи 1

Вариант	U_n , В	P_n , кВт	$P_{я}$, %	$P_{в}$, %
1	115	11	7,5	3
2	230	14	7,5	3
3	115	29	7	2
4	230	25	7	2
5	230	32	7	2
6	230	42	6,5	2
7	230	55	6	2
8	230	75	5,5	2
9	230	100	5	1.5
10	230	125	4,5	1.5

Задача 2

Электродвигатель постоянного тока с параллельным возбуждением характеризуется следующими номинальными величинами: напряжение на зажимах U_n ; мощность P_n ; скорость вращения якоря n_n ; кпд, сопротивления цепи якоря $r_{я}$, цепи возбуждения $r_{в}$.

Определить:

1. Ток $I_{я}$, потребляемый двигателем из сети при номинальной нагрузке;
2. Номинальный момент на валу электродвигателя;

3. Величину пускового момента при токе $I_B=2I_H$ (без учета реакции якоря) и соответствующее сопротивление пускового реостата;

4. Величину пускового момента при той же величине пускового тока, но при ошибочном включении пускового реостата (в общую цепь);

5. Скорость вращения якоря при токе якоря, равном номинальному, но при введении в цепь возбуждения добавочного сопротивления, увеличивающего заданное в условии задачи значения r_a на 20 %. Начертить схемы включения электродвигателя правильную и ошибочную.

Таблица 4 – Варианты заданий для решения задачи 2

Вариант	U_H , В	P_H , кВт	n_H , об./мин.	Кпд, %	r_a , Ом	r_B , Ом
1	110	1,0	3000	77	1,2	220
2	110	1,5	3000	76	0,8	160
3	110	2,2	3000	80	0,48	110
4	110	3,2	1500	78,5	0,34	80
5	110	4,5	1500	80	0,23	70
6	220	6	3000	82,5	0,62	220
7	220	8	3000	83,5	0,44	170
8	220	11	1500	84,0	0,31	185
9	220	14	1500	86,5	0,29	135
10	220	19	1500	84,5	0,16	110

Указание.

При решении задачи воспользоваться данной в таблице процентной зависимостью магнитного потока от тока возбуждения. За 100 % приняты соответственно номинальные значения магнитного потока и тока возбуждения.

I_B , %	0	20	40	60	80	100	120	150
Φ , %	5	45	73	88	95	100	103	107

Вопросы для самоконтроля по теме:

1. Объясните принцип работы машины постоянного тока в качестве генератора и двигателя.

2. Начертите характеристику холостого хода. Объясните, почему при токе возбуждения, равном нулю, ЭДС якоря не равна нулю.

3. Объясните сущность явления реакции якоря. Как она влияет на работу машины?

4. В чем состоит самовозбуждение генератора? В каком случае самовозбуждение генератора параллельного возбуждения не наступает?

5. Изобразите внешнюю и регулировочную характеристики для генераторов с независимым и параллельным возбуждением.

6. Выведите формулу для электромагнитного вращающего момента двигателя.

7. Назовите способы регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока и укажите преимущества и недостатки этих способов.

Описание текущего контроля

По результатам выполнения практических заданий выставляется оценка «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно», которая учитывается при промежуточной аттестации (выставлении зачета по дисциплине).

Рекомендуемая литература

1. Вольдек, А. И., Попов, В. В. Электрические машины: в 2 ч. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – Москва; Санкт-Петербург, 2007. Часть 1. - Машины постоянного тока и трансформаторы, 2007. – 349 с. Часть 2. - Машины переменного тока, 2008. - 319 с.
2. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – Москва: Высшая школа, Логос, 2000. - 607 с.
3. Токарев, Б. Ф. Электрические машины / Б. Ф. Токарев. - Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 623 с.
4. Брускин, Д. Э., Зорохович, А. Е., Хвостов, В. С. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – Москва: Высшая школа, 1990. - 527 с.
5. Хуторецкий, Г. М. Проектирование турбогенератора / Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. – Ленинград: Энергия, 1987. – 256 с.

Локальный электронный методический материал

Наталья Владимировна Бочарова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Редактор И.В. Голубева

Уч.-изд. л. 1,7. Печ. л. 1,4.

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1