

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Брянский государственный аграрный университет»

Никитин А.М., Безик В.А.

Электрические машины

Учебно-методическое пособие по выполнению практических работ
для студентов направлений подготовки

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Брянская область
2023

УДК 621.313 (076)
ББК 31.261
Н 62

Никитин, А. М. Электрические машины: учебно-методическое пособие по выполнению практических работ для студентов направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств / А. М. Никитин, В. А. Безик. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2023. – 67 с.

Учебно-методическое пособие содержит задания по вариантам, примеры решения задач, необходимые справочные данные. Предназначено для использования на практических занятиях студентами направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Рецензенты:

д.т.н. профессор кафедры автоматике, физики и математики Погоньшев В.А. (ФГБОУ ВО Брянский ГАУ).

к.т.н. доцент кафедры электроэнергетики и электротехнологий Широбокова О.Е. (ФГБОУ ВО Брянский ГАУ).

Рекомендовано к изданию решением методической комиссии института энергетики и природопользования Брянского ГАУ, протокол №2 от 30 октября года.

© Брянский ГАУ, 2023
© Никитин А.М., 2023
© Безик В.А., 2023

Содержание

Введение	4
1 Расчет параметров двигателя постоянного тока	5
1.1 Общие сведения	5
1.2 Задание	9
1.3 Методические указания по решению задачи	11
1.4 Контрольные вопросы	12
2 Параметры и характеристики однофазного трансформатора	13
2.1 Общие сведения	13
2.2 Задание	17
2.3 Методические указания по решению задачи	19
2.4 Контрольные вопросы	29
3 Группы соединений и параллельная работа трансформаторов	30
3.1 Общие сведения	30
3.2 Задание	34
3.3 Методические указания по решению задачи	36
3.4 Контрольные вопросы	40
4 Параметры асинхронного двигателя	41
4.1 Общие сведения	41
4.2 Задание	46
4.3 Методические указания по выполнению задачи	48
4.4 Контрольные вопросы	50
5 Параметры синхронного генератора	51
5.1 Общие сведения	51
5.2 Задание	59
5.3 Методические указания по решению задачи	59
5.4 Контрольные вопросы	60
6 Задачи для самостоятельного решения	61
Литература	66

Введение

Предлагаемые методические указания содержат методические указания и примеры решения задач, составленные в помощь студентам, изучающим вопросы расчета параметров электрических машин постоянного и переменного тока. Самостоятельное решение задач предлагается по индивидуальному варианту, а также из перечня задач для самостоятельного решения.

Методические указания включают в себя задачи по расчету трансформаторов, машин постоянного тока, асинхронных трехфазных двигателей. Задачи содержат подробное решение. Часть полученных результатов поясняется рисунками, графиками или векторными диаграммами.

Методические указания предназначены для проведения практических занятий по курсу «Электрические машины» для студентов направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств очной и заочной форм обучения, но может быть использовано и для других электротехнических дисциплин, содержащих раздел «Электрические машины».

Целью выполнения практических работ является приобретение высокого уровня профессиональной подготовки специалистов в области эксплуатации электрических машин.

В результате выполнения практических заданий студент должен:

Знать:

Объекты профессиональной деятельности.

Основные режимы работы объектов профессиональной деятельности

Основные параметры оборудования объектов профессиональной деятельности.

Уметь:

Проектировать объекты профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией.

Определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности.

Производить необходимые расчеты режимов работы объектов профессиональной деятельности.

Владеть:

Техническими, энергоэффективными требованиями при проектировании объектов профессиональной деятельности.

Способностью определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности;

Способностью рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности.

1 Расчет параметров двигателя постоянного тока

1.1 Общие сведения

Машины постоянного тока применяют в качестве электродвигателей и генераторов. Электродвигатели постоянного тока имеют хорошие регулировочные свойства, значительную перегрузочную способность и позволяют получать жесткие и мягкие механические характеристики. Электродвигатели постоянного тока широко используют для привода различных механизмов в черной металлургии (прокатные станы, кантователи, роликовые транспортеры), на транспорте (электровозы, тепловозы, электропоезда, электромобили), в грузоподъемных и землеройных устройствах (краны, шахтные подъемники, экскаваторы), на морских и речных судах, в металлообрабатывающей, бумажной, текстильной, полиграфической промышленности и др. Двигатели небольшой мощности применяют во многих системах автоматики. Конструкция двигателей постоянного тока сложнее и их стоимость выше, чем асинхронных двигателей. Однако в связи с широким применением автоматизированного электропривода и тиристорных преобразователей, позволяющих питать электродвигатели постоянного тока регулируемым напряжением от сети переменного тока, эти электродвигатели широко используют в различных отраслях народного хозяйства. Генераторы постоянного тока ранее широко использовались для питания электродвигателей постоянного тока в стационарных и передвижных установках, а также как источники электрической энергии для заряда аккумуляторных батарей, питания электролизных и гальванических ванн, для электроснабжения различных электрических потребителей на автомобилях, самолетах, пассажирских вагонах, электровозах, тепловозах и др. Недостаток машин постоянного тока – наличие щеточно-коллекторного аппарата, который требует тщательного ухода в эксплуатации и снижает надежность работы машины. Поэтому в последнее время генераторы постоянного тока в стационарных установках вытесняются полупроводниковыми преобразователями, а на транспорте – синхронными генераторами, работающими совместно с полупроводниковыми выпрямителями.

Машина постоянного тока, обычного исполнения, (рисунок 1.1, а) имеет обмотку возбуждения, расположенную на явно выраженных полюсах статора. По этой обмотке проходит постоянный ток I_v , создающий магнитное поле возбуждения Φ_v . На роторе расположена двухслойная обмотка, в которой при вращении ротора индуцируется ЭДС. Таким образом, ротор машины постоянного тока является якорем, а конструкция машины сходна с конструкцией обращенной синхронной машины.

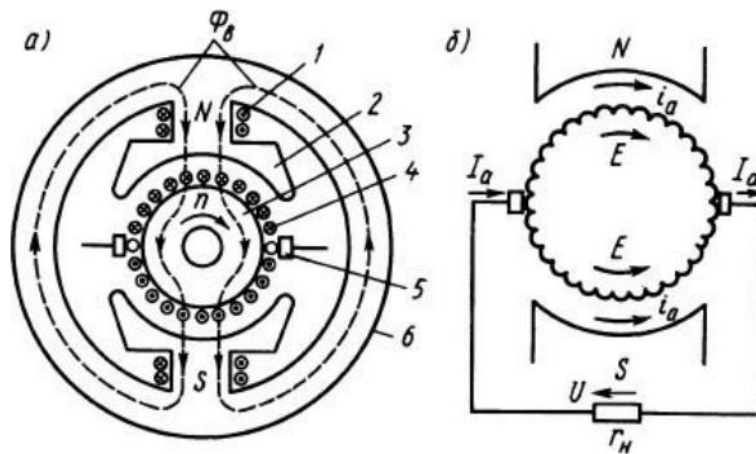


Рисунок 1.1 – Электромагнитная схема двухполюсной машины постоянного тока (а) и эквивалентная схема ее обмотки якоря (б):
 1 – обмотка возбуждения; 2 – главные полюсы; 3 – якорь; 4 – обмотка якоря;
 5 – щетки; 6 – корпус (станина)

При заданном направлении вращения якоря направление ЭДС, индуцируемой в его проводниках, зависит только от того, под каким полюсом находится проводник. Поэтому во всех проводниках, расположенных под одним полюсом, направление ЭДС одинаковое и сохраняется таким независимо от частоты вращения. Иными словами, характер кривой, отображающей направление ЭДС на рисунке 1.1, а, неподвижен во времени: в проводниках, расположенных выше горизонтальной оси симметрии, которая разделяет полюсы (геометрическая нейтраль), ЭДС всегда направлена в одну сторону; в проводниках, лежащих ниже геометрической нейтрали, – в противоположную сторону. При вращении якоря проводники обмотки перемещаются от одного полюса к другому; ЭДС, индуцируемая в них, изменяет знак, т. е. в каждом проводнике наводится переменная ЭДС. Однако количество проводников, находящихся под каждым полюсом, остается неизменным. При этом суммарная ЭДС, индуцируемая в проводниках, находящихся под одним полюсом, также неизменна по направлению и приблизительно постоянна по величине. Эта ЭДС снимается с обмотки якоря с помощью скользящего контакта, включенного между обмотками и внешней цепью. Обмотка якоря выполняется замкнутой, симметричной (рисунок 1.1, б). При отсутствии внешней нагрузки ток по обмотке не проходит, т. к. ЭДС, индуцируемые в различных частях обмотки, взаимно компенсируются. Если щетки, осуществляющие скользящий контакт с обмоткой якоря, расположить на геометрической нейтрали, то при отсутствии внешней нагрузки к щеткам прикладывается напряжение U , равное ЭДС E , индуцированной в каждой из половин обмоток. Это напряжение практически неизменно, хотя и имеет некоторую переменную составляющую, обусловленную изменением положения проводников в пространстве. При большом количестве проводников пульсации напряжения весьма незначительны. При подключении к щеткам сопротивления нагрузки R_H через обмотку якоря проходит постоянный ток I_a , направление которого определяется направлением ЭДС E . В обмотке якоря ток I_a разветвляется и проходит по двум

параллельным ветвям (токи i_a). Для обеспечения надежного токосъема щетки скользят не по проводникам обмотки якоря (как это было в начале развития электромашиностроения), а по коллектору, выполняемому в виде цилиндра, который набирается из медных пластин, изолированных одна от другой. К каждой паре соседних коллекторных пластин присоединяют часть обмотки якоря, состоящую из одного или нескольких витков; эту часть называют секцией обмотки якоря. Если машина работает в генераторном режиме, то коллектор вместе со скользящими по его поверхности щетками является выпрямителем. В двигательном режиме, когда к якорю подводится питание от источника постоянного тока, и он преобразует электрическую энергию в механическую, коллектор со щетками можно рассматривать как преобразователь частоты, связывающий сеть постоянного тока с обмоткой, по проводникам которой проходит переменный ток. Таким образом, главная особенность машины постоянного тока – наличие коллектора и скользящего контакта между обмоткой якоря и внешней электрической цепью.

По конструктивному выполнению машина постоянного тока (рисунок 1.2) подобна обращенной синхронной машине, у которой обмотка якоря расположена на роторе, а обмотка возбуждения – на статоре. Основное отличие заключается в том, что машина постоянного тока имеет на якоре коллектор, а на статоре кроме главных полюсов с обмоткой возбуждения добавочные полюсы, которые служат для уменьшения искрения под щетками. Статор. На статоре расположены главные полюсы с катушками обмотки возбуждения и добавочные полюсы (на рисунке 1.2 не показаны) с соответствующими катушками. Полюсы крепят болтами к стальному корпусу, который является частью магнитной цепи машины. Главные полюсы (рисунок 1.3) выполняют шихтованными (из стальных штампованных листов), а добавочные полюсы – массивными или также шихтованными. Шихтованная конструкция уменьшает потери в стали и, тем самым, повышает КПД электромашин.

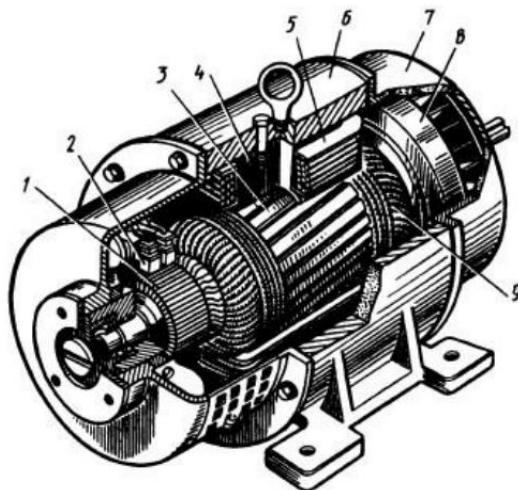


Рисунок 1.2 - Устройство машины постоянного тока:

- 1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – сердечник якоря; 4 – главный полюс;
- 5 – катушки обмотки возбуждения; 6 – корпус (станина);
- 7 – подшипниковый щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

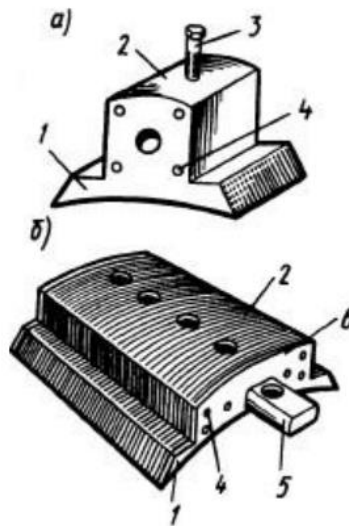


Рисунок 1.3 - Устройство главных полюсов (а, б):

1 – полюсный наконечник; 2 – сердечник полюса; 3 – установочный болт;
4 – заклепки; 5 – установочный стержень; 6 – нажимные щетки

Катушки главных и добавочных полюсов изготавливают из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения. Якорь. Сердечник якоря, так же как в синхронной машине, собирают из изолированных листов электротехнической стали. Обмотка якоря состоит из отдельных, заранее намотанных якорных катушек (рисунок 1.4), которые укладывают в пазы сердечника якоря.

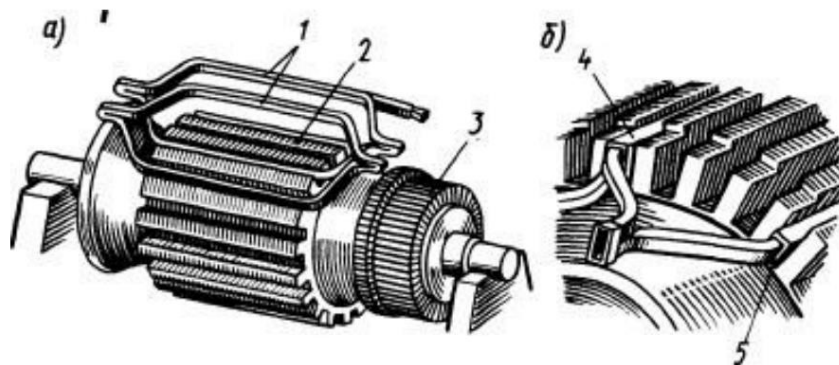


Рисунок 1.4 - Устройство якорных катушек (а) и расположение их в пазах (б):

1 – якорные катушки; 2 – сердечник якоря; 3 – коллектор;
4, 5 – верхняя и нижняя стороны якорной катушки

Обмотку выполняют двухслойной; в каждом пазу укладывают две стороны различных якорных катушек – одну поверх другой. Каждая якорная катушка включает в себя несколько секций, концы которых припаивают к соответствующим коллекторным пластинам; секции могут быть одно- и многовитковыми. Коллектор. Обычно коллектор выполняют в виде цилиндра (рисунок 1.5), собранного из медных пластин; между пластинами располагают изоляционные

прокладки. Секции обмотки якоря впаивают в прорези, имеющиеся в выступающей части коллекторных пластин.

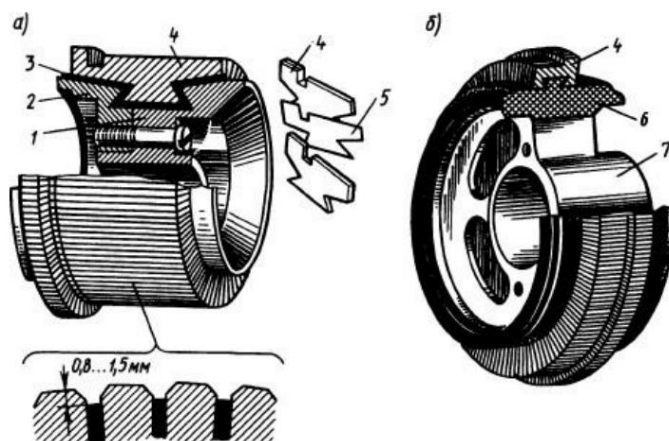


Рисунок 1.5 - Устройство коллектора машины постоянного тока с металлическим (а) и пластмассовым (б) корпусом: 1 – корпус; 2 – нажимной фланец; 3 – изоляционные манжеты; 4 – коллекторные пластины; 5 – изоляционные прокладки; 6 – пластмасса; 7 – втулка

В машинах малой и средней мощности широко применяют коллекторы, в которых медные пластины и миканитовые прокладки запрессованы в пластмассу (рисунок 1.5, б).

Щеточный аппарат. По цилиндрической части коллектора скользят щетки, установленные в щеткодержателях. Щетки представляют собой прямоугольные бруски, изготовленные путем прессовки и термической обработки из материалов, составленных на основе графита. Коллекторно-щеточный узел служит для следующих целей: 1) служит для связи обмоток якоря с внешней цепью; 2) преобразует переменную ЭДС в якоре в постоянное напряжение на щетках, если машина работает в режиме генератора; 3) при работе в режиме двигателя осуществляет обратное преобразование для получения вращающего момента. При этом постоянное напряжение сети преобразуется в переменное на обмотках якоря, что обеспечивает непрерывность вращения.

1.2 Задание

Двигатель постоянного тока включен по схеме на рисунке 1.6. Для номинальных параметров указанных в таблице 1.1, рассчитать согласно варианта следующие данные:

1. потребляемую из сети мощность P_1 ;
2. полезный вращающий момент M ;
3. ток якоря $I_я$;
4. противо-э.д.с. в обмотке якоря $E_{пр}$;
5. суммарные потери мощности ΣP .
6. Пусковой ток двигателя $I_{п}$.

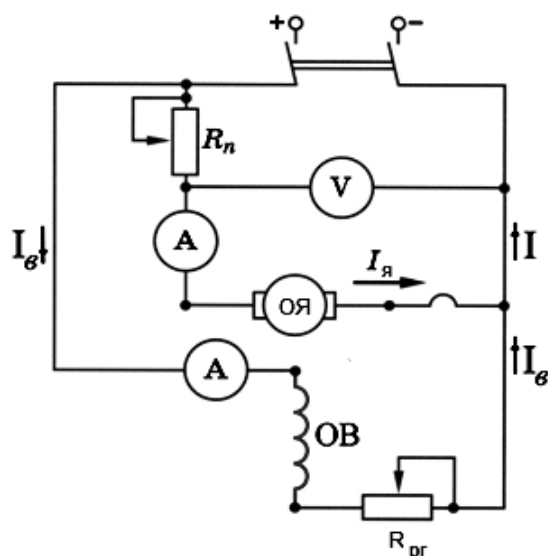


Рисунок 1.6 - Схема подключения двигателя постоянного тока

Таблица 1.1 - Технические данные двигателей серии 2П с высотами оси вращения 90 - 200 мм

вариант	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин		КПД %	Сопротивление обмотки при 15°C, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
			номинальная	максимальная		якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
Тип 2ПН90МУХЛ4, 2ПН90МГУХЛ4									
1	0,17	110	750	3000	47,5	5,84	4,40	610	128
2		220	750	1500	48,5	27,2	16,2	162	514
3	0,25	110	1060	4000	56	3,99	2,55	610	78,7
4		220	1120	2000	57	15,47	11,2	162	297
5	0,37	110	1500	3000	61,5	2,52	1,47	610	48
6		220	1500	2250	61,5	10,61	6,66	162	190
7	0,71	110	2360	4000	69,5	1	0,54	470	18
8		220	2360	3540	70	3,99	2,55	123	79
9	1	110	3000	4000	71,5	0,6	0,35	365	12
10		220	3000	4000	72,5	2,52	1,47	92	48
Тип 2ПН90ЛУХЛ4, 2ПН90ЛГУХЛ4									
11	0,2	110	750	3000	54	4,51	2,99	555	106
12		220	800	1500	54,5	17,5	13,13	145	430
13		110	1060	4000	60	2,85	1,731	555	64,5
14		220	1000	2000	60	12,2	7,96	145	264

вариант	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин		КПД %	Сопротивление обмотки при 15°C, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
			номинальная	максимальная		якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
15	0,55	110	1500	4000	67,5	1,3	0,932	432	33
16		220	1500	4300	67,5	5,44	3,89	112	132
17	0,9	110	2000	4000	73	0,644	0,4	340	14,6
18		220	2120	4000	73	2,85	1,731	87	64
19	1,3	110	3150	4000	76	0,355	0,257	340	8,2
20		220	3150	4000	78	1,3	0,932	87	33
Тип 2ПБ90ЛУХЛ4, 2ПБ90МГУХЛ4									
21	0,13	110	800	3000	49,5	7,48	4,79	810	173
22		220	750	1500	47,5	34,0	20,37	222	694
23	0,18	110	1000	4000	54,5	5,41	3,47	810	122
24		220	1000	2000	55,5	21,77	13,31	222	490

1.3 Методические указания по решению задачи

Электродвигатель постоянного тока с параллельным возбуждением рассчитан на номинальную мощность $P_{НОМ} = 10 \text{ кВт}$ и номинальное напряжение $U_{НОМ} = 220 \text{ В}$. Частота вращения якоря $n = 3000 \text{ об/мин}$.

К.п.д. двигателя $\eta_{ДВ} = 0,72$. Сопротивление обмотки возбуждения $R_B = 85 \text{ Ом}$, сопротивление обмотки якоря $R_Я = 0,3 \text{ Ом}$.

Решение:

1. Мощность, потребляемая двигателем из сети:

$$P_1 = P_{НОМ} / \eta_{ДВ} = 10000 / 0,72 = 13900 \text{ Вт} = 13,9 \text{ кВт}.$$

2. Полезный вращающий момент (на валу):

$$M = 9,55 \cdot P_{НОМ} / n = 9,55 \cdot 10 \cdot 1000 / 3000 = 31,9 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

3. Для определения тока якоря предварительно находим ток возбуждения:

$$I_B = U_{НОМ} / R_B = 220 / 85 = 2,6 \text{ А}.$$

Ток двигателя

$$I = P_1 / U_{НОМ} = 13,9 / 220 = 63 \text{ А}.$$

Ток якоря

$$I_{\text{Я}} = I - I_{\text{В}} = 63 - 2,6 = 60,4 \text{ А.}$$

4. Противо-э.д.с. в обмотке якоря:

$$E_{\text{ПР}} = U_{\text{ном}} - (I_{\text{Я}} \cdot R_{\text{Я}}) = 220 - (60,4 \cdot 0,3) = 202 \text{ В.}$$

5. Суммарные потери в двигателе:

$$\Sigma P = P_1 - P_{\text{НОМ}} = 13,9 - 10 = 3,9 \text{ кВт.}$$

6. Т.к. ЭДС при пуске равна 0, пусковой ток двигателя определяется:

$$I_{\text{П}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{Я}} = 220 / 0,3 = 733 \text{ А.}$$

1.4 Контрольные вопросы

1. Назначение машин постоянного тока?
2. Принцип действия машин постоянного тока?
3. Устройство электрической машины постоянного тока?
4. Электродвижущая сила машин постоянного тока?
5. Электромагнитный момент машины постоянного тока?
6. Схемы включения электродвигателей постоянного тока?
7. Регулирование скорости электродвигателей постоянного тока
8. Преимущества и недостатки машин постоянного тока в сравнении с машинами переменного тока?
9. В чем заключается главная особенность машин постоянного тока?
10. Почему полюсы, а также сердечник якоря машин постоянного тока выполняются «шихтованными», то есть состоящими из отдельных листов электротехнической стали?
11. Для каких целей служит коллекторно-щеточный узел в машинах постоянного тока?
12. На каком принципе основана работа машины постоянного тока? Чем принципиально генератор постоянного тока отличается от электродвигателя постоянного тока?
13. Дать понятие естественной и искусственной характеристик двигателя постоянного тока.
14. Каким способом можно осуществлять регулирование скорости электродвигателей постоянного тока?

2 Параметры и характеристики однофазного трансформатора

2.1 Общие сведения

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, имеющее две или больше индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

С помощью трансформаторов выполняются следующие функции:

- 1) повышается или понижается напряжение;
- 2) изменяется число фаз;
- 3) преобразуется частота переменного тока.

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток (рисунок 2.1), размещенных на замкнутом магнитопроводе, выполненном из ферромагнитного материала. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, т. е. уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток машины.

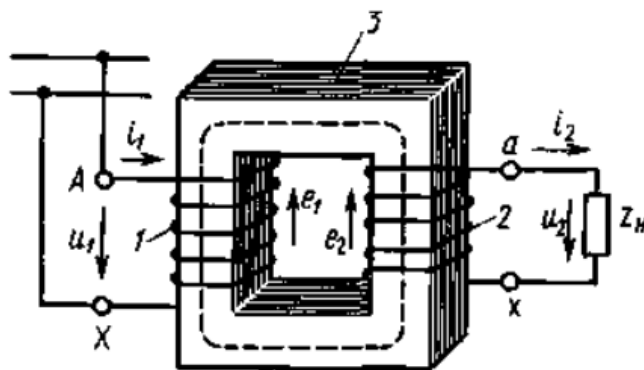


Рисунок 2.1 - Электромагнитная система однофазного трансформатора:
1, 2 – первичная и вторичная обмотки; 3 – магнитопровод

Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока – электрической сети с напряжением u_1 . К вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки Z_H . Обмотку более высокого напряжения называют обмоткой высшего напряжения (ВН), а низкого напряжения – обмоткой низшего напряжения (НН). Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами А и Х; обмотки НН – буквами а и х.

При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток i_1 который создает переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток Φ индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС – e_1 и e_2 , пропорциональные, согласно закону электромагнитной индукции, числами витков w_1 и w_2 соответствующей обмотки и скорости изменения потока $d\Phi/dt$. Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке, $e_1 = -w_1 \cdot (d\Phi/dt)$; $e_2 = -w_2 \cdot (d\Phi/dt)$

Отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяются выражением (2.1):

$$E_1/E_2 = e_1/e_2 = w_1/w_2 \quad (2.1)$$

где E_1 и E_2 – действующие значения ЭДС в первичной и вторичной обмотках, В;

e_1 и e_2 – мгновенные значения ЭДС в первичной и вторичной обмотках, В;

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3...5% от номинальных значений напряжений U_1 и U_2 , и считать $E_1 \approx U_1$ и $E_2 \approx U_2$, то получим:

$$U_1/U_2 = w_1/w_2 \quad (2.2)$$

Следовательно, подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, при заданном напряжении U_1 можно получить желаемое напряжение U_2 . Если необходимо повысить вторичное напряжение, то число витков w_2 берут больше числа w_1 ; такой трансформатор называют повышающим. Если требуется уменьшить напряжение U_2 , то число витков w_2 берут меньшим w_1 , такой трансформатор называют понижающим.

В зависимости от конфигурации магнитной системы трансформаторы подразделяют на стержневые (рисунок 2.2, а), броневые (рисунок 2.2, б) и тороидальные (рисунок 2.2, в). Стержнем называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. Ярмом называют часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.

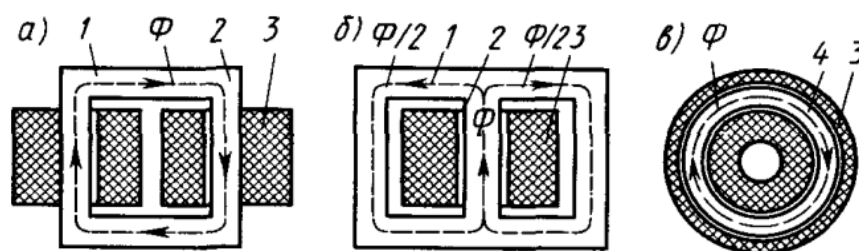


Рисунок 2.2 Основные типы однофазных трансформаторов:
Стержневой (а); броневой (б); тороидальный (в). 1 – ярмо; 2 – стержень;
3 – обмотки; 4 – тороидальный магнитопровод

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов (рисунок 2.3) собираются из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,28...0,5 мм при частоте 50 Гц.

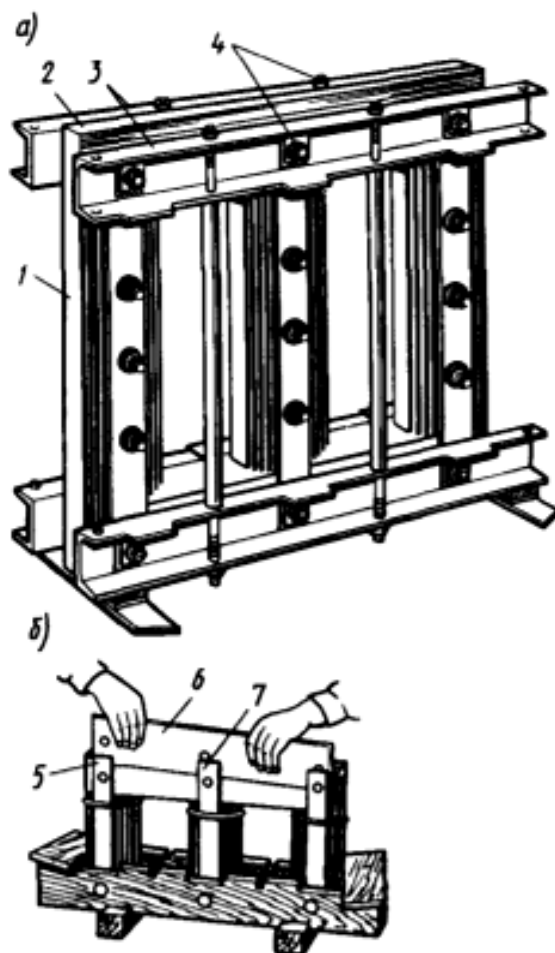


Рисунок 2.3 - Магнитная система силового трансформатора: а) общий вид: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – опорные балки; 4 – стяжные шпильки

По способу сборки различают стыковые и шихтованные магнитопроводы. В стыковых магнитопроводах стержни и ярма собирают и скрепляют отдельно, затем устанавливают встык и соединяют между собой. В месте стыка во избежание замыкания листов устанавливают изоляционные прокладки.

В шихтованных магнитопроводах ярма и стержни собирают как цельную конструкцию с взаимным перекрытием отдельных слоев в месте стыка («впереплет»). Каждый слой состоит из двух-трех листов. При сборке магнитопровода листы в двух смежных слоях располагают так, что листы каждого последующего слоя перекрывают стык в листах предыдущего слоя, существенно уменьшая магнитное сопротивление в месте сочленения. После сборки магнитопровода листы верхнего ярма вынимают, на стержни устанавливают катушки и ярмо снова ставят на место. Шихтованные магнитопроводы имеют значительно меньшее магнитное сопротивление, чем стыковые; поэтому последние (стыковые магнитопроводы) применяют сейчас только в микротрансформаторах. Обмотки трансформаторов Совокупность витков, образующих электрическую цепь, в которой суммируются ЭДС, наведенные в отдельных витках, называют обмоткой трансформатора. Обмотка состоит из проводников и изоляционных деталей, защища-

ющих витки от электрического пробоя, препятствующих их смещению под действием электромагнитных сил и создающих каналы для охлаждения. Обмотки трансформаторов различаются взаимным расположением на стержне, направлением и способом намотки, числом витков, классом напряжения, схемой соединения концов обмоток между собой. Начала и концы обмоток НН трехфазных трансформаторов обозначают буквами «а», «в», «с» (начала) и «х», «у», «z» (концы), обмоток ВН – соответственно «А», «В», «С» и «Х», «У», «Z». Обмотки, располагающиеся на стержнях, делятся на два типа – концентрические и чередующиеся, в зависимости от их взаимного расположения (рисунок 2.4).

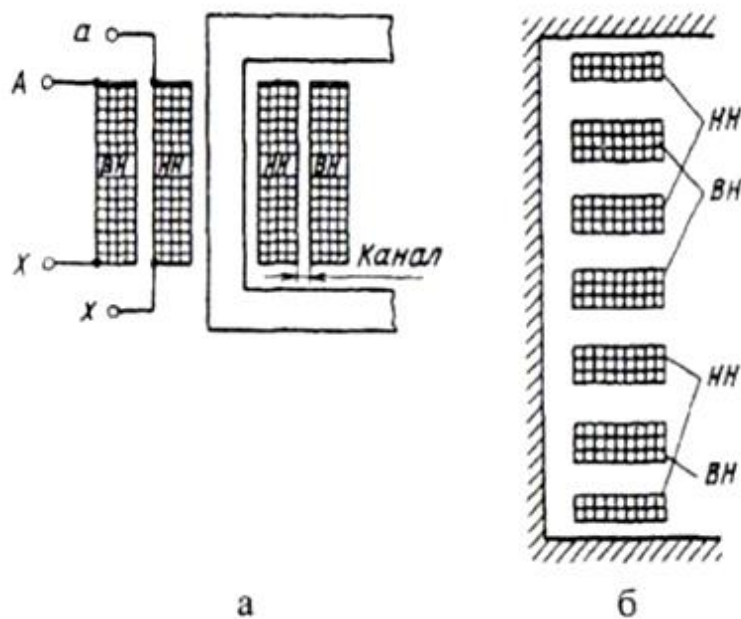


Рисунок 2.4 – Концентрические (а) и чередующиеся (б) обмотки

Концентрические обмотки изготавливаются в виде цилиндров, расположенных один в другом на стержне магнитопровода. Чередующиеся обмотки НН и ВН трансформатора располагают в осевом направлении на стержне магнитопровода. Чередующаяся обмотка обычно подразделяется на симметричные группы, каждая из которых состоит из одной или нескольких частей обмотки ВН и расположенных по обе стороны от них частей обмотки НН. Чередующиеся обмотки применяют только в специальных трансформаторах (например, электропечных, испытательных). Наиболее распространены концентрические обмотки. Обычно первой на стержне располагают обмотку НН для уменьшения расходов на изоляцию обмотки относительно стержня. Если первой на стержне разместить обмотку высшего напряжения (ВН), то надо значительно увеличивать толщину изоляции между этой обмоткой и магнитопроводом из-за возможности электрического пробоя. По конструкции и способу намотки обмотки делятся на три типа: 1) цилиндрические (одно- или многослойные); 2) винтовые; 3) катушечные. Обмотку, состоящую из расположенного на цилиндрической поверхности слоя вит-

ков без промежутков, называют цилиндрической. Винтовая состоит из ряда витков, следующих один за другим по винтовой линии с каналами между ними. Группу последовательно соединенных витков, наматываемых в виде плоской спирали и отделенную от других таких же групп, называют катушкой, а обмотку, состоящую из ряда катушек, расположенных в осевом направлении, катушечной. Катушечные обмотки могут быть дисковыми и непрерывными. Дисковая обмотка набирается из отдельно намотанных катушек, которые соединяют друг с другом электрической пайкой или другим способом. Непрерывная обмотка наматывается без разрывов, т. е. переход из одной катушки в другую производится без паек. Для этого при намотке переключают витки каждой нечетной катушки так, чтобы один переход (из катушки в катушку) был снаружи обмотки, а другой – внутри.

2.2 Задание

Однофазный двухобмоточный трансформатор включен в сеть с напряжением $U = U_{1н}$. Величины, характеризующие номинальный режим работы трансформатора, приведены в таблице 1: полная мощность S_H ; первичное номинальное линейное напряжение $U_{1н}$, вторичное номинальное линейное напряжение $U_{2н}$; напряжение короткого замыкания u_k , мощность потерь короткого замыкания (при номинальном токе) $P_{кн}$. Кроме того, заданы значения тока холостого хода I_{10} (в % от номинального), мощность потерь холостого хода P_{10} .

Таблица 2.1- Исходные данные для задачи

№ варианта	S_H кВА	$U_{1н}$, кВ	$U_{2н}$, кВ	u_k , %	I_{10} , %	P_{10} , Вт	$P_{кн}$, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
1	8	10	0,4	2,6	3,2	41	230
2	13	10	0,4	2,7	3,0	60	333
3	21	10	0,4	2,7	2,8	88	426
4	21	20	0,4	3,1	2,8	96	426
5	33	10	0,4	2,7	2,6	121	756
6	33	35	0,4	3,8	2,6	155	756
7	53	10	0,4	3,8	2,4	180	1033
8	53	35	0,4	3,9	2,4	220	1033
9	83	10	0,4	3,8	2,4	260	1400
10	83	35	0,4	3,9	2,3	320	1400
11	133	10	0,4	2,6	2,1	360	1833
12	133	35	0,4	3,8	2,1	450	1833
13	210	10	0,4	3,2	2,0	626	2533

Продолжение таблицы 2.1

№ варианта	SH кВА	U1н, кВ	U2н, кВ	ик, %	I10, %	P10, Вт	Pкн, Вт
14	210	35	0,4	3,8	2,0	666	2833
15	21	20	0,4	3,1	4,4	130	426
16	53	20	0,4	3,8	4,0	243	846
17	83	20	0,4	3,8	3,7	350	1193
18	133	20	0,4	3,7	3,3	510	1726
19	210	20	0,4	3,7	3,2	700	2446
20	333	10	0,4	3,2	1,4	816	4066
21	333	35	0,4	3,8	1,5	916	4066
22	533	10	0,4	3,2	1,3	1100	6000
23	533	35	0,4	3,8	1,4	1216	600
24	833	10	0,4	3,8	1,0	1533	7833
25	833	36	0,4	3,8	1,1	1700	7833
26	8	10	0,4	2,3	3,0	40	226
27	13	10	0,4	2,6	3,0	56	323
28	21	10	0,4	2,6	2,8	83	383
29	21	20	0,4	3,1	2,8	90	383
30	33	10	0,4	3,0	2,5	116	733
31	33	35	0,4	3,8	2,5	150	733
32	53	10	0,4	3,8	2,3	176	966
33	53	35	0,4	3,8	2,3	216	1000
34	83	10	0,4	3,8	2,3	250	1300
35	83	35	0,4	3,9	2,3	316	1300
36	133	10	0,4	2,6	2,3	350	2133
37	133	10	0,4	3,8	2,1	433	1800
38	210	10	0,4	3,2	2,0	533	2500
39	210	35	0,4	3,8	2,0	633	2800
40	21	20	0,4	3,1	4,3	126	416
41	53	20	0,4	3,8	4,0	240	833
42	83	20	0,4	3,8	3,6	316	1133
43	133	20	0,4	3,5	3,4	500	1666
44	210	20	0,4	3,7	3,1	700	2433
45	333	10	0,4	3,1	1,5	816	4066
46	333	35	0,4	3,7	1,5	900	4066
47	533	10	0,4	3,2	1,3	1100	633
48	533	35	0,4	3,8	1,4	1216	6000
49	833	10	0,4	3,2	1,0	1533	7833
50	833	35	0,4	3,8	1,1	1700	7833

1. Определите параметры Т-образной схемы замещения трансформатора (сопротивления $R_1, R_2', X_1, X_2', R_{10}, X_{10}$), считая ее симметричной ($R_1 = R_2'; X_1 = X_2'$). Изобразите схему замещения. Укажите на ней сопротивления, токи, напряжения и ЭДС.

2. Постройте векторную диаграмму трансформатора при активной номинальной нагрузке.

3. Рассчитайте и постройте внешние характеристики трансформатора:

а) при активной нагрузке $\cos\varphi=1$;

б) при активно-индуктивной нагрузке $\cos\varphi=0,8$.

в) при активно-емкостной нагрузке $\cos\varphi=0,8$.

4. Рассчитать и построить зависимости КПД трансформатора от нагрузки:

а) при активной нагрузке $\cos\varphi=1$;

б) при активно-реактивной нагрузке $\cos\varphi=0,8$.

5. Найти номинальные токи I_{1H}, I_{2H} , коэффициент загрузки, при котором наступает максимум КПД. Рассчитайте сечение проводников обмоток, если плотность тока в них 4 A/мм^2 .

2.3 Методические указания по решению задачи

Трёхфазный двухобмоточный трансформатор включён в сеть с напряжением $U=U_{1H}$. Величины, характеризующие номинальный режим работы трансформатора: полная мощность $S=40 \text{ кВА}$; первичное номинальное фазное напряжение $U_{1H}=10 \text{ кВ}$; вторичное номинальное фазное напряжение $U_{2H}=0,4 \text{ кВ}$. Кроме того, заданы значения тока холостого хода $I_{10}=3 \%$, мощность потерь холостого хода $P_{10}=180 \text{ Вт}$, напряжение короткого замыкания $u_k=4,7 \%$, мощность потерь короткого замыкания (при номинальном токе) $P_{кз}=999 \text{ Вт}$.

Содержание задания

1) Определите параметры Т-образной схемы замещения трансформатора (сопротивления $R_1, R_2', X_1, X_2', R_{10}, X_{10}$), считая ее симметричной ($R_1 = R_2'; X_1 = X_2'$). Изобразите схему замещения. Укажите на ней сопротивления, токи, напряжения и ЭДС.

2) Постройте векторную диаграмму трансформатора при активной номинальной нагрузке.

3) Рассчитайте и постройте внешние характеристики трансформатора:

а) при активной нагрузке $\cos\varphi=1$;

б) при активно-индуктивной нагрузке $\cos\varphi=0,8$;

в) при активно-емкостной нагрузке $\cos\varphi=0,8$.

4) Рассчитайте и постройте зависимости КПД трансформатора от нагрузки при:

а) при активной нагрузке $\cos\varphi=1$;

б) при активно-реактивной нагрузке $\cos\varphi=0,8$.

5) Найти коэффициент загрузки, при котором наступает максимум КПД.

Определение параметров Т-образной схемы замещения трансформатора

Чертим Т-образную схему замещения трансформатора (рисунок 2.5).

На схеме: R_1, R_2' - активные сопротивления первичной обмотки и приведенное вторичной обмотки, X_1, X_2' - внутренние реактивные сопротивления первичной обмотки и приведенное вторичной обмотки, R_{12}, X_{12} - активное и реактивное сопротивления магнитной цепи, I_1, I_2' - токи первичной обмотки и приведенный ток вторичной, I_{10} - ток контура намагничивания.

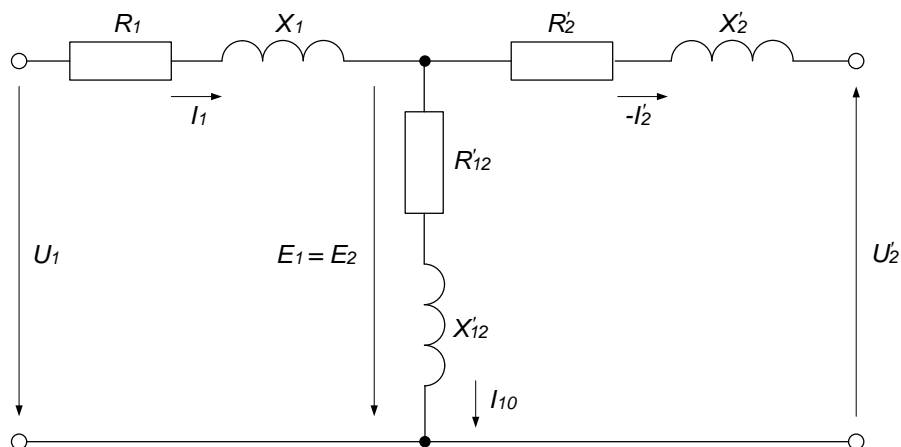


Рисунок 2.5 - Т-образная схема замещения трансформатора

В режиме короткого замыкания можно использовать упрощенную схему замещения (рисунок 2.6).

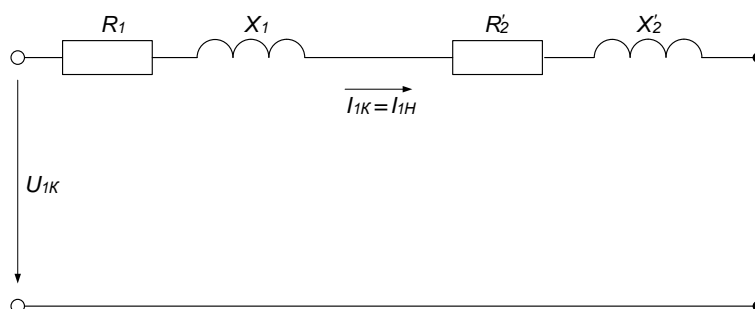


Рисунок 2.6 - Упрощенная схема замещения трансформатора

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора

$$I_{1H} = I_{1K} = \frac{S_H}{3 \cdot U_{1H}},$$

$$I_{1K} = \frac{40}{3 \cdot 10} = 1,33 \text{ A}.$$

Абсолютное значение напряжения короткого замыкания

$$U_{1K} = \frac{u_K \%}{100\%} U_{1H},$$

$$U_{1K} = \frac{4,7}{100} \cdot 10000 = 470B.$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1H}},$$

$$Z_K = \frac{470}{1,33} = 353,40M.$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_K = \frac{P_{KH}}{3I_{1K}^2},$$

$$R_K = R_1 + R_2' = \frac{999}{3 \cdot 1,33^2} = 125,20M.$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания трансформатора найдем из треугольника сопротивлений

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

$$X_K = X_1 + X_2' = \sqrt{353,4^2 - 125,2^2} = 330,80M.$$

По условию задания трансформатор симметричный, значит $R_1 = R_2'$ и $X_1 = X_2'$, тогда внутренние сопротивления обмоток:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2} = \frac{125,2}{2} = 62,60M;$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_K}{2} = \frac{330,8}{2} = 165,4 \text{ Ом}.$$

В режиме холостого хода схема замещения трансформатора изображена на рисунке 2.7.

Абсолютное значение тока холостого хода трансформатора:

$$I_{10} = \frac{I_{10} \% \cdot I_{1H}}{100\%},$$

$$I_{10} = \frac{3 \cdot 1,33}{100} = 0,04 \text{ А}.$$

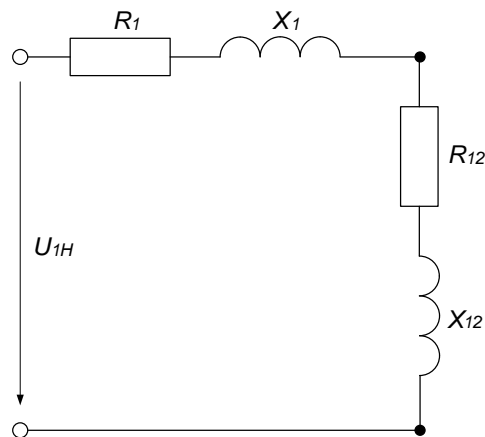


Рисунок 2.7 - Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

Полное сопротивление холостого хода

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{10}},$$

$$Z_0 = \frac{10000}{0,04} = 250000 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление холостого хода:

$$R_0 = R_1 + R_{12} = \frac{P_{10}}{I_{10}^2},$$

$$R_0 = R_1 + R_{12} = \frac{180}{0,04^2} = 112500 \text{ Ом} .$$

Реактивное сопротивление холостого хода трансформатора найдем из треугольника сопротивлений

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} ,$$

$$X_0 = X_1 + X_{12} = \sqrt{250000^2 - 112500^2} = 223257 \text{ Ом} .$$

Согласно схеме замещения трансформатора на холостом ходу параметры эквивалентной магнитной цепи трансформатора

$$R_{12} = R_0 - R_1 = 112500 - 62,6 = 112437,4 \text{ Ом} ,$$

$$X_{12} = X_0 - X_1 = 223257 - 165,4 = 223091,6 \text{ Ом} .$$

Рассчитанные сопротивления схемы замещения;

$$R_1 = R'_2 = 62,6 \text{ Ом} ; \quad X_1 = X_2 = 165,4 \text{ Ом} ;$$

$$R_{12} = 112437,4 \text{ Ом} ; \quad X_{12} = 223091,6 \text{ Ом} .$$

Построение векторной диаграммы при активной номинальной нагрузке

Определяем номинальные токи трансформатора:

В первичной обмотке

$$I_{1H} = \frac{S_H}{3U_{1H}} ,$$

$$I_{1H} = \frac{40}{3 \cdot 10} = 1,33 \text{ А} ;$$

Во вторичной обмотке

$$I_{2H} = \frac{S_H}{3U_{2H}} ,$$

$$I_{2H} = \frac{40}{3 \cdot 0,4} = 33,33 \text{ A} .$$

Коэффициент трансформации

$$k \approx \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{10}{0,4} = 25$$

Падение напряжений в первичной обмотке при номинальной нагрузке:

активное $\Delta U_{1a} = I_{1H} \cdot R_1 = 1,33 \cdot 62,6 = 83,26 \text{ B} ;$

реактивное $\Delta U_{1p} = I_{1H} \cdot X_1 = 1,33 \cdot 165,4 = 220 \text{ B} .$

Приведенные значения падения напряжений во вторичной обмотке при номинальной нагрузке:

активное

$$\Delta U'_{2a} = I_{1H} \cdot R'_2 = 1,33 \cdot 62,6 = 83,26 \text{ B} ;$$

реактивное

$$\Delta U'_{2p} = I_{1H} \cdot X'_2 = 1,33 \cdot 165,4 = 220 \text{ B} .$$

Угол потерь δ в магнитопроводе трансформатора (угол между магнитным потоком и током холостого хода)

$$\delta = \arctg\left(\frac{R_{12}}{X_{12}}\right) ,$$

$$\delta = \arctg\left(\frac{112437,4}{223091,6}\right) = \arctg 0,504 = 26,7^\circ .$$

ЭДС первичной обмотки:

$$E_1 = E'_2 = I_{10} \sqrt{R_{12}^2 + X_{12}^2} ,$$

$$E_1 = E'_2 = 0,04 \sqrt{112437,4^2 + 223091,6^2} = 9993 \text{ B} .$$

Номинальное сопротивление нагрузки

$$R'_H = \frac{U'_2}{I'_2} \approx \frac{U_1}{I_1} = \frac{10000}{1,33} = 7518,8 \text{ Ом}.$$

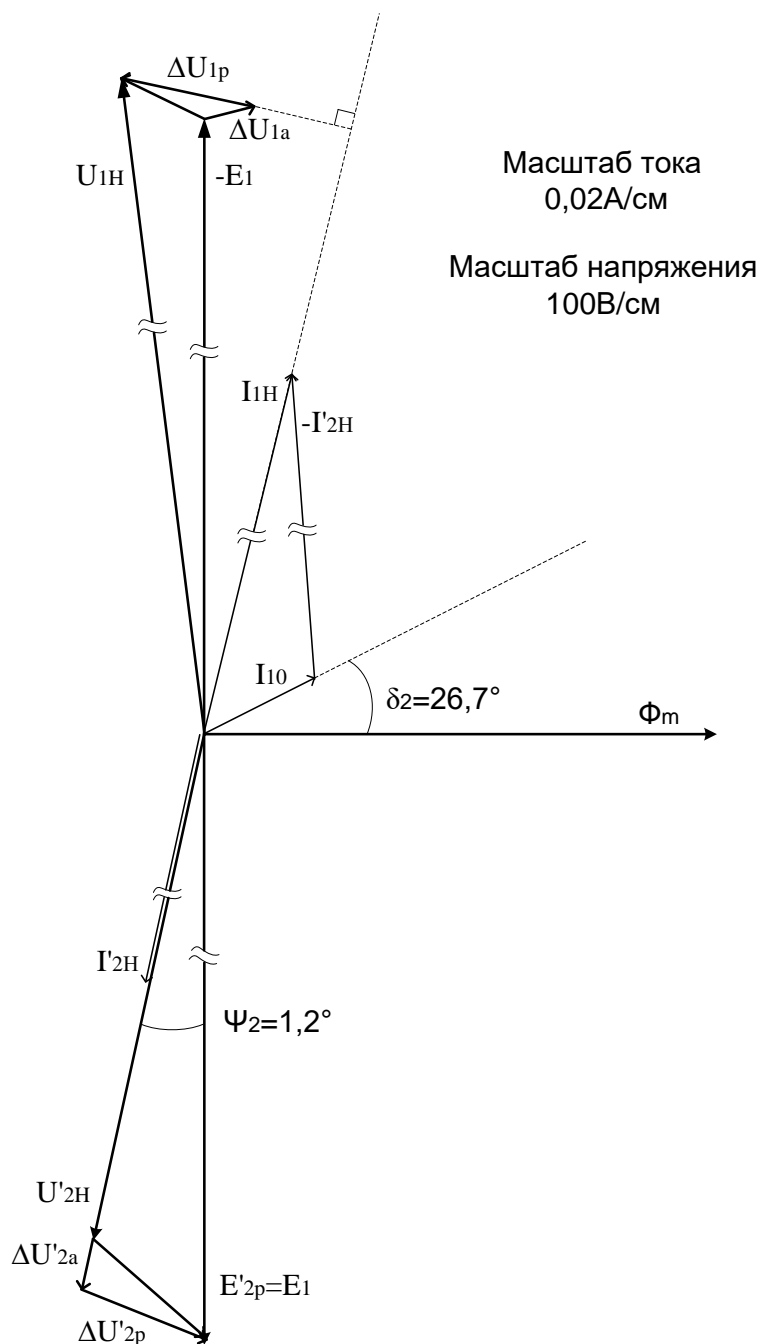


Рисунок 2.8 - Векторная диаграмма трансформатора

Угол сдвига фаз, на который вектор ЭДС вторичной обмотки E'_2 опережает вектор приведенного тока вторичной обмотки I'_{2H}

$$\psi_2 = \arctg \frac{X'_2}{R'_2 + R'_H} = \arctg \frac{165,4}{62,6 + 7518,8} = \arctg 0,0218 = 1,2^\circ.$$

Построение векторной диаграммы начинаем с вектора магнитного потока Φ_m , направляя его вправо по горизонтали. Перпендикулярно ему под углом 90° откладываем вектор ЭДС вторичной обмотки E'_2 . Для дальнейших построений откладываем вектор $-E'_1$. Под углом ψ_2 проводим вектор тока вторичной обмотки I_{2H} который совпадает по направлению с напряжением вторичной обмотки U_2 т.к. нагрузка активная. Вектор тока холостого хода откладываем под углом δ к вектору Φ_m .

Используя соотношение для токов $I_1 = -I'_{2H} + I_{10}$, из конца вектора откладываем $-I'_{2H}$, вектор I_{1H} получаем как их сумму.

Согласно выражения $U'_2 = E'_2 - I'_{2H}R'_2 - jI'_{2H}X'_2 = E'_2 - \Delta U'_{2a} - \Delta U'_{2p}$ откладываем вектора падения напряжений $\Delta U'_{2a}$ (против направления тока I'_{2H}) и $\Delta U'_{2p}$ (перпендикулярно вектору I'_{2H}).

Вектор напряжения первичной обмотки строим исходя из соотношения $U_1 = -E_1 + I_1R_1 + jI_1X_1 = -E_1 + \Delta U_{1a} + \Delta U_{1p}$ как сумму векторов.

Построение внешней характеристики трансформатора

Внешние характеристики трансформатора являются прямыми линиями, их строим по двум точкам — точке холостого хода (коэффициент нагрузки $K_3 = 0$; $U_2 = U_{2H}$ и номинальной точке ($K_3 = 1$), для которой рассчитаем выходное напряжение.

Падение напряжения рассчитываем по формуле

$$\Delta U \% = K_3 (U_K \% \cos \varphi_K \cos \varphi_2 + U_K \% \sin \varphi_K \sin \varphi_2),$$

где $K_3 = I_2/I_{2H}$ - коэффициент загрузки трансформатора,

$$\cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_K} = \frac{125,2}{353,4} = 0,35,$$

$$\sin \varphi_K = \frac{X_K}{Z_K} = \frac{330,8}{353,4} = 0,936.$$

Тогда абсолютное значение выходного напряжения

$$U_2 = \frac{1 - \Delta U\%}{100\%} U_{2H}$$

Результаты вычислений для трех случаев (по заданию) сведем в таблицу 2.2

Таблица 2.2 - Результаты расчета внешних характеристик трансформатора

Характер нагрузки	$\cos\varphi_2$	$\sin\varphi_2$	$\Delta U\%$	U_2, B
Активная	1	0	1,645	393,42
Активно-индуктивная	0,8	0,6	3,96	384,16
Активно-емкостная	0,8	-0,6	-1,32	405,28

Внешние характеристики изображены на рисунке 2.9.

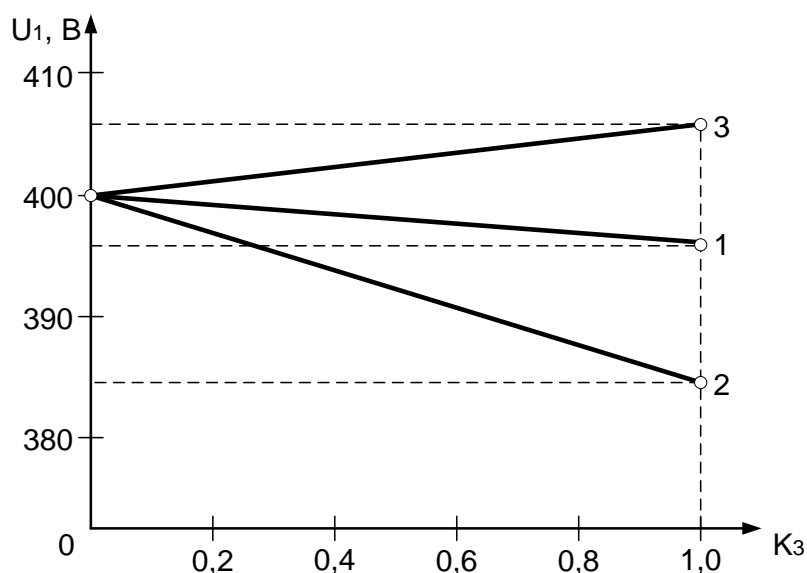


Рисунок 2.9 - Внешние характеристики трансформатора:

- 1 – $\cos\varphi_2 = 1$ (активная нагрузка);
- 2 – $\cos\varphi_2 = 0,8$ (активно-индуктивная нагрузка);
- 3 – $\cos\varphi_2 = 0,8$ (активно-емкостная нагрузка).

Построение зависимости КПД трансформатора от нагрузки

КПД трансформатора определяем методом отдельных потерь по формуле:

$$\eta = \frac{K_3 S_H \cos \varphi_2}{K_3 S_H \cos \varphi_2 + P_0 + K_3^2 P_{K.H}}$$

$$P_{cm} = P_0 = 180 \text{ Вт.}$$

Рассчитаем значения КПД при различном коэффициенте нагрузки для случая активной и активно-реактивной $\cos\varphi_2 = 0,8$ нагрузки.

Результаты вычислений сведем в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Результаты расчета зависимости КПД трансформатора от нагрузки

K	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	0,424
η_1	0	0,973	0,979	0,978	0,975	0,971	0,967	0,979
$\eta_{0,8}$	0	0,967	0,974	0,972	0,969	0,964	0,959	0,974

Графики зависимости КПД трансформатора от нагрузки изображены на рисунке 2.10.

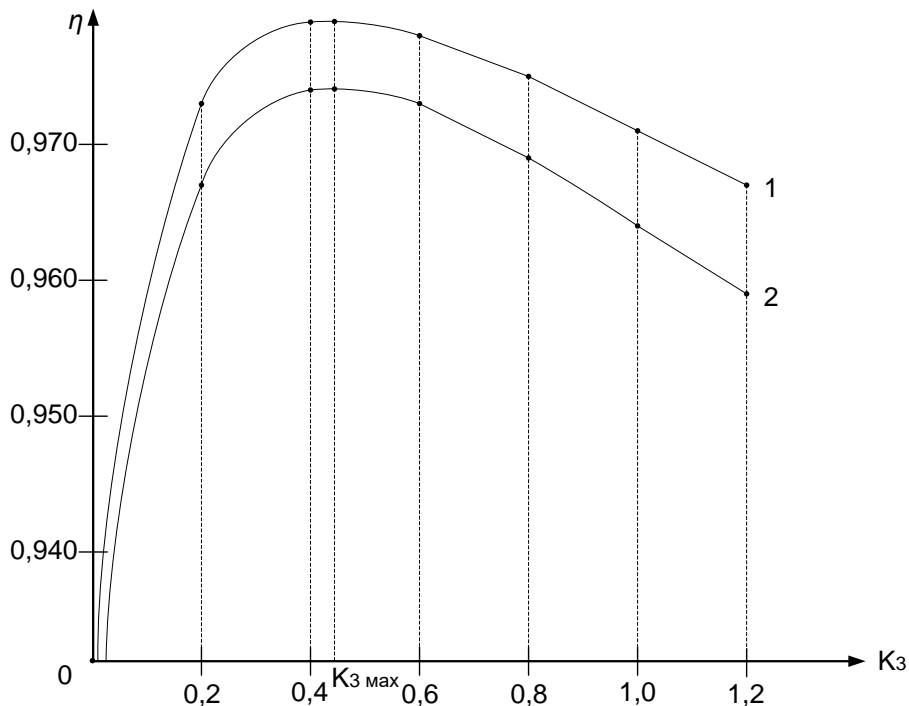


Рисунок 2.10 - Графики зависимости КПД трансформатора от нагрузки:
1 - при $\cos\varphi_2 = 1$; 2 - при $\cos\varphi_2 = 0,8$

Максимум КПД трансформатора будет при:

$$K_{3\max} = \sqrt{\frac{P_{cm}}{P_{м.н}}} = \sqrt{\frac{180}{999}} = 0,424 .$$

Максимальные значения КПД внесены в таблицу 2.3.

2.4 Контрольные вопросы

1. Трансформаторы. Определение и назначение
2. Области применения трансформаторов.
3. Какие трансформаторы относятся к «силовым» трансформаторам?
4. Привести и объяснить электромагнитную схему однофазного трансформатора.
5. Обозначение и маркировка обмоток высшего и низшего напряжения трансформаторов.
6. Принцип действия трансформаторов.
7. Коэффициент трансформации трансформаторов
8. Магнитная система трансформатора, назначение и устройство.
9. Обмотки трансформатора, назначение и устройство.
10. Основные потери мощности в трансформаторе, где они возникают и от чего они зависят?
11. КПД трансформатора, основные формулы и зависимости.
12. Что такое коэффициент загрузки трансформатора и как он определяется?

3 Группы соединений и параллельная работа трансформаторов

3.1 Общие сведения

Преобразование трехфазного тока можно осуществлять с помощью группы из трех однофазных трансформаторов или посредством одного трехстержневого трехфазного трансформатора. Обычно используют трехстержневые трансформаторы. Только при очень больших мощностях (более 10 МВА в фазе) в ряде случаев применяют группы из трех однофазных трансформаторов, которые имеют существенные преимущества при транспортировке и монтаже (мощные высоковольтные трехфазные трансформаторы нетранспортабельны).

Первичная и вторичная обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены по схемам «звезда», «звезда с выведенной нулевой точкой», «треугольник» или «зигзаг с выведенной нулевой точкой». Обычно обмотку высшего напряжения соединяют по схеме «звезда», что позволяет при заданном линейном напряжении иметь меньшее число витков в фазе. Схему соединения «звезда» обозначают знаком Y , русской буквой $У$ или латинской Y ; схему «треугольник» – знаком Δ или русской буквой $Д$; схему «зигзаг» – латинской буквой Z . Если нулевая точка обмотки выведена из трансформатора, то у буквенного обозначения ставят индекс «н». Начала и концы обмотки ВН обозначают А, В, С и X, У, Z; для обмотки НН – а, b, с и x, у, z; вывод нулевой точки – О (для ВН) и о (для НН). Схемы соединения обмоток силовых трансформаторов, применяемых в России, приведены в таблице 3.1.

Трехфазные трансформаторы характеризуются фазными и линейными коэффициентами трансформации.

Фазный коэффициент равен отношению числа витков $w_{вн}$ фазы обмотки ВН к числу витков $w_{нн}$ фазы обмотки НН или отношению фазных напряжений этих обмоток в режиме холостого хода:

$$k_{\phi} = \frac{w_{вн}}{w_{нн}} = \frac{U_{оф.вн}}{U_{оф.нн}} \quad \text{ë} \quad (3.1)$$

Линейный коэффициент равен отношению линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН в режиме холостого хода:

$$k_{л} = \frac{U_{ол.вн}}{U_{ол.нн}} \quad (3.2)$$

Фазные ЭДС двух обмоток, расположенных на одном и том же стержне, могут так же, как и в однофазных трансформаторах, совпадать или быть противоположными по фазе. В зависимости от схемы соединения обмоток (Y и Δ) и порядка соединения их начал и концов получаются различные углы сдвига фаз между линейными напряжениями. Для примера на рисунке 3.1 показаны схемы

соединения обмоток Y/Y и соответствующие векторные диаграммы для нулевой (а) и шестой (б) групп; на рисунке 3.2 показаны схемы соединения обмоток Y/ Δ и соответствующие векторные диаграммы для одиннадцатой (а) и пятой (б) групп.

Таблица 3.1 - Схемы соединения обмоток трансформаторов

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				Y/Y _H -0
				Y/D-11
				Y _H /D-11
				Y/Z _H -11
				D/Y _H -11

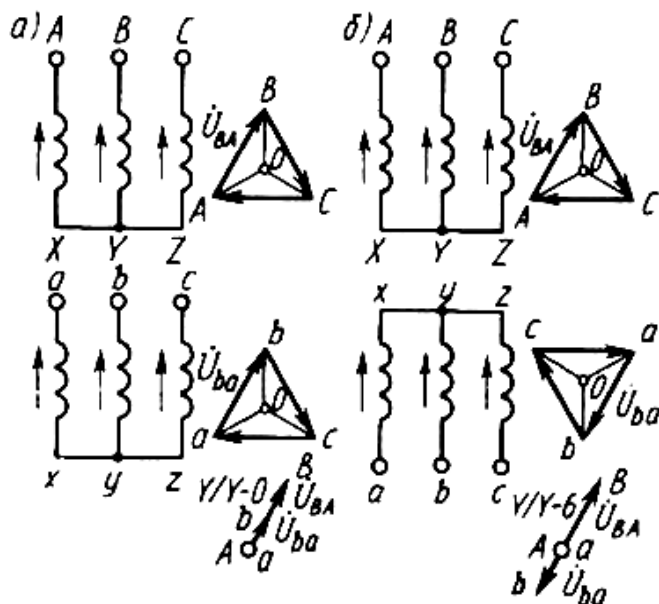


Рисунок 3.1 - Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/Y

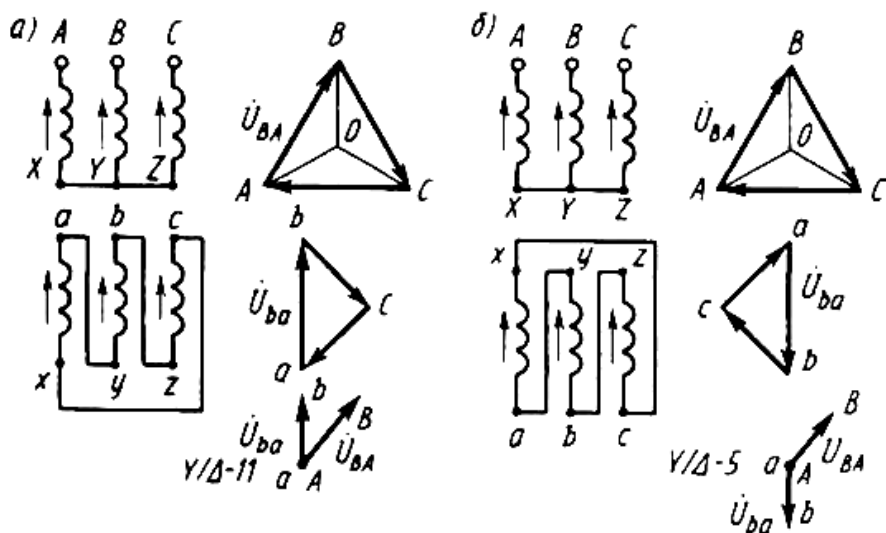


Рисунок 3.2 - Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/Δ

Изменяя маркировку выводов обмоток можно получить и другие группы соединений: при схеме Y/Y – четные: вторую, четвертую и т. д., при схеме Y/Δ – нечетные: первую, третью и др. Согласно ГОСТу, отечественная промышленность выпускает трехфазные силовые трансформаторы только двух групп: нулевой и одиннадцатой. Это облегчает практическое включение трансформаторов на параллельную работу.

При соединении обмотки НН по схеме Z_н, а обмотки ВН по схеме Y (рисунок 3.3) фазные напряжения обмотки НН сдвинуты относительно соответствующих фазных напряжений обмотки ВН (например, U_{a10} относительно U_{A0}) на угол 330°, т. е. при таком соединении имеем одиннадцатую группу. Это объясняется тем, что между векторами линейных напряжений (не показанных на рисунке 3.3) имеется такой же угол

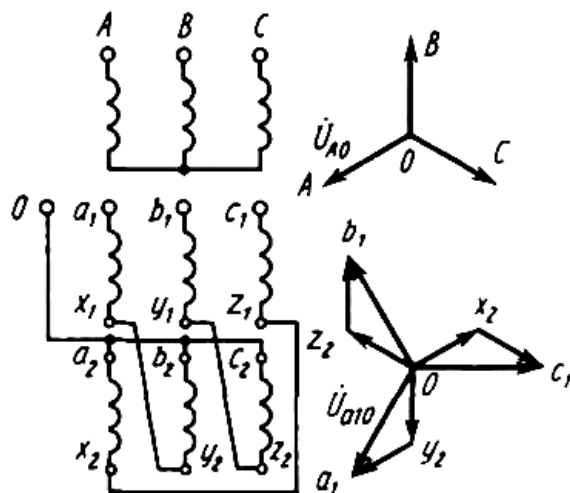


Рисунок 3.3 - Группа соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/Z_н

В большинстве случаев при значительной мощности электрической установки целесообразно иметь не один, а несколько трансформаторов меньшей мощности, включенных параллельно на общую нагрузку. Такое дробление общей трансформаторной мощности позволяет лучше решать проблему энергообеспечения потребителей, отключать часть трансформаторов при уменьшении нагрузки, проще проводить профилактический ремонт трансформаторов и пр.

Условия включения на параллельную работу

Для включения трансформаторов Тр1 и Тр2 на параллельную работу (рисунок 3.4, а) требуется, чтобы выполнялись следующие требования:

- при холостом ходе трансформаторов в их обмотках не возникали уравнительные токи;
- нагрузка распределялась между обоими трансформаторами в соответствии с их номинальной мощностью.

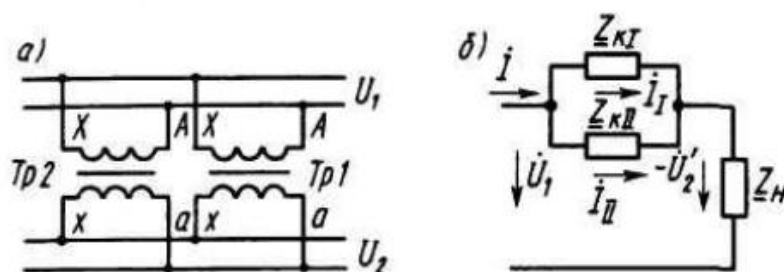


Рисунок 3.4 Схема включения трансформаторов при параллельной работе (а) и схема замещения их (б)

Чтобы выполнялись оба требования необходимо соблюдать определенные условия.

При неравенстве ЭДС E_{20I} и E_{20II} параллельно работающим трансформаторов (их вторичных напряжений при холостом ходе – рисунок 3.5) возникает уравнительный ток. Этот ток вызывает циркуляцию мощности от одного трансформатора к другому, а, следовательно, неравномерную нагрузку трансформаторов, сопровождающуюся увеличением потерь и нагрева.

Уравнительный ток определяется по формуле 3.3:

$$\dot{i}_{ур} = \frac{(\dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II})}{(Z_{кI} + Z_{кII})}. \quad (3.3)$$

1. Первым необходимым условием для включения трансформаторов на параллельную работу, как следует из формулы (3.1), является равенство их вторичных ЭДС, т. е. вторичных напряжений холостого хода. Предполагается, что первичные напряжения у них одинаковы, т. е. что трансформаторы подключены к одной и той же первичной сети. При этом трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации. На практике допускается параллельная

работа силовых трансформаторов, имеющих различие в коэффициентах трансформации не более 0,5%, а для трансформаторов с $k > 3$ – не более 1%. При таком различии в коэффициентах трансформации разность вторичных ЭДС ΔE (рисунок 3.5, а) небольшая и уравнительный ток незначительный.

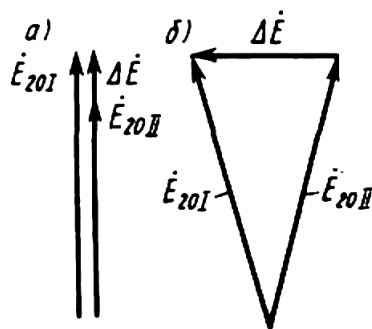


Рисунок 3.5 - Векторные диаграммы напряжения при параллельной работе трансформаторов одной группы с различными k (а) и разных типов с одинаковыми k (б)

2. Вторым необходимым условием является совпадение по фазе ЭДС E_{20I} и E_{20II} , с тем чтобы их векторная разность $E_{20I} - E_{20II}$ равнялась нулю. Для этого параллельно работающие трансформаторы **должны принадлежать к одной группе соединений**. При невыполнении этого условия между одноименными зажимами вторичных обмоток возникает разность ЭДС ΔE (рисунок 3.5, б), вызывающая появление уравнительного тока. Так, например, если трансформаторы принадлежат даже к ближайшим группам (например, одиннадцатой и нулевой), сдвиг по фазе между их вторичными ЭДС составляет 30° , и в контуре параллельно соединенных вторичных обмоток возникает большая разность ЭДС $\Delta E = E_{20I} - E_{20II} = 2 * E_{20} * \sin 15^\circ \approx 0.52 E_{20}$. При этом уравнительный ток в несколько раз больше номинального.

3.2 Задание

Трехфазный двухобмоточный трехстержневой трансформатор включен в сеть с напряжением $U = U_{1н}$ при схеме соединения обмоток Y/Y_n . Величины, характеризующие номинальный режим работы трансформатора, приведены в таблице 3: полная мощность S_n ; первичное номинальное линейное напряжение $U_{1н}$, вторичное номинальное линейное напряжение $U_{2н}$; напряжение короткого замыкания u_k , мощность потерь короткого замыкания (при номинальном токе) $P_{кз}$. Кроме того, заданы значения тока холостого хода I_{10} (в % от номинального), мощность потерь холостого хода P_{10} и характер нагрузки $\cos \varphi_2$.

Таблица 3.2 - Исходные данные к задаче

№ варианта	S_H , кВА	U_{1H} , кВ	U_{2H} , кВ	u_k , %	I_{10} , %	P_{10} , Вт	$P_{кн}$, Вт	Схема соединения	Группа соединения
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	25	10	0,4	4,5	3,2	125	690	Y/Y	0
2	40	10	0,4	4,7	3,0	180	1000	Y/ Δ	1
3	63	10	0,4	4,7	2,8	265	1280	Δ/Δ	2
4	63	20	0,4	5,3	2,8	290	1280	Δ/Y	3
5	100	10	0,4	4,7	2,6	365	2270	Y/Y	4
6	100	35	0,4	6,5	2,6	465	2270	Y/ Δ	5
7	160	10	0,4	6,5	2,4	540	3100	Δ/Δ	6
8	160	35	0,4	6,8	2,4	660	3100	Δ/Y	7
9	250	10	0,4	6,5	2,4	780	4200	Y/Y	8
10	250	35	0,4	6,8	2,3	960	4200	Y/ Δ	9
11	400	10	0,4	4,5	2,1	1080	5500	Δ/Δ	10
12	400	35	0,4	6,5	2,1	1350	5500	Δ/Y	11
13	630	10	0,4	5,5	2,0	1880	7600	Y/Y	0
14	630	35	0,4	6,5	2,0	2000	8500	Y/ Δ	1
15	63	20	0,4	5,0	4,4	390	1280	Δ/Δ	2
16	160	20	0,4	6,5	4,0	730	2540	Δ/Y	3
17	250	20	0,4	6,6	3,7	1050	3580	Y/Y	4
18	400	20	0,4	6,2	3,3	1530	5180	Y/ Δ	5
19	630	20	0,4	6,4	3,2	2100	7340	Δ/Δ	6
20	1000	10	0,4	5,5	1,4	2450	12200	Δ/Y	7
21	1000	35	0,4	6,5	1,5	2750	12200	Y/Y	8
22	1600	10	0,4	5,5	1,3	3300	18000	Y/ Δ	9
23	1600	35	0,4	6,5	1,4	3650	1800	Δ/Δ	10
24	2500	10	0,4	6,5	1,0	4600	23500	Δ/Y	11
25	2500	36	0,4	6,5	1,1	5100	23500	Y/Y	0
26	25	10	0,4	4,0	3,0	120	680	Y/ Δ	1
27	40	10	0,4	4,5	3,0	170	970	Δ/Δ	2
28	63	10	0,4	4,5	2,8	250	1150	Δ/Y	3
29	63	20	0,4	5,0	2,8	270	1150	Y/Y	4
30	100	10	0,4	4,5	2,5	350	2200	Y/ Δ	5
31	100	35	0,4	6,5	2,5	450	2200	Δ/Δ	6
32	160	10	0,4	6,5	2,3	530	2900	Δ/Y	7
33	160	35	0,4	6,6	2,3	650	3000	Y/Y	8
34	250	10	0,4	6,5	2,3	750	3900	Y/ Δ	9
35	250	35	0,4	6,8	2,3	950	3900	Δ/Δ	10

№ варианта	S_H , кВА	U_{1H} , кВ	U_{2H} , кВ	u_k , %	I_{10} , %	P_{10} , Вт	$P_{кн}$, Вт	Схема соединения	Группа соединения
36	400	10	0,4	4,5	2,3	1050	6400	Δ/Y	11
37	400	10	0,4	6,5	2,1	1300	5400	Y/Y	0
38	630	10	0,4	5,5	2,0	1600	7500	Y/Δ	1
39	630	35	0,4	6,5	2,0	1900	8400	Δ/Δ	2
40	63	20	0,4	5.0	4.3	380	1250	Δ/Y	3
41	160	20	0,4	6,5	4.0	720	2500	Y/Y	4
42	250	20	0,4	6.5	3,6	950	3400	Y/Δ	5
43	400	20	0,4	6,1	3,4	1500	5000	Δ/Δ	6
44	630	20	0,4	6.3	3,1	2100	7300	Y/Y	8
45	1000	10	0,4	5.2	1,5	2450	12200	Y/Δ	9

Содержание задания:

1. Начертить электромагнитную схему трехфазного трансформатора для заданной схемы и группы соединения, определить номинальные токи трансформатора (линейные и фазные), фазное напряжение обмоток, коэффициент трансформации фазных напряжений и ток холостого хода в амперах.

2. Определить параметры схемы замещения трансформатора $R_1, X_1, R'_2, X'_2, R_{12}, X_{12}$.

3. Изобразить векторную диаграмму напряжений трансформатора для заданных схемы соединения и группы соединения. (На диаграмме указать входные и выходные фазные и линейные напряжения)

4. Рассчитать токи (абсолютные значения и в процентах от номинального тока), протекающие по двум параллельно работающим трансформаторам с параметрами указанными в таблице, если у одного из них коэффициент трансформации на 5% меньше, чем по данным таблицы. Суммарная нагрузка трансформаторов равна удвоенной номинальной мощности.

5. Рассчитать токи (абсолютные значения и в процентах от номинального тока), протекающие по двум параллельно работающим трансформаторам с параметрами указанными в таблице, если у одного из них напряжение короткого замыкания u_k меньше на 0,5%, чем по данным таблицы. Суммарная нагрузка трансформаторов равна удвоенной номинальной мощности.

3.3 Методические указания по решению задачи

На схеме трансформатора указываются его обмотки, соединение обмоток, обозначения начал и концов обмоток в соответствии с заданной схемой и группой соединения. Например, для соединения Y/Δ - 3 схема приведена на рисунке 1. Линейные токи находят по формуле

$$I_n = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{1H}}$$

Фазные напряжения и токи обмоток находят с учетом схемы соединения обмоток. Для соединения звездой фазные напряжения меньше линейных в $\sqrt{3}$ раз, фазные и линейные токи совпадают, при соединении треугольником фазные токи меньше линейных в $\sqrt{3}$ раз, фазные и линейные напряжения совпадают.

На векторной диаграмме изображают вектора фазных и линейных напряжений для первичной и вторичной обмоток, с учетом схемы и группы соединения, указывается фазовый сдвиг между соответствующими входным и выходным линейными напряжениями.

Для определения параметров схемы замещения трансформатора используют найденные фазные токи и напряжения (включая напряжение короткого замыкания и ток холостого хода). Находят сопротивления короткого замыкания трансформатора, используя формулы:

$$U_K = \frac{u_K}{100} U_{1H}; \quad I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H}}; \quad Z_K = \frac{U_K}{I_{1H}}; \quad R_K = \frac{P_{KH}}{I_{1H}^2}; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

Считая трансформатор симметричным, можно найти сопротивления первичной и вторичной обмоток

$$X_1 = X_2' = \frac{X_K}{2}; \quad R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2}$$

Действительные значения сопротивлений вторичной обмотки

$$X_2 = \frac{X_2'}{k^2}; \quad R_2 = \frac{R_2'}{k^2},$$

где $k = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}$ - коэффициент трансформации.

Сопротивления контура намагничивания

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{10}}; \quad R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

$$R_{10} = R_0 - R_1; \quad X_{10} = X_0 - X_1; \quad Z_{10} = \sqrt{R_{10}^2 + X_{10}^2}.$$

При параллельной работе трансформаторов с неравными коэффициентами трансформации, из-за неравенства ЭДС возникает уравнительный ток, текущий только по обмоткам трансформатора, минуя нагрузку. Ток трансформатора с большим коэффициентом трансформации увеличивается на величину уравнительного тока I_y , ток другого трансформатора уменьшается на ту же величину.

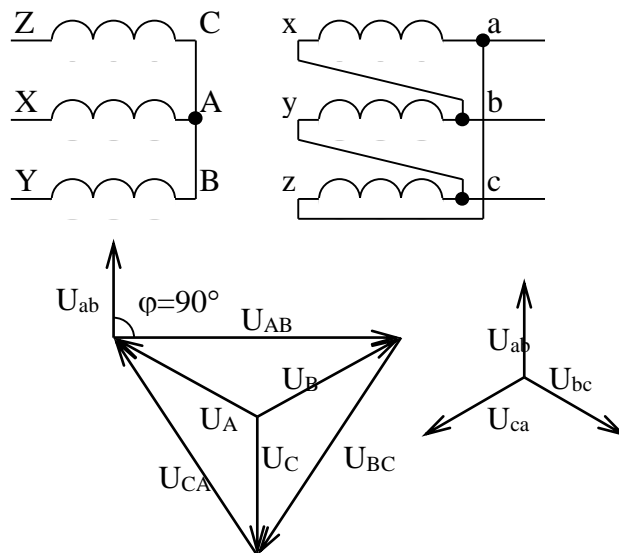


Рисунок 3.6 - Схема соединений и векторная диаграмма трехфазного трансформатора

Для определения уравнительного тока находят средний коэффициент трансформации

$$k_{cp} = \sqrt{k_1 k_2},$$

где k_1, k_2 – коэффициенты трансформации параллельно работающих трансформаторов. Согласно условию задачи $k_1 = 1,05 k_2$.

Отклонение коэффициентов трансформации от среднего значения

$$\Delta k = \frac{k_1 - k_2}{k_{cp}}.$$

Уравнительный ток

$$I_y \% = \frac{\Delta k}{2u_x \%} 100\%, \quad I_y = \frac{I_y \%}{100} I_H.$$

Токи трансформаторов

$$I_1 = I_H - I_y, \quad I_2 = I_H + I_y.$$

При параллельной работе трансформаторов с разными напряжениями короткого замыкания u_k , из-за неодинакового внутреннего сопротивления трансформаторов, их загрузка также отличается.

Отношение коэффициентов загрузки трансформаторов

$$\frac{k_{31}}{k_{32}} = \frac{u_{k2} \%}{u_{k1} \%}$$

Зная, что $k_{31} + k_{32} = 2$, решив систему, находят k_{31} , k_{32} и токи трансформаторов

$$I_1 = I_H k_{31}, I_2 = I_H k_{32}.$$

Определения токов при параллельной работе трансформаторов с неравными коэффициентами трансформации

При параллельной работе трансформаторов с разными напряжениями короткого замыкания $u_k\%$, из-за неодинакового внутреннего сопротивления трансформаторов, их загрузка также отличается.

Согласно условию задачи $u_{k1} \% = 4,7 \%$, $u_{k2} \% = 4,32\%$.

Отношение коэффициентов загрузки трансформаторов определяется формулой

$$\frac{k_{31}}{k_{32}} = \frac{u_{k2} \%}{u_{k1} \%}$$

Зная, что $k_{31} + k_{32} = 2$, решим систему

$$\begin{cases} \frac{k_{31}}{k_{32}} = \frac{u_{k2} \%}{u_{k1} \%} \\ k_{31} + k_{32} = 2 \end{cases}$$

и находим, k_{31}

$$\begin{cases} \frac{k_{31}}{k_{32}} = \frac{4,7}{4,32} = 1,08 \\ k_{31} + k_{32} = 2 \end{cases},$$

$$\begin{cases} \frac{2 - k_{32}}{k_{32}} = 1,08 \\ k_{31} = 2 - k_{32} \end{cases},$$

$$\frac{2 - k_{32}}{k_{32}} - 1 = 1,08 ,$$

$$k_{32} = \frac{2}{2,08} = 0,96 ,$$

$$k_{32} = 2 - 0,96 = 1,04 .$$

Токи трансформаторов находим из допущения, что фазы уравнительного тока и тока нагрузки совпадают

$$I_1 = I_{2н} k_{31} = 33,33 \cdot 1,04 = 34,66 A ,$$

$$I_2 = I_{2н} k_{32} = 33,33 \cdot 0,96 = 31,997 A .$$

3.4 Контрольные вопросы

1. Трехфазные трансформаторы
2. Схемы соединения обмоток
3. Особенности режима холостого хода
4. Группы соединения обмоток трансформаторов
5. Трехфазные трансформаторы
6. Параллельная работа трансформаторов
7. Условия включения на параллельную работу трансформаторов
8. С помощью каких устройств можно производить преобразование трехфазного тока?
9. Что понимается под трехфазной группой трансформаторов, для чего она применяется?
10. Как устроен трехфазный трехстержневой трансформатор?
11. Записать формулу для определения фазного и линейного коэффициентов трансформации трехфазного трансформатора.
12. Где находят применение трехфазные трансформаторы со схемой соединения «зигзаг»?
13. Как распределяются токи при параллельном включении трансформаторов?
14. Как распределяются мощности при параллельном включении трансформаторов?

4 Параметры асинхронного двигателя

4.1 Общие сведения

Асинхронные двигатели являются основными преобразователями электрической энергии в механическую и составляют основу электропривода большинства механизмов, используемых во всех отраслях народного хозяйства.

Асинхронные электродвигатели общего назначения мощностью от 0,06 кВт до 400 кВт на напряжение до 1000 В – наиболее широко применяемые электрические машины. В народнохозяйственном парке электродвигателей они составляют по количеству 90%, по мощности – примерно 55%. Потребность, а, следовательно, и производство асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В в России растет неуклонно из года в год.

Уже в настоящее время асинхронные двигатели потребляют более 40% вырабатываемой в стране электроэнергии, на их изготовление расходуется большое количество дефицитных материалов: обмоточной меди, изоляции, электротехнической и других. Затраты на обслуживание и ремонт асинхронных двигателей в эксплуатации составляют более 5% затрат на ремонт и обслуживании всего установленного оборудования [1]. Поэтому создание новых серий высокоэкономичных и надежных асинхронных двигателей является важнейшей народнохозяйственной задачей, а правильный выбор двигателей, их эксплуатация и высококачественный ремонт играют первоочередную роль в экономии материальных и трудовых ресурсов.

Первая единая серия асинхронных двигателей – серия А мощностью от 0,6 до 100 кВт была разработана в 1946–1949 гг. В серии А впервые была принята твердая шкала мощностей, имеющая 15 ступеней. Помимо основного исполнения был предусмотрен ряд модификаций, удовлетворяющих требованиям привода в части характеристик (двигатели с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, многоскоростные, со встроенным тормозом, с фазным ротором) и специализированных исполнений по условиям окружающей среды (влаго-, химо- и тропикостойкие двигатели).

В 1969–1972 гг. в СССР и ряде стран – членов СЭВ была разработана серия асинхронных двигателей 4А. Эта серия охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,06 до 400 кВт и выполнена на 17 высотах оси вращения – от 50 мм до 355 мм. В серии 4А за счет применения новых электротехнических материалов и рациональной конструкции мощность двигателей при данных высотах оси вращения повышена на две-три ступени по сравнению с мощностью двигателей серии А и А2, что дало большую экономию дефицитных материалов [1].

В настоящее время отечественной промышленностью (на владимирском электромоторном заводе) выпускаются асинхронные электродвигатели новых серий 5А, 6А, которые используются вместо старых серий 4А и АО [2].

Электродвигатели выпускаются в базовом и модифицированном исполнении. Основное (базовое) исполнение – к этой группе относятся трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором монтажного исполнения IM1001, рассчитанный на частоту питания 50 Гц, имеющие степень защиты IP54

(IP55) или IP23. Двигатели основного исполнения выпускаются во всем диапазоне мощностей и высот осей вращения, они обладают типовыми техническими характеристиками, соответствующими требованиям стандартов.

Модифицированное исполнение – к этой группе относятся двигатели, изготовленные на основе узлов основных (базовых) двигателей с необходимыми конструктивными отличиями по способу монтажа, степени защиты, климатическому исполнению и другими отличиями. К двигателям модифицированного исполнения относятся двигатели специального назначения – двигатели, предназначенные для узкоспециализированного применения, например, электродвигатели привода лифтов, грузоподъемных механизмов и др.

Серия асинхронных двигателей 5А и 6А охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,37 до 250 кВт и выполнена на 10 высотах оси вращения – от 80 мм до 315 мм. Двигатели новых серий имеет лучшую степень защиты, по сравнению с электродвигателями старых серий, а также лучшие пусковые и энергетические показатели. Кроме того, электродвигатели серий 5А, 6А имеют изоляционную систему с более высоким классом нагревостойкости изоляции – F (температурный индекс 155 °С) по сравнению с двигателями старых серий.

Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором состоит из неподвижного статора 1, вращающегося ротора 2 и двух подшипниковых щитов 3 с подшипниками качения или скольжения в центре щитов (рисунок 4.1)

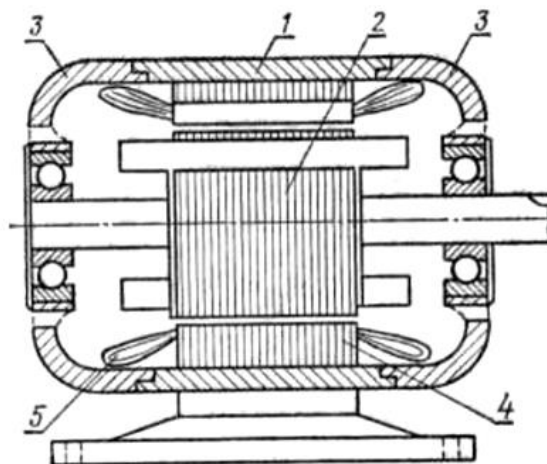


Рисунок 4.1 - Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором

Статор двигателя состоит из корпуса 1, сердечника 4 и трехфазной обмотки 5. Корпус изготавливается из чугуна или из сплавов алюминия. Сердечник статора (рисунок 4.2) набирается из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,3 или 0,5 мм, покрытых изоляционным лаком. Такая конструкция ротора называется «шихтованной», она позволяет снижать потери в сердечнике от вихревых токов, которые образуются в стали сердечника при работе электродвигателя.

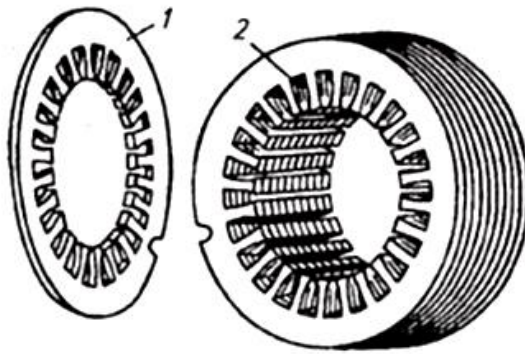


Рисунок 4.2 - Сердечник статора трехфазного асинхронного электродвигателя:
1 – лист; 2 – сердечник статора

На внутренней поверхности сердечника имеются пазы для укладки в них трехфазной обмотки, выполненной из изолированного провода. Обмотки-фазы расположены симметрично под углом 120° друг к другу. Начала и концы обмоток промаркированы определенным образом. Маркировка показана в таблице 4.1. Ротор асинхронного электродвигателя состоит из вала, опирающегося на подшипники, сердечника и обмотки. Сердечник ротора также набирается из штампованных листов электротехнической стали.

Таблица 4.1 - Маркировка обмоток статора асинхронного электродвигателя

Фазы	Начала	Концы
А	С1	С4
В	С2	С5
С	С3	С6

На внешней поверхности сердечника имеются пазы, в которых размещаются медные или алюминиевые стержни обмотки ротора без изоляции. Концы стержней надежно путем сварки или литья под давлением присоединены к кольцам (рисунок 4.3). В результате получается короткозамкнутая обмотка ротора, напоминающая беличье колесо.

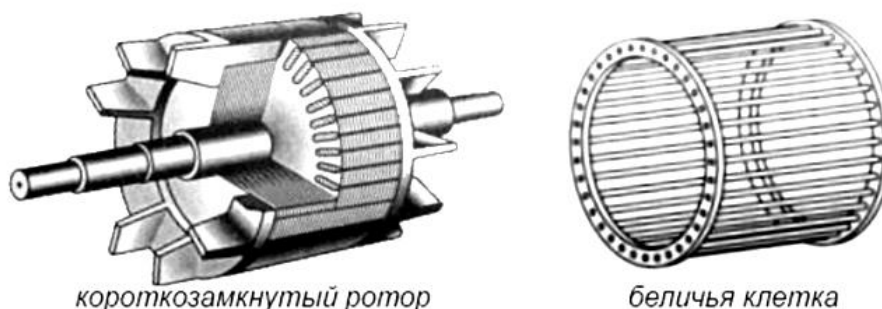


Рисунок 4.3 - Короткозамкнутая обмотка ротора асинхронного электродвигателя

При подключении обмотки статора к сети трехфазного переменного тока в статоре образуется вращающееся магнитное поле. Ч вращения магнитного поля определяется по формуле (4.1):

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (4.1)$$

где n_0 – частота вращения магнитного поля, об/мин;
 f – частота тока, Гц;
 p – число пар магнитных полюсов двигателя.

Силовые линии вращающегося магнитного поля пересекают стержни короткозамкнутой обмотки ротора, и в них индуцируется электродвижущая сила, которая вызывает появление тока и магнитного потока в роторе двигателя.

Взаимодействие магнитного поля статора с током ротора создает механический вращающий момент, под действием которого ротор начинает вращаться. Частота вращения ротора несколько меньше частоты вращения магнитного поля, поэтому двигатель называется асинхронным. Величина, характеризующая отставание ротора от магнитного поля в относительных единицах, называется скольжением и определяется оно по формуле (4.2).

$$s = \frac{n_0 - n_1}{n_0} \quad (4.2)$$

где n_0 – частота вращения магнитного поля, об/мин;
 n_1 – номинальная частота вращения ротора, об/мин.

Скольжение величина безразмерная, иногда оно может быть выражена в процентах (%), в этом случае скольжение может быть определено по формуле (4.3):

$$s = \frac{n_0 - n_1}{n_0} \cdot 100\%, \quad (4.3)$$

Механической характеристикой асинхронного электродвигателя называется зависимость скорости (или угловой скорости) ротора от момента, создаваемого электродвигателем $n_1=f(M)$ или $\omega_1=f(M)$. Механические характеристики делятся на «естественные» и «искусственные». У каждого электродвигателя существует одна «естественная» механическая характеристика и множество искусственных. «Естественная» механическая характеристика – это характеристика снятая:

- 1) при номинальном напряжении сети;
- 2) при номинальной частоте питающего напряжения;

3) при отсутствии добавочных сопротивлений в цепях обмоток электродвигателя;

4) при включении электродвигателя по схеме, предусмотренной заводом-изготовителем. Если хотя бы одно из перечисленных условий нарушается, образуется «искусственная» механическая характеристика. Механическую характеристику (рисунок 4.4) можно условно разделить на два участка (две ветви). Первый участок ABC называется «пусковой ветвью» механической характеристики. На этом участке двигатель не может устойчиво работать. Он либо разгоняется, либо тормозится. Второй участок CDN называется «рабочей ветвью» механической характеристики. На этом участке двигатель может устойчиво работать. Точка A называется «пусковой точкой», она имеет следующие координаты: $M=M_n$; $n_1=0$; $s=1$. Точка B называется «точкой минимальной работы», координаты этой точки: $M=M_{min}$; $n_1=n_{min}$; $s_{min}=6/7$. Точка C – «точка критической работы», её координаты: $M=M_k$; $n_1=n_k$; $s=s_k$. Точка D – «точка номинальной работы», координаты: $M=M_n$; $n_1=n_n$; $s=s_n$. Точка N – «точка холостого хода», координаты $M=0$; $n_1=1$; $s=0$

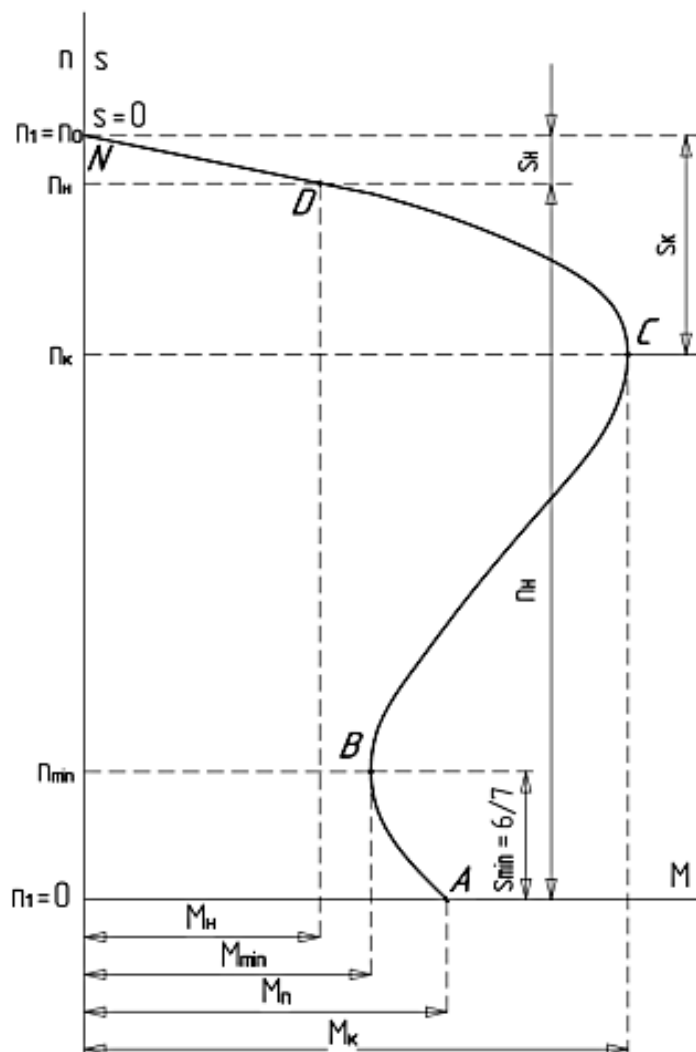


Рисунок 4.4 - Механическая характеристика асинхронного короткозамкнутого электродвигателя

В последних выражениях: $M_{п}$, M_{\min} , $M_{к}$, $M_{н}$ – величины пускового, минимального, критического и номинального моментов соответственно (Н·м); n_{\min} , $n_{к}$, $n_{н}$, n_0 – величины минимальной, критической, номинальной скорости вращения ротора и скорости вращения магнитного поля соответственно (об/мин.); s_{\min} , $s_{к}$, $s_{н}$ – величины минимального, критического и номинального скольжения соответственно.

4.2 Задание

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет номинальные параметры указанные в таблице 4.2. Используя технические данные этого двигателя, определить:

1. Обозначение двигателя с расшифровкой;
2. Потребляемую из сети мощность P_1 ;
3. Суммарные потери мощности в двигателе $\sum P$;
4. Номинальное скольжение $s_{НОМ}$;
5. Номинальный $I_{НОМ}$ и пусковой $I_{пУСК}$ токи;
6. Номинальный $M_{НОМ}$, пусковой $M_{пУСК}$ и максимальный $M_{МАХ}$ моменты
7. Частоту тока в роторе f_2 при номинальном скольжении.

Таблица 4.2 - Технические данные двигателей

вариант	Тип	Значение параметров								
		Р, кВт	номинальная частота вращения, об/мин.	КПД, %	cos, φ	$I_{п}/I_{н}$	$M_{п}/M_{н}$	$M_{\max}/M_{н}$	$M_{\min}/M_{н}$	масса, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	АИР56А2	0,18	2730	65,0	0,78	5,0	2,2	2,2	1,8	3,5
2	АИР56В2	0,25	2700	66,0	0,79	5,0	2,2	2,2	1,8	3,8
3	АИР56А4	0,12	1350	58,0	0,66	5,0	2,2	2,2	1,8	3,6
4	АИР56В4	0,18	1350	60,0	0,68	5,0	2,2	2,2	1,8	4,2
5	АИР63А2	0,37	2730	72,0	0,84	5,0	2,2	2,2	1,8	5,2
6	АИР63В2	0,55	2730	75,0	0,81	5,0	2,2	2,2	1,8	6,1
7	АИР63А4	0,25	1320	65,0	0,67	5,0	2,2	2,2	1,8	5,1
8	АИР63В4	0,37	1320	68,0	0,70	5,0	2,2	2,2	1,8	6,0
9	АИР63А6	0,18	860	56,0	0,62	4,0	2,2	2,2	1,6	4,8
10	АИР63В6	0,25	860	59,0	0,62	4,0	2,2	2,2	1,6	5,6
11	АИР71А2	0,75	2820	79,0	0,80	6,0	2,6	2,7	1,6	8,7
12	АИР71В2	1,10	2800	79,5	0,80	6,0	2,2	2,4	1,6	9,5
13	АИР71А4	0,55	1360	71,0	0,71	5,0	2,3	2,4	1,8	8,1

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
14	АИР71В4	0,75	1350	72,0	0,75	5,0	2,5	2,6	2,4	9,4
15	АИР71А6	0,37	900	65,0	0,63	4,5	2,1	2,2	1,6	8,6
16	АИР71В6	0,55	920	69,0	0,68	4,5	1,9	2,2	1,6	9,9
17	АИР71 В8	0,25	680	58,0	0,60	4,0	1,6	1,9	1,4	9,9
18	АИР80А2	1,50	2880	82,0	0,85	6,5	2,2	2,6	1,8	12,4
19	АИР80В2	2,20	2860	83,0	0,87	6,4	2,1	2,6	1,8	15,0
20	АИР80А4	1,10	1420	76,5	0,77	5,0	2,2	2,4	1,7	11,9
21	АИР80В4	1,50	1410	78,5	0,80	5,3	2,2	2,4	1,7	13,8
22	АИР80А6	0,75	920	71,0	0,71	4,0	2,1	2,2	1,6	11,6
23	АИР80В6	1,10	920	75,0	0,71	4,5	2,2	2,3	1,8	15,3
24	АИР80В6	1,10	920	75,0	0,71	4,5	2,2	2,3	1,8	15,3
25	АИР80А8	0,37	680	58,0	0,59	3,5	2,0	2,3	1,4	12,8
26	АИР80 В8	0,55	680	58,0	0,60	3,5	2,0	2,1	1,4	14,8
27	АИР90L2	3,00	2860	83,5	0,88	7,0	2,3	2,6	1,7	19,0
28	АИР90 L4	2,20	1430	80,0	0,79	6,0	2,0	2,4	2,0	18,1
29	АИР90 L6	1,50	940	76,0	0,70	5,0	2,0	2,3	1,9	19,0
30	АИР90 LA8	0,75	700	70,0	0,71	4,0	1,5	2,0	1,5	17,7
31	АИР90 LB8	1,10	710	74,0	0,72	4,5	1,5	2,2	1,5	20,5
32	АИР100 S2	4,00	2850	87,0	0,88	7,5	2,0	2,4	1,6	26,0
33	АИР100 L2	5,50	2850	88,0	0,88	7,5	2,1	2,4	1,6	31,5
34	АИР100 S4	3,00	1410	82,0	0,82	7,0	2,0	2,2	1,6	23,0
35	АИР100 L4	4,00	1410	85,0	0,84	7,0	2,1	2,4	1,6	29,2
36	АИР100 L6	2,20	940	81,5	0,74	6,0	1,9	2,2	1,6	27,0
37	АИР100 L8	1,50	710	76,0	0,75	3,7	1,6	2,0	1,5	24,0
38	АИР112M2	7,50	2900	87,5	0,88	7,5	2,0	2,2	1,6	40,0
39	АИР112M4	5,50	1430	85,5	0,86	7,0	2,0	2,5	1,6	38,5
40	АИР112МА6	3,00	950	81,0	0,76	6,0	2,0	2,2	1,6	33,4
41	АИР112МВ6	4,00	950	82,0	0,81	6,0	2,0	2,2	1,6	38,8
42	АИР112МА8	2,20	700	76,5	0,71	6,0	1,8	2,2	1,4	33,4
42	АИР112МВ8	3,00	700	79,0	0,74	6,0	1,8	2,2	1,4	39,0
44	АИР132M2	11,00	2910	87,5	0,88	7,5	1,6	2,2	1,2	60,4
45	АИР132S4	7,50	1440	86,0	0,83	7,5	2,0	2,5	1,6	53,5
46	АИР132M4	11,00	1450	87,5	0,79	7,5	2,4	2,9	2,2	66,3
47	АИР132S6	5,50	960	85,0	0,80	7,0	2,0	2,2	1,6	52,3
48	АИР132M6	7,50	950	85,0	0,79	7,0	2,0	2,2	1,6	64,5
49	АИР132S8	4,00	700	83,0	0,70	6,0	1,8	2,2	1,4	52,2
50	АИР132M8	5,50	700	83,0	0,74	6,0	1,8	2,2	1,4	62,2
51	АИР160S2	15,00	2920	90,5	0,89	7,0	2,1	3,0	2,0	95,7
52	АИР160M2	18,50	2920	91,0	0,89	7,0	2,2	3,0	2,0	96,9
53	АИР160S4	15,00	1460	89,5	0,86	6,5	2,3	2,7	2,0	97,1

4.3 Методические указания по решению задачи

Обозначение типа двигателя расшифровывается так: А – асинхронный; 4 – номер серии; Х – алюминиевая оболочка и чугунные щиты (отсутствие буквы Х означает, что корпус полностью выполнен из чугуна); В – двигатель встроен в оборудование; Н – исполнение защищенное 1Р23; для закрытых двигателей исполнения 1Р44 буквы Н нет; Р – двигатель с повышенным пусковым моментом; С – сельскохозяйственного назначения; цифра после буквенного обозначения показывает высоту оси вращения в мм; буквы S, M, L после цифр дают установочные размеры по длине корпуса (S – самая короткая станина; M – промежуточная; L – самая длинная); цифра после установочного размера – число полюсов; У – климатическое исполнение (для умеренного климата); последняя цифра показывает категорию размещения (1 – для работы на открытом воздухе; 3 – для закрытых неотапливаемых помещений). В обозначении типов двухскоростных двигателей после установочного размера

указывают через дробь оба числа полюсов, например, 4А18О84/2У3: здесь 4 и 2 означают, что обмотки статора могут переключаться так, что в двигателе образуются 4 или 2 полюса.

Пример: Расшифровать условное обозначение двигателя 4А100S2У3.

Это двигатель четвертой серии, асинхронный, корпус полностью чугунный (нет буквы Х), высота оси вращения 100 мм, размеры корпуса по длине – S (самая короткая станина), двухполюсный, для умеренного климата, третья категория размещения (для закрытых неотапливаемых помещений).

Задан трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А100М2У3. Используя технические данные этого двигателя, определить:

- 1) скорость вращения ротора n_2 ;
- 2) потребляемую из сети мощность P_1 ;
- 3) суммарные потери мощности в двигателе $\sum P$;
- 4) номинальное скольжение $s_{НОМ}$;
- 5) номинальный $I_{НОМ}$ и пусковой $I_{пуск}$ токи;
- 6) номинальный $M_{НОМ}$, пусковой $M_{пуск}$ и максимальный $M_{МАХ}$ моменты
- 7) частоту тока в роторе f_2 .

Решение

1. Для данного типа двигателя определяем паспортные величины:

$n_2 = 2880$ об/мин — скорость вращения ротора;

$\cos \varphi_{НОМ} = 0,91$ – коэффициент мощности;

$\eta_{НОМ} = 0,87$ – КПД двигателя;

$I_{пуск} / I_{НОМ} = 7,5$ – кратность пускового тока;

$M_{пуск} / M_{НОМ} = 2,0$ – кратность пускового момента;

$M_{МАХ} / I_{НОМ} = 2,2$ – способность к перегрузке.

2. Мощность, потребляемая из сети,

$$P_1 = \frac{P_{НОМ}}{\eta_{НОМ}} = \frac{5,5}{0,87} = 6,322 \text{ кВт}.$$

3. Суммарные потери мощности в двигателе

$$\sum P = P_1 - P_{НОМ} = 6,322 - 5,5 = 0,822 \text{ кВт}$$

4. Номинальное скольжение $s_{НОМ}$,

Ближайшая к $n_2 = 2880$ об/мин из ряда синхронных частот вращения будет $n_1 = 3000$ об/мин, где n_1 - скорость вращения магнитного потока статора.

$$s_{НОМ} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{3000 - 2880}{3000} = 0,04 \cdot 100\% = 4\%$$

5. Номинальный и пусковой токи определяем из формулы:

$$P_{НОМ} = \sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot I_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ} \cdot \eta_{НОМ}$$

откуда

$$I_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} U_{НОМ} \cdot \eta_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ}} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,91 \cdot 0,87} = 10,57 \text{ А}$$

Так как из табл. 2 $I_{пуск}/I_{НОМ} = 7,5$, отсюда

$$I_{ПУСК} = 7,5 \cdot I_{НОМ} = 7,5 \cdot 10,57 = 79,275 = 79,3 \text{ А}$$

6. Номинальный момент, развиваемый двигателем,

$$M_{НОМ} = \frac{9550 \cdot P_{НОМ}}{\eta_{2НОМ}} = \frac{9550 \cdot 5,5}{2880} \approx 18,24 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

7. Пусковой и максимальный моменты: $M_{пуск}/M_{НОМ} = 2,0$, отсюда

$$M_{ПУСК} = 2 \cdot M_{НОМ} = 2 \cdot 18,24 = 36,48 \text{ Н} \cdot \text{м}, M_{ПУСК}/M_{НОМ} = 2,2,$$

Отсюда

$$M_{\text{ПУСК}} = 2,2 \cdot M_{\text{НОМ}} = 2,2 \cdot 18,24 = 40,13 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

8. Частота тока в роторе при $f_1 = 50$ Гц,

$$f_2 = f_1 \cdot s_{\text{НОМ}} = 50 \cdot 0,04 = 2 \text{ Гц}$$

4.4 Контрольные вопросы

1. Назовите основные узлы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором?
2. Как устроены сердечники статора и ротора асинхронного электродвигателя. Почему они собираются из отдельных пластин электротехнической стали с изоляцией из диэлектрика?
3. На чем основан принцип действия асинхронного электродвигателя?
4. Почему двигатель называется асинхронным?
5. От чего зависит и как определяется частота вращения магнитного поля асинхронного электродвигателя?
6. Каким образом и за счет чего в обмотке ротора появляется электрический ток?
7. В чем заключается физический смысл скольжения, как оно определяется и в каких единицах измеряется?
8. Что такое механическая характеристика асинхронного электродвигателя. Перечислить разновидности механических характеристик и как они определяются?
9. Назовите характерные точки механической характеристики асинхронного электродвигателя и координаты каждой из точек?
10. Какими символами обозначаются начала и концы обмоток статора.
11. Как соединяются между собой обмотки статора, и к каким точкам подключаются фазы трехфазной обмотки?

5 Параметры синхронного генератора

5.1 Общие сведения

Синхронные двигатели нашли применение в электроприводе благодаря высоким технико-экономическим показателям. В сельскохозяйственном производстве синхронные двигатели применяют в качестве электропривода насосов систем орошения, когда установленная мощность двигателя превышает 300 кВт [1]. Электрическая промышленность выпускает синхронные двигатели различного назначения. Двигатели СД2 и СД3 мощностью от 132 до 1000 кВт, СДМ-2 и СДМ-3 мощностью от 315 до 4000 кВт – общего применения. Двигатели СДК, СДКП, СДКМ мощностью от 315 до 5800 кВт выпускаются специально для привода компрессоров, мельниц и т.д. В настоящее время синхронные двигатели применяют в станкостроении, робототехнике, гибких производственных системах и т.д.

Синхронный двигатель состоит из статора и ротора. На статоре, как и у асинхронного двигателя, располагаются обмотки переменного тока, соединенные в «звезду» или «треугольник», на роторе находится обмотка возбуждения постоянного тока. Магнитная система машины выполняется явноили неявнополюсной. Ее исполнение зависит от синхронной скорости и мощности двигателя. При частоте вращения 3000 об/мин синхронные двигатели выполняются с неявнополюсным ротором, при частоте 1500 об/мин и ниже – ротор явнополюсный. Возбуждение синхронных двигателей осуществляется от полупроводниковых статических преобразователей. Питание преобразователей может осуществляться от сети или специальной обмотки, размещенной в пазах статора. Существует бесщеточная система возбуждения от специальной обмотки, заложенной в пазы ротора машины.

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии магнитного потока ротора с вращающимся полем статора. При изменении нагрузки на валу от холостого хода до максимально-допустимого значения скорость двигателя остается неизменной равной $\omega_0 = 2\pi f/P$. Механическая характеристика имеет вид прямой, проходящей через ω_0 параллельно оси моментов. Приведенная механическая характеристика показывает зависимость установившегося значения скорости ротора от момента на валу. В действительности при изменении нагрузки на валу в переходных режимах мгновенное значение скорости не равно синхронной ω_0 . Так, при увеличении нагрузки ротор начинает притормаживать, при уменьшении – разгоняться. В установившемся режиме скорость равна ω_0 .

Но всё же большая часть синхронных машин используется главным образом в качестве синхронных генераторов – источников электрической энергии переменного тока (однофазных и трехфазных).

Синхронные машины используют главным образом в качестве источников электрической энергии переменного тока; их устанавливают на мощных тепловых, гидравлических и атомных электростанциях, а также на передвижных электростанциях и транспортных установках (тепловозах, автомобилях, самолетах). Конструкция синхронного генератора определяется в основном типом привода.

В зависимости от этого различают турбогенераторы, гидрогенераторы и дизель-генераторы. Турбогенераторы приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами, гидрогенераторы – гидротурбинами, дизель-генераторы – двигателями внутреннего сгорания. Синхронные машины широко используют и в качестве электродвигателей при мощности 100 кВт и выше для привода насосов, компрессоров, вентиляторов и других механизмов, работающих при постоянной частоте вращения. Для генерирования или потребления реактивной мощности с целью улучшения коэффициента мощности сети и регулирования ее напряжения применяют синхронные компенсаторы. В электробытовых приборах (магнитофонах, проигрывателях, киноаппаратуре) и системах управления широкое применение получили различные синхронные микромашины – с постоянными магнитами, индукторные, реактивные, гистерезисные, шаговые, линейные. Микромашины – это машины, имеющие мощность до 500 В (0,5 кВт) В 1876 г. русский ученый П. Н. Яблочков разработал несколько образцов многофазных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением и электрически несвязанными фазами, предназначенных для питания созданных им дуговых электрических ламп (свечи Яблочкова). Первый трехфазный синхронный генератор изобрел известный русский электротехник М.О. Доливо-Добровольский. Этот генератор имел мощность 230 кВт·А, приводился во вращение от гидротурбины и обеспечивал электроснабжение международной электротехнической выставки в г. Франкфурте в 1891 г. по четырехпроводной электрической линии трехфазного тока. Основная электромагнитная схема синхронных машин с тех пор оставалась неизменной, но усовершенствовалось их конструктивное выполнение и возросли электромагнитные нагрузки, что позволило значительно улучшить массогабаритные и энергетические показатели и нагрузочную способность синхронных машин. Особенно большие выгоды в этом отношении дало применение в крупных машинах водородного и водяного охлаждения. В разработке теорий синхронных машин и совершенствовании их конструкции важная роль принадлежит советским ученым А.Е. Алексееву, А.А. Гореву, Р.А. Лютеру, М.П. Костенко, В.А. Толвинскому и др. Синхронные генераторы большой мощности разрабатывались на основе работ А.И. Бертинова, А.И. Глебова, Д.Е. Ефремова, В.В. Романова, И.Д. Урусова, Г.М. Хуторецкого и др. В настоящее время советской электропромышленностью для тепловых и атомных электростанций разработана и выпускается серия унифицированных турбогенераторов мощностью 63, 125, 320, 500 и 800 МВт и уникальные турбогенераторы мощностью 1000 МВт для атомных электростанций и 1200 МВт для тепловых электростанций. Для гидроэлектростанций созданы гидрогенераторы мощностью 350, 590 и 640 МВт, а также обратимые генераторы-двигатели для гидроаккумулирующих электростанций мощностью 200-300 МВт. Для высоковольтных линий электропередачи выпускаются синхронные компенсаторы мощностью до 350 МВ·А. Планируется начать разработки турбогенераторов мощностью 1600 – 2000 МВт и гидрогенераторов мощностью 1000 МВт.

Статор 1 синхронной машины (рисунок 5.1, а) выполнен так же, как и асинхронной: на нем расположена трехфазная (в общем случае многофазная) обмотка

3. Обмотку ротора 4, питаемую от источника постоянного тока, называют обмоткой возбуждения, так как она создает в машине магнитный поток возбуждения. Вращающуюся обмотку ротора соединяют с внешним источником постоянного тока посредством контактных колец 5 и щеток 6 (рисунок 5.1, б).

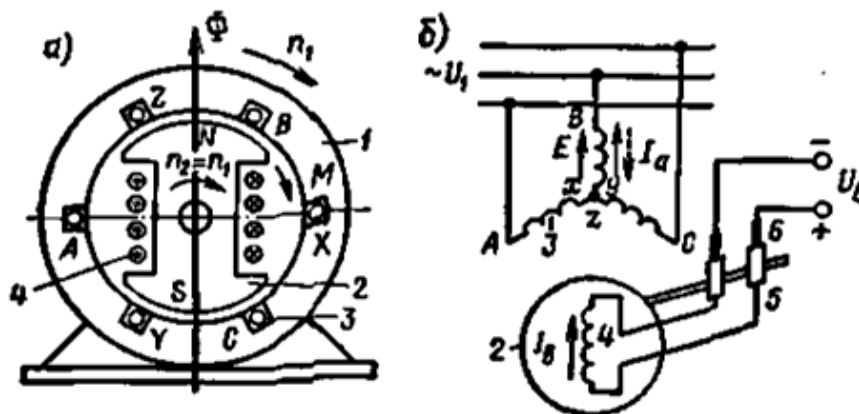


Рисунок 5.1 - Электромагнитная схема синхронной машины и схема её включения

При вращении ротора 2 с некоторой частотой n_2 поток возбуждения пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ее фазах переменную ЭДС E , изменяющуюся с частотой, определяемой по формуле (5.1)

$$f_1 = \frac{p \cdot n_2}{60}, \quad (5.1)$$

где p – число пар полюсов статора;

n_2 – частота вращения ротора, об/мин;

f_1 – частота ЭДС (E), которая наводится в обмотке статора, Гц;

Если обмотку статора подключить к какой-либо нагрузке, то проходящий по этой обмотке многофазный ток I создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется по формуле (5.2):

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (5.2)$$

Из выражений (5.1) и (5.2) следует, что $n_1 = n_2$, т. е. что ротор вращается с той же частотой, что и магнитное поле статора. Поэтому рассматриваемую машину называют синхронной. Результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ синхронной машины создается совместным действием МДС обмотки возбуждения и обмотки статора, и результирующее магнитное поле вращается в пространстве с той же частотой, что и ротор.

В синхронной машине обмотку, в которой индуцируется ЭДС и проходит ток нагрузки, называют обмоткой якоря, а часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, – индуктором. Следовательно, в приведенной машине (рисунок 5.1) статор является якорем, а ротор – индуктором. Для принципа действия и теории работы машины не имеет значения – вращается якорь или индуктор, поэтому в некоторых случаях применяют синхронные машины с обращенной конструктивной схемой: обмотку якоря, к которой подключают нагрузку, располагают на роторе, а обмотку возбуждения, питаемую постоянным током, – на статоре. Такую машину называют обращенной. Обращенные машины имеют сравнительно небольшую мощность, так как у них затруднен отбор мощности от обмотки ротора. Синхронная машина может работать автономно в качестве генератора, питающего подключенную к ней нагрузку, или параллельно с сетью, к которой присоединены другие генераторы. При работе параллельно с сетью она может отдавать или потреблять электрическую энергию, т. е. работать генератором или двигателем. При подключении обмотки статора к сети с напряжением U и частотой f_1 проходящий по обмотке ток создает, так же как в асинхронной машине, вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется по формуле (5.2). В результате взаимодействия этого поля с током $I_{\text{в}}$, проходящим по обмотке ротора, создается электромагнитный момент M , который при работе машины в двигательном режиме является вращающим, а при работе в генераторном режиме – тормозным. В рассматриваемой машине в отличие от асинхронной поток возбуждения (холостого хода) создается обмоткой постоянного тока, расположенной обычно на роторе. В установившемся режиме ротор неподвижен относительно магнитного поля и вращается с частотой вращения $n_1 = n_2$ независимо от механической нагрузки на валу ротора или электрической нагрузки. Таким образом, для установившихся режимов работы синхронной машины характерны следующие особенности:

а) ротор машины, работающей как в двигательном, так и в генераторном режимах, вращается с постоянной частотой, равной частоте вращающегося магнитного поля, т. е. $n_2 = n_1$;

б) частота изменения ЭДС (E), индуцируемой в обмотке якоря, пропорциональна частоте вращения ротора; в) в установившемся режиме ЭДС в обмотке возбуждения не индуцируется; МДС этой обмотки определяется только током возбуждения и не зависит от режима работы машины.

Синхронные машины выполняют с неподвижным или вращающимся якорем. Машины большой мощности для удобства отвода электрической энергии со статора или подвода ее выполняют с неподвижным якорем (рисунок 5.2, а). Поскольку мощность возбуждения невелика по сравнению с мощностью, снимаемой с якоря (0,3 – 2%), подвод постоянного тока к обмотке возбуждения с помощью двух колец не вызывает особых затруднений. Синхронные машины небольшой мощности выполняют как с неподвижным, так и с вращающимся якорем. В обращенной синхронной машине с вращающимся якорем и неподвижным индуктором (рисунок 5.2, б) нагрузка подключается к обмотке якоря посредством трех колец.

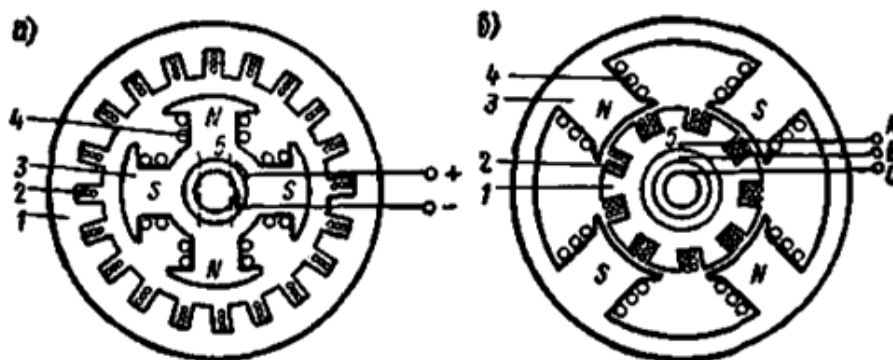


Рисунок 5.2 - Конструктивная схема синхронной машины с неподвижным и вращающимся якорем: 1 – якорь; 2 – обмотка якоря; 3 – полюсы индуктора; 4 – обмотка возбуждения; 5 – кольца и щетки

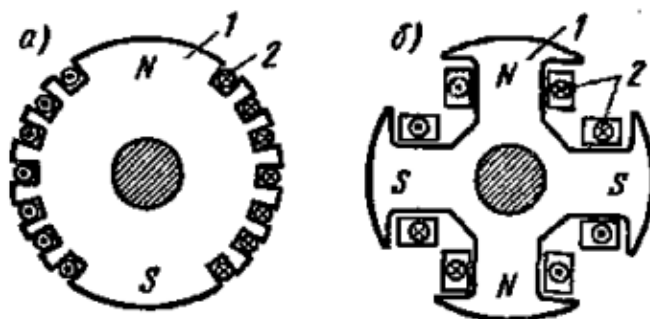


Рисунок 5.3 - Роторы синхронных неявнополюсной и явнополюсной машин: 1 – сердечник ротора; 2 – обмотка возбуждения

Конструкция ротора

В синхронных машинах применяют две различные конструкции ротора: неявнополюсную – с неявновыраженными полюсами (рисунок 5.3, а) и явнополюсную – с явновыраженными полюсами (рисунок 5.3, б). Двух- и четырехполюсные машины большой мощности, работающие при частоте вращения ротора 1500 и 3000 об/мин, изготовляют, как правило, с неявнополюсным ротором. Применение в них явнополюсного ротора невозможно по условиям обеспечения необходимой механической прочности крепления полюсов и обмотки возбуждения. Обмотку возбуждения в такой машине размещают в пазах сердечника ротора, выполненного из массивной стальной поковки, и укрепляют немагнитными клиньями. Лобовые части обмотки, на которые воздействуют значительные центробежные силы, крепят с помощью стальных массивных бандажей. Для получения приблизительно синусоидального распределения магнитной индукции обмотку возбуждения укладывают в пазы, занимающие $2/3$ полюсного деления. Явнополюсный ротор обычно используют в машинах с четырьмя полюсами и более. Обмотку возбуждения в этом случае выполняют в виде цилиндрических катушек прямоугольного сечения, которые размещают на сердечниках полюсов и укрепляют с помощью полюсных наконечников. Ротор, сердечники полюсов и

полюсные наконечники изготавливают из листовой стали. В синхронной машине (рисунок 5.4) сердечник статора собирают из изолированных листов электротехнической стали и на нем располагают трехфазную обмотку якоря. На роторе размещают обмотку возбуждения. В явнополюсных машинах полюсным наконечникам обычно придают такой профиль, чтобы воздушный зазор между полюсным наконечником и статором был минимальным под серединой полюса и максимальным у его краев, благодаря чему кривая распределения индукции в воздушном зазоре приближается к синусоиде.

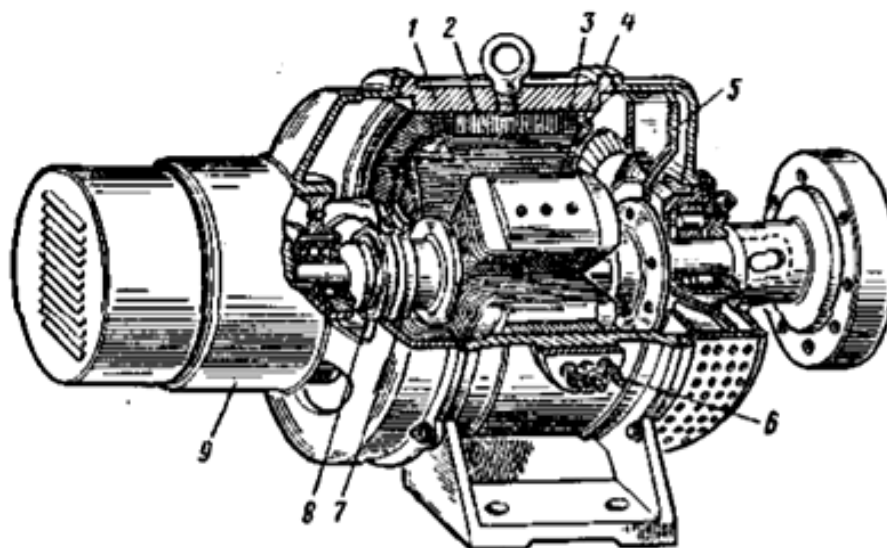


Рисунок 5.4 - Устройство явнополюсной машины: 1 – корпус; 2 – сердечник статора; 3 – обмотка статора; 4 – ротор; 5 – вентилятор; 6 – выводы обмоток; 7 – контактные кольца; 8 – щетки; 9 – возбудитель

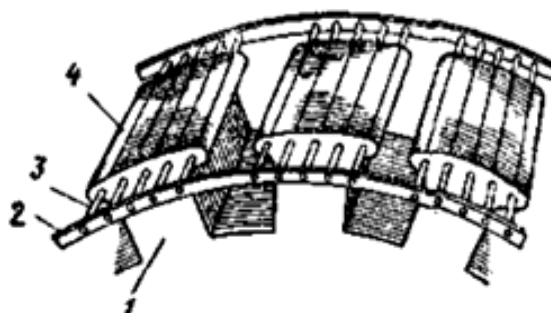


Рисунок 5.5 - Устройство пусковой обмотки в синхронных двигателях: 1 – полюсы ротора; 2 – короткозамыкающие кольца; 3 – стержни «беличьей клетки»; 4 – полюсные наконечники

В полюсных наконечниках синхронных двигателей с явно-полюсным ротором размещают стержни пусковой обмотки (рисунок 5.5), выполненной из материала с повышенным удельным электрическим сопротивлением (латуни). Таковую же обмотку (типа «беличья клетка»), состоящую из медных стержней, при-

меняют и в синхронных генераторах; ее называют успокоительной или демпферной обмоткой, т. к. она обеспечивает быстрое затухание колебаний ротора, возникающих в переходных режимах работы синхронной машины. Если синхронная машина выполнена с массивными полюсами, то при пуске и переходных режимах в них возникают вихревые токи, действие которых эквивалентно действию тока в короткозамкнутой обмотке.

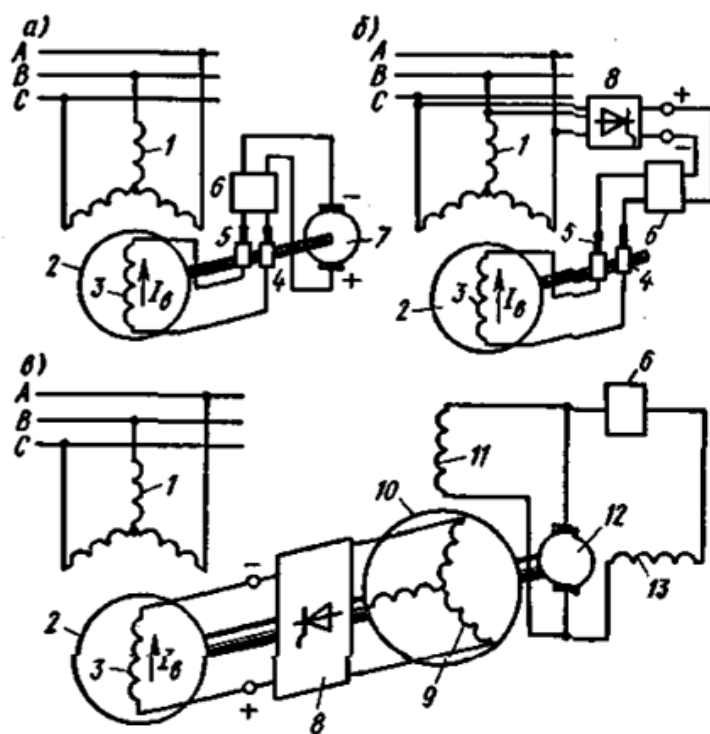


Рисунок 5.6 - Схемы возбуждения синхронной машины: 1 – обмотка якоря; 2 – ротор генератора; 3 – обмотка возбуждения; 4 – кольца; 5 – щетки; 6 – регулятор напряжения; 7 – возбудитель; 8 – выпрямитель; 9 – обмотка якоря возбудителя; 10 – ротор возбудителя; 11 – обмотка возбуждения возбудителя; 12 – подвозбудитель; 13 – обмотка возбуждения подвозбудителя

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения различают системы независимого возбуждения и самовозбуждения. При независимом возбуждении в качестве источника для питания обмотки возбуждения служит генератор постоянного тока (возбудитель), установленный на валу ротора синхронной машины (рисунок 5.6, а), либо отдельный вспомогательный генератор, приводимый во вращение синхронным или асинхронным двигателем. При самовозбуждении обмотка возбуждения питается от обмотки якоря через управляемый или неуправляемый выпрямитель – обычно полупроводниковый (рисунок 5.6, б). Мощность, необходимая для возбуждения, сравнительно невелика и составляет 0,3 – 3% от мощности синхронной машины. В мощных генераторах кроме возбудителя обычно применяют подвозбудитель – небольшой генератор постоянного

тока, служащий для возбуждения основного возбудителя. Основным возбудителем в этом случае может служить синхронный генератор совместно с полупроводниковым выпрямителем. Питание обмотки возбуждения через полупроводниковый выпрямитель, собранный на диодах или на тиристорах, широко применяют как в двигателях и генераторах небольшой и средней мощности, так и в мощных турбо- и гидрогенераторах (тиристорная система возбуждения). Регулирование тока возбуждения в I осуществляется автоматически специальными регуляторами возбуждения, однако в машинах небольшой мощности применяется регулировка и вручную реостатом, включенным в цепь обмотки возбуждения. При необходимости форсирования возбуждения генератора повышают напряжение возбудителя и увеличивают выходное напряжение выпрямителя.

В мощных генераторах кроме возбудителя обычно применяют подвозбудитель – небольшой генератор постоянного тока, служащий для возбуждения основного возбудителя. Основным возбудителем в этом случае может служить синхронный генератор совместно с полупроводниковым выпрямителем. Питание обмотки возбуждения через полупроводниковый выпрямитель, собранный на диодах или на тиристорах, широко применяют как в двигателях и генераторах небольшой и средней мощности, так и в мощных турбо- и гидрогенераторах (тиристорная система возбуждения). Регулирование тока возбуждения в I осуществляется автоматически специальными регуляторами возбуждения, однако в машинах небольшой мощности применяется регулировка и вручную реостатом, включенным в цепь обмотки возбуждения. При необходимости форсирования возбуждения генератора повышают напряжение возбудителя и увеличивают выходное напряжение выпрямителя. В современных синхронных генераторах применяют так называемую бесщеточную систему возбуждения (рисунок 5.6, в). При этом в качестве возбудителя используют синхронный генератор, у которого обмотка якоря расположена на роторе, а выпрямитель укреплен непосредственно на валу. Обмотка возбуждения возбудителя получает питание от подвозбудителя, снабженного регулятором напряжения. При таком способе возбуждения в цепи питания обмотки возбуждения генератора отсутствуют скользящие контакты, что существенно повышает надежность системы возбуждения.

5.2 Задание

Имеется трехфазный синхронный генератор мощностью S_H с напряжением на выходе U_{1H} (обмотка статора соединена «звездой») при частоте тока 50 Гц и частоте вращения n_1 . КПД генератора при номинальной нагрузке η_H (таблица 5.1). Генератор работает на нагрузку с $\cos\varphi_H=0,9$. Требуется определить активную мощность генератора при номинальной нагрузке P_H , ток в обмотке статора I_{1H} , мощность первичного двигателя P_1 и вращающий момент M_1 при непосредственном механическом соединении валов генератора и двигателя.

Таблица 5.1 - Задания по вариантам для расчета трехфазного синхронного генератора

Величины	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S_H , кВА	330	400	270	470	230	600	780	450	700	500
U_{1H} , кВ	6,3	3,2	0,4	6,3	0,7	3,2	6,3	0,4	6,3	3,2
η_H , %	92	92	90	91	90	93	93	91	93	92
n_1 , мин ⁻¹	1000	750	600	1000	600	500	1000	500	1000	600

5.3 Методические указания по решению задачи

Трехфазный синхронный генератор мощностью $S_H = 330$ кВА, напряжением $U_H = 6,3$ кВ при частоте тока $f = 50$ Гц и частоте вращения $n = 1000$ мин⁻¹ имеет коэффициент полезного действия $\eta_H = 92$ %. Генератор работает в номинальном режиме с коэффициентом мощности $\cos\varphi_H=0,9$. Схема соединения обмотки статора – «звезда». Определить: активную мощность генератора P_H , ток обмотки статора I_H , мощность приводного механизма P_{1H} , вращающий момент M_1 при непосредственном соединении валов генератора и приводного механизма.

Решение:

Активная мощность генератора:

$$P_{1H} = S_H \cos\varphi_H = 330 \cdot 0,9 = 297 \text{ кВт.}$$

Ток обмотки статора:

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_H} = \frac{330}{1,73 \cdot 6,3} = 3,3 \text{ А.}$$

Мощность приводного механизма:

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} = \frac{P_H}{\eta_H} = \frac{297}{0,92} = 323 \text{ кВт.}$$

Вращающий момент:

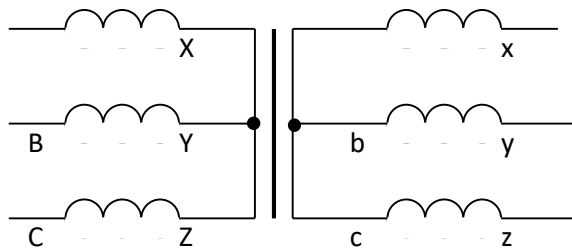
$$M_1 = \frac{P_1}{2 \pi n} = \frac{323000}{2\pi\left(\frac{1000}{60}\right)} = 3084 \text{ Н м.}$$

5.4 Контрольные вопросы

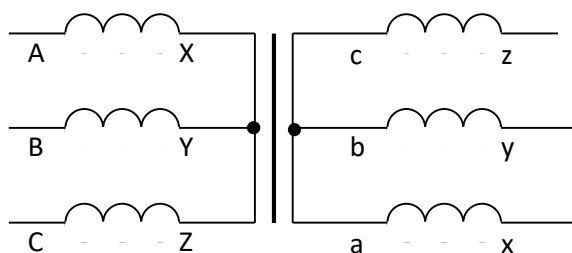
1. Область применения, основные характеристики и принцип действия синхронных электродвигателей?
2. История создания синхронных машин, авторы внесшие наибольший вклад в изобретение этих электромашин?
3. Принцип действия синхронной машины, её электромагнитная схема и схема включения?
4. Какая обмотка в синхронных машинах называется обмоткой якоря, а какая обмотка называется индуктором?
5. От чего зависит скорость вращения магнитного поля синхронной машины?
6. В чем принципиально отличаются асинхронные и синхронные машины. Особенности работы синхронных машин?
7. Конструкции ротора неявнополюсных и явнополюсных синхронных машин.
8. Устройство пусковой обмотки синхронных машинах?
9. Как и от какого источника электрической энергии получают питание обмотки возбуждения синхронных машин?

6 Задачи для самостоятельного решения

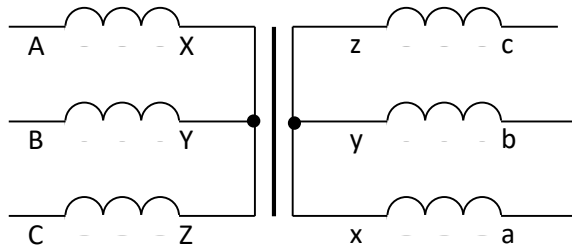
1. Каковы номинальные потери в обмотках трансформатора с $S_H=10$ кВА, $R_1=0,1$ Ом, $X_1=0,3$ Ом, $U_{1H}=10$ кВ?
2. В каких пределах можно изменять выходное напряжение автотрансформатора имеющего обмотку одинакового сечения, чтобы общая часть обмотки не перегружалась при $U_1=220$ В?
3. Каково должно быть сечение последовательной обмотки автотрансформатора при с $S_H=1$ кВА, $U_1=220$ В, $U_2=55$ В, допустимой плотности тока $\rho=2$ А/мм²?
4. Каково должно быть сечение общей обмотки автотрансформатора при с $S_H=1$ кВА, $U_1=220$ В, $U_2=55$ В, допустимой плотности тока $\rho=2$ А/мм²?
5. Рассчитайте число витков обмоток трехобмоточного трансформатора и их сечение при $S_H=1$ кВА, $U_1=220$ В, $U_2=55$ В, $U_3=110$ В, напряжение одного витка $u_1=0,8$ В, допустимая плотность тока $\rho=2$ А/мм², мощности обмоток низшего напряжения составляют половину мощности трансформатора.
6. Изобразите схему включения и найдите числа витков обмоток вольт добавочного трансформатора для увеличения напряжения с 220 до 235 В. напряжение одного витка 0,7 В.
7. Изобразите векторную диаграмму напряжений и определите группу соединения трансформатора.



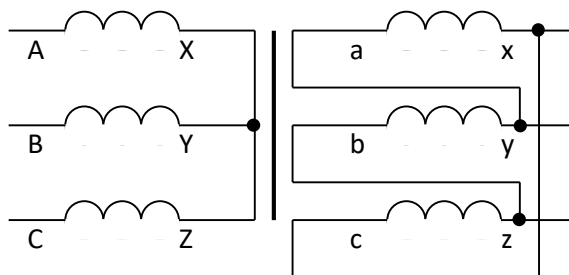
8. Изобразите векторную диаграмму напряжений и определите группу соединения трансформатора.



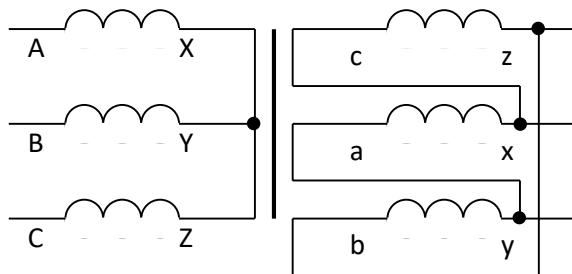
9. Изобразите векторную диаграмму напряжений и определите группу соединения трансформатора.



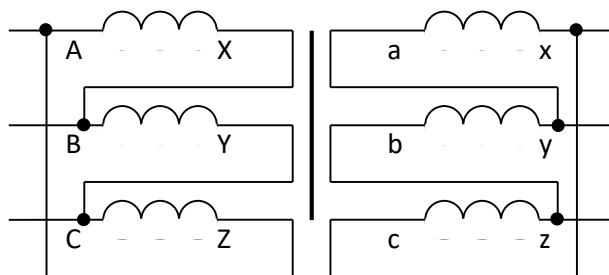
10. Изобразите векторную диаграмму напряжений и определите группу соединения трансформатора.



11. Изобразите векторную диаграмму напряжений и определите группу соединения трансформатора.



12. Изобразите векторную диаграмму напряжений и определите группу соединения трансформатора.



14. Каковы будут номинальные линейные токи и напряжения (входные и выходные) трехфазного трансформатора с параметрами: $S_n=0,44$ кВА, $U_{1\phi}=220$ В, $k=2,2$ при соединении обмоток Y/Δ ?

15. Каковы будут номинальные линейные токи и напряжения (входные и выходные) трехфазного трансформатора с параметрами: $S_n=0,44$ кВА, $U_{1\phi}=220$ В, $k=2,2$ при соединении обмоток Y/Y?

16. Каковы будут номинальные линейные токи и напряжения (входные и выходные) трехфазного трансформатора с параметрами: $S_n=0,44$ кВА, $U_{1\phi}=220$ В, $k=2,2$ при соединении обмоток Δ/Δ ?

17. Каковы будут номинальные линейные токи и напряжения (входные и выходные) трехфазного трансформатора с параметрами: $S_n=0,44$ кВА, $U_{1\phi}=220$ В, $k=2,2$ при соединении обмоток Δ/Y ?

18. В трансформаторе с номинальным входным напряжением 220 В, номинальной мощностью 440 Вт коэффициентом трансформации 2,2 опыт короткого замыкания показал $R_k=20$ Вт, $U_k=15$ В. Найдите активное и реактивное сопротивления короткого замыкания и выходное напряжение трансформатора при номинальной нагрузке.

19. Для трансформатора с $S_n=880$ Вт, $U_{1n}=220$ В, $U_{2n}=110$ В найдите числа витков и сечения первичной и вторичной обмоток, если напряжение одного витка 1 В, и плотность тока в обмотках 2 А/мм².

20. Определить значения момента и частоты вращения в характерных точках характеристики асинхронного двигателя (пусковой, критической номинальной, синхронной) и построить по этим точкам механическую характеристику.

Двигатель: 4А100S4У3

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	$\cos\phi$	μ_k	μ_n	K_I
3	220	1420	82	0,83	2,2	2	6,5

22. Определить частоты вращения и моменты в номинальной точке и точке идеального холостого хода и построить по ним механическую характеристику двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Двигатель: 2ПН100ЛУХЛ4

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	$R_{я}$, Ом	$R_{об}$, Ом
2,2	220	3150	81	0,52	0,51

23. Найти пусковой ток и пусковой момент двигателя постоянного тока, величину добавочного сопротивления для снижения пускового тока в 2 раза.

Двигатель: 2ПН90МУХЛ4

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	$R_{я}$, Ом	$R_{д}$, Ом
1	220	3000	72,5	2,52	1,47

24. Построить естественную механическую характеристику двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Двигатель: 2ПН90ЛУХЛ4

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	$R_{я}$, Ом	R_d , Ом
1,3	220	3150	78	1,3	0,932

25. Найти частоту вращения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения при номинальном моменте и пониженном на 20% магнитном потоке.

Двигатель: 2ПБ90МУХЛ4

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	$R_{я}$, Ом	R_d , Ом
0,55	220	3000	71	3,99	2,55

26. Найти частоту вращения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения при номинальном моменте и введенном в цепь якоря реостате $R_d=2R_{я}$.

Двигатель: 2ПБ90ЛУХЛ4

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	$R_{я}$, Ом	R_d , Ом
0,75	220	3150	77	2,28	1,609

27. Найти частоту идеального холостого хода двигателя постоянного тока параллельного возбуждения при сниженном на 20% от номинального магнитном потоке.

Двигатель: 2ПН100МУХЛ4

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	$R_{я}$, Ом	R_d , Ом
2	220	3000	79	0,805	0,57

28. Найти скорость вращения асинхронного двигателя с фазным ротором при номинальном моменте на валу и добавочном сопротивлении в цепи ротора $R_d=3R_{я}$.

Двигатель: 4АК160S4У3

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	s_n , %	η_n , %	$\cos\varphi$	n_1 , мин ⁻¹	μ_k	K_I	I_{2H}	E_{2K}
7,5	220	5	82,5	0,77	1000	3,5		18	300

29. При каком добавочном сопротивлении в цепи ротора асинхронный двигатель с фазным ротором при номинальной нагрузке на валу не будет вращаться.

Двигатель: 4AK160S4У3

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	$\cos\varphi$	μ_k	μ_p	K_I	I_{2n}	E_{2k}
11	220	1425	86,5	0,86	3			22	305

30. При каком добавочном сопротивлении в цепи ротора в асинхронном двигателе с фазным ротором критическое скольжение возрастет до 1.

Двигатель: 4AK160M6У3

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	s_n , %	η_n , %	$\cos\varphi$	n_1 , мин ⁻¹	μ_k	K_I	I_{2n}	E_{2k}
10	220	4,5	84,5	0,76	1000	3,8		20	310

31. При каком снижении напряжения питания пусковой момент асинхронного двигателя упадет до номинального.

Двигатель: 4A90L2У3

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	$\cos\varphi$	μ_k	μ_p	K_I
2	220	2838	79				

32. Какова станет перегрузочная способность асинхронного двигателя при снижении напряжения питания на 20%?

Двигатель: 4A100S4У3

Его паспортные данные:

P_n , кВт	U_n , В	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	$\cos\varphi$	μ_k	μ_p	K_I
3	220	1420	82	0,83	2,2	2	6,5

33. В опыте холостого хода асинхронного двигателя получено: $I_0=9$ А, $\cos\varphi_0=0,15$. В опыте короткого замыкания получили $U_k=100$ В, $\cos\varphi_k=0,9$. Номинальное фазное напряжение двигателя 220 В, номинальный фазный ток 12 А. Найдите сопротивления по схеме замещения двигателя.

34. Два генератора постоянного тока работают параллельно на общую нагрузку. Ток нагрузки 10 А. Напряжение нагрузки 220 В, сопротивления якоря машин 1 и 1,5 Ом. Определите токи генераторов.

35. Полное синхронное сопротивление синхронного генератора 5 Ом. ЭДС генератора 230 В. Активное сопротивление нагрузки 10 Ом, индуктивное сопротивление нагрузки 5 Ом. Найдите выходное напряжение генератора.

Литература

1. Кацман М.М. Электрические машины. Справочник: учебное пособие. М.: КноРус, 2023. 479 с.
2. Аполлонский С.М. Электрические машины и аппараты: учебное пособие. М.: КноРус, 2024. 387 с.
3. Ермолин Н.П. Электрические машины малой мощности (РЕПРИНТ): учебное пособие. М.: Транспортная компания, 2021. 503 с.
4. Епифанов А.П., Епифанов Г.А. Электрические машины. СПб.: Лань, 2023. 300 с.
5. Ванурин В.Н. Электрические машины. 3-е изд., испр. СПб.: Лань, 2022. 304 с.
6. Константинов Г.Г. Электрические машины: учебник 3-е изд., перераб. и доп. Иркутск: ИРНИТУ, 2020. 308 с.
7. Ионов А.А. Электрические машины: задачник: учебное пособие. Самара: СамГУПС, 2019. 115 с.
8. Электрические машины. Асинхронные и синхронные машины: учебное пособие / Ю.П. Петунин, М.А. Терентьева, Н.П. Бахарев и др. Тольятти: ТГУ, 2015. 100 с.
9. Зубова Р.А. Электрические машины: практикум: учебное пособие. Красноярск: КрасГАУ, 2014. 84 с.
10. Коновалов Ю.В. Электрические машины и электропривод: практикум: учебное пособие. Иркутск: ИРНИТУ, 2018. 66 с.

Учебное издание

Никитин Антон Михайлович
Безик Валерий Александрович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебно-методическое пособие по выполнению практических работ
для студентов направлений подготовки

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Редактор Лебедева Е.М.

Подписано к печати 14.11.2023 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Усл. п. л. 3,89. Тираж 50 экз. Изд. № 7599.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ