

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.08 Электрические машины

Направление подготовки: 35.03.06 Агроинженерия

Профиль образовательной программы: «Электрооборудование и электротехнологии»

Форма обучения очная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Конспект лекций	4
1.1 Лекция №1 Введение. Машины постоянного тока	4
1.2 Лекция №2 Основные электромагнитные и энергетические соотношения	15
1.3 Лекция №3 Генераторы постоянного тока	30
1.4 Лекция №4 Двигатели постоянного тока	37
1.5 Лекция №5 Назначение, устройство и принцип действия трансформаторов	51
1.6 Лекция №6 Рабочий процесс трансформатора	58
1.7 Лекция №7 Устройство и особенности конструктивного выполнения 3-х фазных трансформаторов	67
1.8 Лекция №8 Режимы работы трёхфазных трансформаторов	79
1.9 Лекция №9 Переходные режимы трансформаторов	87
1.10 Лекция №10 Устройство и принцип действия асинхронных машин	105
1.11 Лекция №11 Рабочий процесс, схема замещения, круговая диаграмма и характеристики АД	109
1.12 Лекция №12 Пуск АД и регулирование частоты вращения	122
1.13 Лекция №13 Специальные режимы асинхронных машин	136
1.14 Лекция №14 Назначение, устройство и принцип действия синхронных машин	149
1.15 Лекция №15 Рабочий процесс синхронного генератора	160
1.16 Лекция №16 Параметры и характеристики СГ	169
1.17 Лекция №17 Параллельная работа СГ с энергосистемой	179
1.18 Лекция №18 Синхронные двигатель и компенсатор	191
2. Методические материалы по выполнению лабораторных работ	200
2.1 Лабораторная работа № 1, 2 Вводное занятие	200
2.2 Лабораторная работа № 3, 4 Генератор постоянного тока	202
2.3 Лабораторная работа № 5, 6 Двигатель постоянного тока	207
2.4 Лабораторная работа № 7, 8 Регулирование частоты вращения ДПТ	209
2.5 Лабораторная работа № 9, 10 Однофазные трансформатор и автотрансформатор	212
2.6 Лабораторная работа № 11, 12 Параллельная работа трансформаторов	215
2.7 Лабораторная работа № 13, 14 Несимметричные режимы работы трёхфазного трансформатора	217
2.8 Лабораторная работа № 15, 16, 17 Высшие гармоники в трансформаторах	221
2.9 Лабораторная работа № 18, 19 Трёхфазная асинхронная машина в режимах с заторможенным ротором	231
2.10 Лабораторная работа № 20 Трёхфазный асинхронный электродвигатель в однофазном режиме	234
2.11 Лабораторная работа № 21, 22 Асинхронный генератор	238
2.12 Лабораторная работа № 23, 24 Исследование АД с КЗР в режимах холостого хода и короткого замыкания	241
2.13 Лабораторная работа № 25, 26 Испытание трёхфазного синхронного генератора	245
3. Методические материалы по проведению практических занятий	252
3.1 Практическое занятие № 1 Решение задач по основам теории электротехники	252
3.2 Практическое занятие № 2 Решение задач по основам теории машин постоянного тока	255
3.3 Практическое занятие № 3 Построение механической х-ки ДПТ	259
3.4 Практическое занятие № 4 Энергетическая диаграмма ДПТ	261
3.5 Практическое занятие № 5 Расчёт магнитной цепи трансформатора	262
3.6 Практическое занятие № 6 Построение внешней характеристики трансформатора	265

3.7 Практическое занятие № 7	Расчёт режима КЗ трансформатора	267
3.8 Практическое занятие № 8, 9	Расчёт переходных режимов	269
3.9 Практическое занятие № 10, 11	Построение векторной диаграммы АД	275
3.10 Практическое занятие № 12, 13	Построение круговой диаграммы АД	276
3.11 Практическое занятие № 14, 15	Расчёт рабочих характеристик АД	281
3.12 Практическое занятие № 16, 17	Расчёт и построение механической характеристики АД	287
3.13 Практическое занятие № 18, 19	Энергетическая диаграмма АД	291
3.14 Практическое занятие № 20, 21	Векторная диаграмма СМ	292
3.15 Практическое занятие № 22, 23	Построение внешней характеристики СГ	297
3.16 Практическое занятие № 24, 25	Параллельная работа СГ с сетью	299

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Лекция №1 (2 часа).

Тема: «Введение. Машины постоянного тока»

1.1.1 Вопросы лекции:

1. Назначение и принцип действия.
2. Устройство и магнитная цепь машины постоянного тока.
3. Обмотки якоря машин постоянного тока

1.1.2 Краткое содержание вопросов

1. Назначение и принцип действия.

Машины постоянного тока — генераторы и двигатели — находят себе широкое применение в современных электроустановках. Они выполняются с неподвижными полюсами и вращающимся якорем. На рис. 5-1 представлен схематически разрез четырехполюсной машины. Здесь же приведены названия ее основных частей.

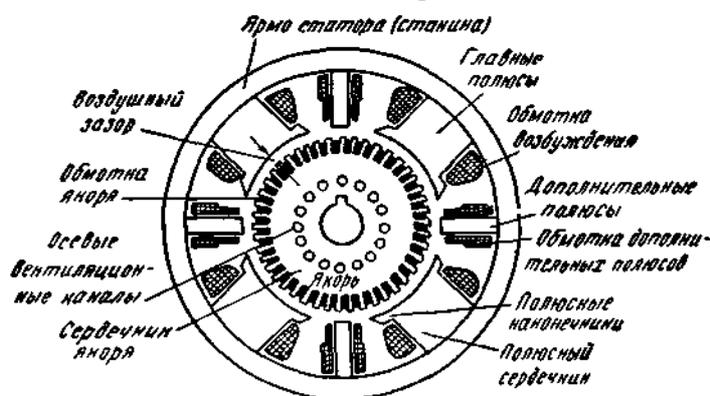


Рис. 1. Основные части машины постоянного тока.

Характерной частью машин постоянного тока является коллектор. Он состоит из медных пластин, разделенных изоляционными прослойками и собранных в виде цилиндра (рис. 5-2,а).

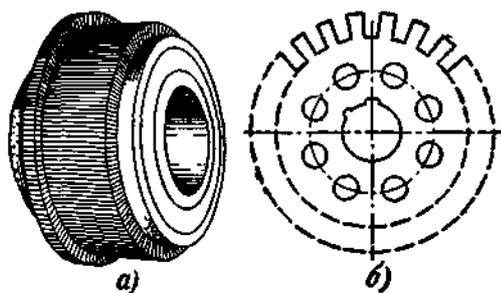


Рис. 2. Коллектор (а) и лист якоря (б)

Якорь машины постоянного тока при его вращении перемагничивается, поэтому он собирается из листов электротехнической стали обычно толщиной 0,5 мм (рис. 5-2,б). Листы перед сборкой покрываются с обеих сторон лаком; таким образом, предотвращается образование в стали якоря больших вихревых токов. На внешней поверхности якоря после сборки листов получают пазы и зубцы. В пазы закладываются проводники обмотки якоря, которые по особым правилам соединяются между собой и с коллекторными пластинами. На рис. 5-3 показаны пазы якоря. Они обычно делаются открытыми, что в большой степени облегчает укладку обмотки и позволяет хорошо ее изолировать. Для небольших машин делаются полужакрытые пазы, так же как для статоров асинхронных машин. У машин небольшой и средней мощности якорь помещается непосредственно на валу, для больших машин — на втулке, выполняемой в виде крестовины. Главные полюсы служат для создания основного поля в машине. Они имеют сердечники, на которых помещается обмотка возбуждения, и полюсные

наконечники. Последние удерживают катушки возбуждения и способствуют наиболее благоприятному распределению индукции в воздушном зазоре машины вдоль окружности якоря. Полюсы в современных машинах собираются из стальных листов толщиной $0,5 \div 1$ мм для уменьшения потерь от вихревых токов в поверхностном слое полюсных наконечников, обращенном к якорю. Вихревые токи возникают вследствие пульсации индукции, вызванной зубчатостью якоря: под отдельными частями полюсного наконечника проходит то зубец, то паз якоря, что вызывает в этих частях то сгущение, то разрежение магнитных линий. Пульсации индукции проникают в сравнительно неглубокий слой, поэтому можно было бы делать слоистыми только полюсные наконечники. Однако технологически обычно выгоднее весь полюс собирать из листов.

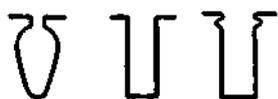


Рис. 3. Пазы якоря

Ярмо статора или станина для современных машин большой и средней мощности выполняется из прокатанной листовой стали, согнутой в цилиндр и сваренной по шву, или из литой стали; для машин небольшой мощности — из цельнотянутой стальной трубы. Дополнительные полюсы выполняются обычно из ковanej стали или собираются из листов. Они, так же как главные полюсы, прикрепляются к станине при помощи болтов. Их назначение — создать условия для безыскровой работы щеток на коллекторе (улучшить коммутацию, см. § 5-7).

На рис. 5-4 показана машина в разобранном виде. Здесь в нижней части показан якорь, имеющий слева вентилятор и справа коллектор.

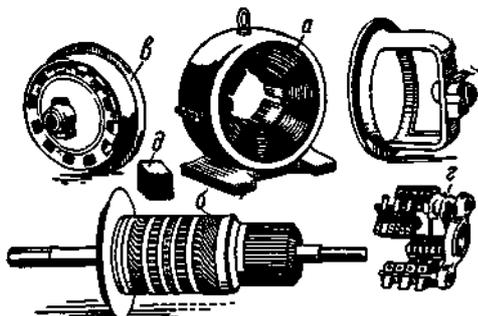


Рис. 4. Машина постоянного тока в разобранном виде. *a* — станина, *б* — якорь, *в* — подшипниковые щиты, *г* — траверса со щеткодержателями, *д* — коробка, прикрывающая зажимы.

Коллектор состоит из клинообразных пластин твердотянутой меди, которые изолируются друг от друга и от корпуса коллектора миканитом (с малым содержанием связующих веществ). Его конструкция показана на рис. 5-5.

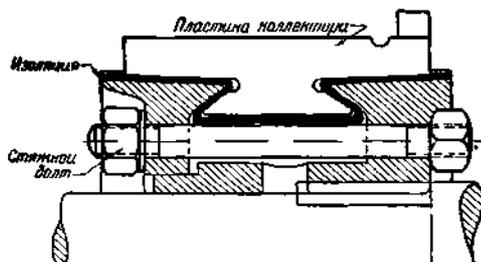


Рис. 5. Конструкция коллектора.

Для малых машин в последние годы часто применяются коллекторы на пластмассе. В этом случае коллекторные пластины вместе с миканитовыми прокладками между ними запрессовываются в пластмассу при соответствующей термической обработке.

На коллектор опираются угольные, графитные или металлографитные щетки, помещенные в щеткодержателях. При вращении якоря щетки сохраняют неизменное положение по отношению к полюсам машины. Щетка 2 (рис. 5-6), помещенная в обойме щеткодержателя, прижимается пружиной к коллектору. Щеткодержатели укрепляются на щеточных болтах, которые в свою очередь укрепляются на траверсе (рис. 5-4,з).

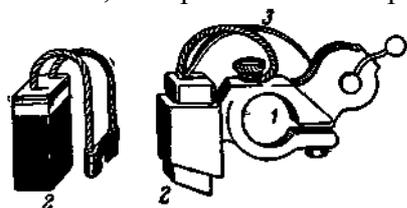


Рис. 6. Щетка и щеткодержатель со щеткой. 1 — отверстие для щеточного болта; 2 — щетка; 3 — пружина.

Траверса связывается либо с подшипниковым щитом, либо со станиной; ее можно поворачивать и тем самым изменять положение всей системы щеток по отношению к полюсам машины.

Щеточные болты изолируются от траверсы при помощи изоляционных шайб и втулок.

2. Устройство и магнитная цепь машины постоянного тока.

Вначале обратимся к кольцевому якорю. Он представляет собой полый цилиндр, собранный из листов электротехнической стали; этот цилиндр укреплен на валу машины, например, при помощи крестовины, имеющей спицы из немагнитного материала. Обмотка якоря обвивает полый цилиндр в виде спирали, поэтому ее называют спиральной или кольцевой обмоткой. Она образует замкнутый контур. Можно считать, что магнитный поток, создаваемый электромагнитами машины, будет проходить только по якорю (рис. 5-7). Если принять, что э.д.с. в проводниках наводятся в результате пересечения проводниками индукционных линии потока в воздушном зазоре, то при вращении якоря э.д.с. возникнут только в проводниках, лежащих на наружной поверхности якоря.

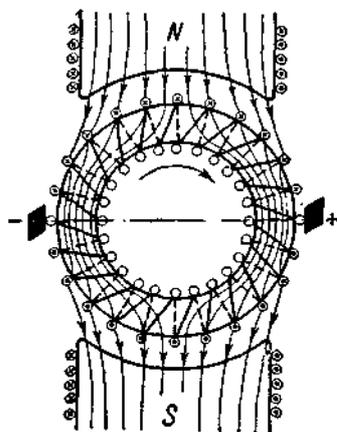


Рис. 5-7. Направление э.д.с., наведенных в обмотке кольцевого якоря.

Направления э.д.с. найдем, пользуясь правилом правой руки. В контуре обмотки вследствие симметрии обеих половин машины никакого уравнивающего тока возникать не будет, так как в любой момент времени э.д.с. в проводниках, лежащих под разноименными полюсами, противоположны по направлению и сумма их равна нулю.

Чтобы использовать э.д.с. обмотки, соединим ее с внешней цепью посредством неподвижных щеток. Последние могут скользить непосредственно по освобожденной от изоляции части проводников якоря, как это иногда делалось в машинах, изготовлявшихся в 80-х годах прошлого столетия. Для того чтобы полностью использовать э.д.с. обмотки, щетки нужно поставить на геометрической нейтральной, т. е. на линии, перпендикулярной оси полюсов. Щетки делят обмотку на две параллельные ветви, причем при указанном на

рис. 5-7 положении щеток э.д.с. параллельной ветви будет наибольшей. Если щетки смещать, то э.д.с. в параллельной ветви будет уменьшаться и в предельном случае, когда щетки будут совпадать с осью полюсов, она будет равна нулю, так как в этом случае в каждую параллельную ветвь будут входить проводники с э.д.с., сумма которых равна нулю.

Напряжение на щетках, равное э.д.с. параллельной ветви обмотки, будет при большом числе витков обмотки практически постоянным по величине. Рассматривая вращающийся якорь (рис. 5-7), мы видим, что витки параллельной ветви, э.д.с. которых определяют напряжение на щетках, все время находятся в поле одной и той же полярности и, следовательно, в сумме дадут э.д.с. одного направления, несмотря на то, что э.д.с. каждого витка при его вращении будет переменной.

Приспосабливать обмотку якоря для непосредственного контакта со щетками нецелесообразно; гораздо лучше и надежнее этот контакт обмотки со щетками осуществить при помощи пластин коллектора; они при этом соединяются проводниками с отдельными витками замкнутой обмотки якоря (рис. 5-8), и, таким образом, щетки посредством коллектора так же делят обмотку якоря на параллельные ветви, как это было при непосредственном их контакте с проводниками якоря.

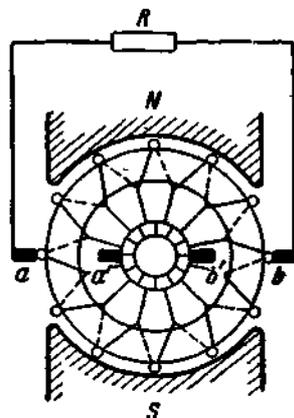


Рис. 5-8. Коллекторные пластины как замена непосредственного контакта щеток с проводниками якоря.

Идея применения коллектора в машинах постоянного тока впервые была осуществлена русским академиком Б. С. Якоби в изобретенном им двигателе постоянного тока (1834 г.).

Чем больше коллекторных пластин приходится на один полюс, тем меньше будут так называемые коллекторные пульсации напряжения на щетках. Они определяются как отношение разности максимального и среднего напряжений к среднему напряжению.

3. Обмотки якоря машин постоянного тока

а) Общие определения.

Кольцевой якорь со спиральной обмоткой в настоящее время не применяется, так как более выгодным и надежным является барабанный якорь с обмоткой, все проводники которой укладываются на его внешней поверхности.

При барабанном якоре обмотка состоит из витков, имеющих ширину, равную (или почти равную) полюсному делению. Здесь виток охватывает весь поток Φ , вступающий в якорь, и э.д.с. в нем получается в 2 раза больше, чем в витке спиральной обмотки, где максимальный поток, охватываемый витком, равен половине потока, вступающего в якорь. Поэтому для получения одной и той же э.д.с. при барабанной обмотке требуется витков в 2 раза меньше, чем при кольцевой. К тому же изготовление кольцевой обмотки гораздо сложнее и условия ее охлаждения хуже, чем барабанной обмотки.

Проводники барабанной обмотки укладываются в пазы. Они называются активными проводниками. Два активных проводника, соединенных друг с другом,

образуют виток. Витки соединяются между собой и с коллекторными пластинами и образуют замкнутый контур.

Часть обмотки, находящаяся при ее обходе между следующими друг за другом коллекторными пластинами, называется секцией. Секция может состоять из одного или нескольких витков (рис. 5-9). Ширину секции следует выбирать или равной полюсному делению (расстояние по окружности якоря между осями соседних полюсов), или близкой к нему. Секционные стороны в пазах обычно размещают в два слоя. На рис. 5-10 показаны пазы якоря с размещенными в них секционными сторонами. Здесь прямоугольниками изображены секционные стороны, которые могут состоять из одного или нескольких активных проводников.

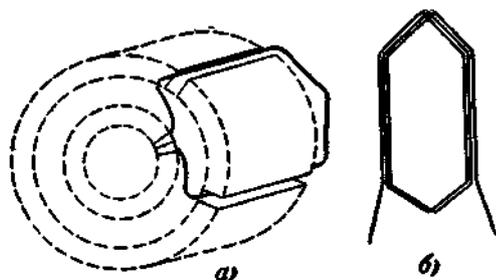


Рис. 5-9. Одновитковая секция, заложенная в пазы (а), и трехвитковая секция (б).

Для того чтобы правильно соединить секции обмотки между собой и с коллекторными пластинами, нужно найти шаги обмотки. Их целесообразно измерять числом элементарных пазов, причем под последними понимаются условные пазы с двумя секционными сторонами, расположенными одна над другой. На рис. 5-10,а показаны реальные пазы, которые в то же время являются и элементарными. На рис. 5-10,б и в показаны пазы, из которых каждый состоит соответственно из двух и трех элементарных пазов. Нумерация элементарных пазов производится так, как показано на рис. 5-10.

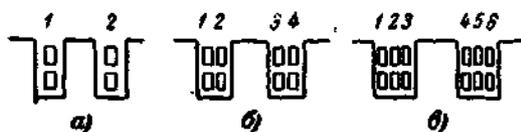


Рис. 5-10. Пазы якоря

Секция обмотки укладывается в пазы таким образом, чтобы одна ее сторона находилась в верхнем слое паза, а другая сторона в нижнем слое. На рис. 5-11 изображены секции обмоток. Здесь часть секции, находящаяся в верхнем слое, изображена сплошной линией, а часть секции, находящаяся в нижнем слое, — пунктирной линией.

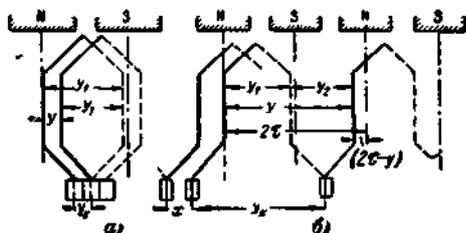


Рис. 5-11. Секции якорных обмоток.

Барabanные обмотки делятся на петлевые и волновые. Секции петлевой обмотки показаны на рис. 5-11,а и волновой обмотки — на рис. 5-11,б.

Различают следующие шаги обмоток (рис. 5-11): y_1 — первый шаг, равный ширине секции или расстоянию между начальной и конечной сторонами секции; y_2 — второй шаг, равный расстоянию между конечной стороной одной секции и начальной стороной следующей секции; y — результирующий шаг, равный расстоянию между начальными сторонами следующих друг за другом секций; y_k — шаг по коллектору, равный расстоянию между началом и концом секции по окружности коллектора (измеряется

числом коллекторных делений, т. е. расстояний между серединами соседних коллекторных пластин).

Если y измеряется числом делений элементарных пазов, то y и y_k выражаются одним и тем же числом, т. е.

$$y = y_k. \quad (5-1)$$

Если обозначить: S — число секций, K — число коллекторных пластин, Z_3 — число элементарных пазов, то

$$S = K = Z_3. \quad (5-2)$$

Минимальное число параллельных ветвей $2a$ замкнутой обмотки равно двум, т. е.

$$2a \geq 2. \quad (5-3)$$

Для обеспечения симметрии обмотки общее число секций выбирается таким образом, чтобы на каждую пару параллельных ветвей приходилось целое число секций. В этом случае имеем:

$$\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \text{целому числу}. \quad (5-4)$$

б) *Петлевая обмотка.*

При петлевой обмотке первый шаг делается по окружности якоря в одну сторону, второй шаг — в противоположную (рис. 5-11,а), поэтому шаги петлевой обмотки связаны соотношением

$$y_1 - y_2 = y = y_k. \quad (5-5)$$

Обычно $y_1 > y_2$ и $y > 0$. Такая обмотка называется неперекрещенной или правой. Здесь при обходе секций мы будем все время смещаться вправо. При $y_1 < y_2$ и $y < 0$ получается перекрещенная или левая петлевая обмотка. В этом случае при обходе обмотки будем все время смещаться влево. Левая обмотка на практике почти не встречается.

Число параллельных ветвей петлевой обмотки определяется числом полюсов $2p$ и значением результирующего шага y . В общем случае число параллельных ветвей петлевой обмотки равно:

$$2a = 2py. \quad (5-6)$$

На рис. 5-11,а показаны две секции петлевой обмотки с шагом $y = y_k = 1$. Такая обмотка называется простой петлевой. Она имеет число параллельных ветвей, равное числу полюсов: $2a = 2p$. Простые петлевые обмотки применяются для машин средней и большой мощности.

Если $y > 1$, то получается сложная петлевая обмотка. Петлевую обмотку называют также параллельной, и соответственно различают простую и сложную параллельные обмотки.

На рис 5-12 приведена схема — развертка простой петлевой обмотки при $Z_3 = S = K = 24$, $2p = 2a = 4$.

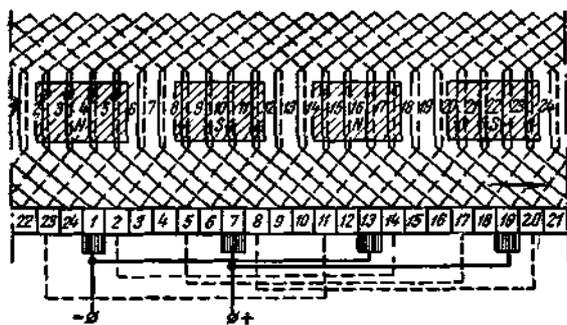


Рис. 5-12. Схема-развертка простой петлевой обмотки. $Z_3 = S = K = 24$; $2p = 2a = 4$; $y = y_k = 1$; $y_1 = 6$; $y_2 = 5$.

Шаги обмотки взяты равными:

$$y = y_k = 1; \quad y_1 \approx \frac{Z_2}{2p};$$

$$y_1 = 6; y_2 = y_1 - y; y_2 = 5.$$

Если схему начертить на полосе бумаги и обернуть ею цилиндр подходящих размеров, то мы получим наглядное представление о соединении секций между собой и с коллекторными пластинами.

Для той же самой обмотки на рис. 5-12а представлена так называемая радиальная схема.

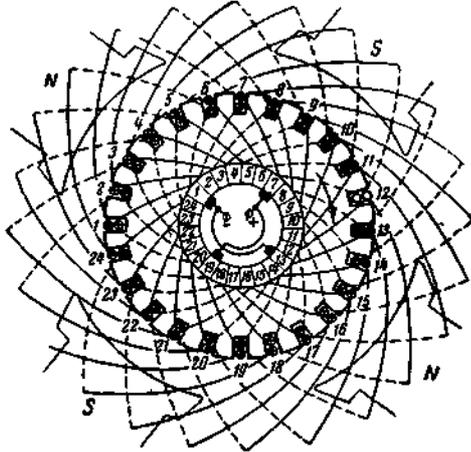


Рис. 5-12а. Радиальная схема простой петлевой обмотки (кривые вне якоря условно показывают лобовые соединения на задней стороне машины, кривые внутри якоря — лобовые соединения на ее передней стороне; см. рис. 5-12).

На рис. 5-12 показаны полюсы и э.д.с., наведенные в секционных сторонах. Мы приняли, что полюсы расположены над обмоткой и что якорь относительно полюсов и щеток движется вправо.

При выбранном положении якоря относительно полюсов получаются четыре параллельные ветви ($2a = 2p = 4$); они показаны на рис. 5-13, где цифрами без штриха обозначены верхние секционные стороны, а цифрами со штрихом — нижние.



Рис. 5-13. Параллельные ветви простой петлевой обмотки (см. рис. 5-12).

При перемещении якоря некоторые секции замыкаются щетками. Они в это время не участвуют в создании э.д.с. параллельной ветви. Для рассматриваемого случая мы будем иметь то 6, то 5 секций в каждой параллельной ветви. В соответствии с этим напряжение на щетках будет несколько изменяться по величине, оставаясь постоянным по направлению. В практических случаях, когда взято на параллельную ветвь обмотки 15—20 и больше секций, коллекторные пульсации напряжения на щетках получаются меньше 1%.

Щетки на рис. 5-12 и 5-12а соприкасаются с коллекторными пластинами, соединенными с секционными сторонами, находящимися приблизительно посередине между главными полюсами, т. е. вблизи геометрической нейтрали. В этом случае считают, что щетки находятся приблизительно на геометрической нейтрали, имея в виду положение щеток не относительно полюсов, а относительно секционных сторон, с которыми они соединены. Щетки устанавливаются на геометрической нейтрали не только для того, чтобы иметь наибольшую э.д.с. в параллельной ветви, но и для того, чтобы в секциях, замыкаемых щетками почти накоротко, не могли образоваться большие токи.

Из сложных петлевых обмоток применяются иногда обмотки при $y = 2$ для машин на большие токи, для которых увеличение числа параллельных ветвей за счет увеличения числа полюсов невозможно или невыгодно.

Сложную петлевую обмотку можно представить себе, как две простые петлевые обмотки, уложенные на один и тот же якорь и смещенные одна относительно другой (рис. 5-14).

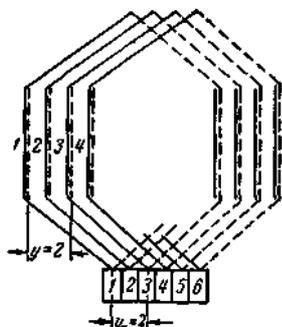


Рис. 5-14. Секции сложной петлевой обмотки ($y = y_k = 2$).

При исследовании якорных обмоток машин постоянного тока, так же как якорных обмоток машин переменного тока, применяются векторные диаграммы э.д.с. обмоток. Такие диаграммы можно построить, приняв, что кривая распределения индукции вдоль окружности якоря (кривая поля машины) синусоидальна. Тогда мы можем э.д.с., наведенные в секционных сторонах, изобразить временными векторами. Следовательно, э.д.с. одной какой-либо секции также изобразится вектором, равным разности векторов э.д.с., наведенных в сторонах этой секции (см. § 3-3,а).

Электродвижущие силы секций, следующих одна за другой, сдвинуты по фазе в соответствии с их сдвигом в магнитном поле. Этот сдвиг легко найти, так как сдвигу в магнитном поле на полюсное деление τ соответствует сдвиг по фазе на 180° .

Для петлевой обмотки сдвиг между следующими одна за другой секциями равен y делений элементарных пазов, чему соответствует

$$\alpha = \frac{y}{\tau} 180^\circ$$

Для обмотки, схема которой показана на рис. 5-12, имеем ($y = 1$, $\tau = Z_p/2p = 24/4 =$

6, следовательно, $\alpha = \frac{1}{6} \cdot 180^\circ = 30^\circ$

Складывая при обходе обмотки векторы э.д.с. отдельных секций, мы получим многоугольники э.д.с., каждый из которых соответствует одной паре параллельных ветвей обмотки. Они называются многоугольниками э.д.с. секций обмотки (или потенциальными многоугольниками обмотки).

Для обмотки рис. 5-12 мы получим два равных друг другу многоугольника э.д.с.

$$\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \frac{24}{2} = 12$$

обмотки ($a = 2$) с числом сторон $\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \frac{24}{2}$, показанных на рис. 5-15. Здесь цифрами обозначены номера секций, соответствующие номерам коллекторных пластин.

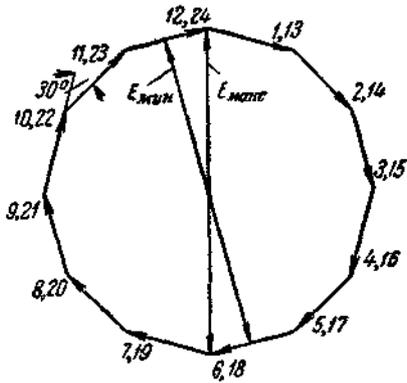


Рис. 5-15. Многоугольник э.д.с. обмотки (см. рис. 5-12).

При помощи рис. 5-15 можно найти пульсацию э.д.с. на щетках. Она равна:

$$\Delta E\% = \frac{E_{\max} - E_{\text{ср}}}{E_{\text{ср}}} \cdot 100\%$$

$$E_{\text{ср}} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2};$$

для данного случая $\Delta E\% \approx 1,2\%$

Очевидно, что при K/a , равном нечетному числу, которое обычно и выбирается, пульсация э.д.с. на щетках будет относительно меньше.

При увеличении числа секций в параллельной ветви многоугольник приближается к окружности.

Из схем обмоток и соответствующих многоугольников э.д.с. следует, что если мы при обходе некоторого числа секций обмотки смещаемся в магнитном поле на \square , то получаем при этом одну параллельную ветвь. Таким образом, число параллельных ветвей равно общему сдвигу в магнитном поле при обходе всех секций обмотки, поделенному на \square . Для петлевой обмотки общий сдвиг в магнитном поле равен yS , а число параллельных ветвей

$$2a = y \cdot S : \tau = y \cdot S : \frac{S}{2p} = 2py$$

в) Волновая обмотка.

При волновой обмотке второй шаг y_2 делается в ту же сторону, что и первый шаг y_1 (рис. 5-11,б), поэтому шаги обмотки связаны соотношением

$$y_1 + y_2 = y = y_k. \quad (5-7)$$

Результирующий шаг y должен быть больше или меньше, чем двойное полюсное деление $2\square$, чтобы при обходе секций все они были включены в обмотку. Поэтому, делая один обход по окружности якоря, мы попадаем в элементарный паз, сдвинутый вправо или влево от начала обхода на x делений элементарных пазов (рис. 5-11,б). Так как мы должны при этом сделать столько результирующих шагов y , сколько имеется пар полюсов, то $yp \pm x = Z_s = S$. Отсюда получаем:

$$y = \frac{S \mp x}{p} \quad (5-8)$$

Число параллельных ветвей волновой обмотки зависит только от x , оно равно $2a = 2x$. В этом можно убедиться, рассматривая схемы обмоток.

Формула для результирующего шага пишется следующим образом

$$y = y_k = \frac{S \mp a}{p} = \frac{K \mp a}{p} \quad (5-9)$$

Верхний знак соответствует неперекрещенной обмотке, нижний знак — перекрещенной.

При $a = 1$ получается простая волновая обмотка или простая последовательная обмотка. При $a > 1$ получается сложная волновая или сложная последовательная обмотка.

На рис. 5-16 приведена схема-развертка простой волновой обмотки:

$$2p = 4; Z_s = S = K = 19; 2a = 2;$$

$$y = y_k = \frac{19-1}{2} = 9; \quad y_1 \approx \frac{y}{2}; \quad y_1 = 5;$$

$$y_2 = y - y_1 = 4.$$

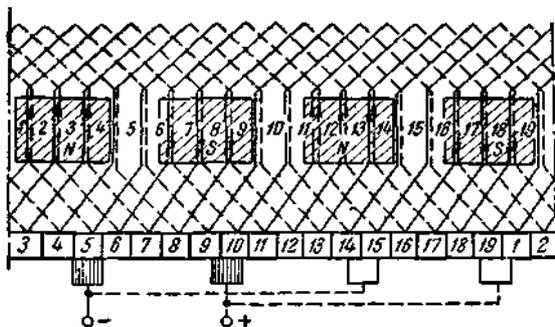


Рис. 5-16. Схема-развертка простой волновой обмотки $Z_s = S = K = 19; 2p = 4; y = y_k = 9; y_1 = 5; y_2 = 4; a = 1$.

Радиальная схема той же обмотки приведена на рис. 5-16а.

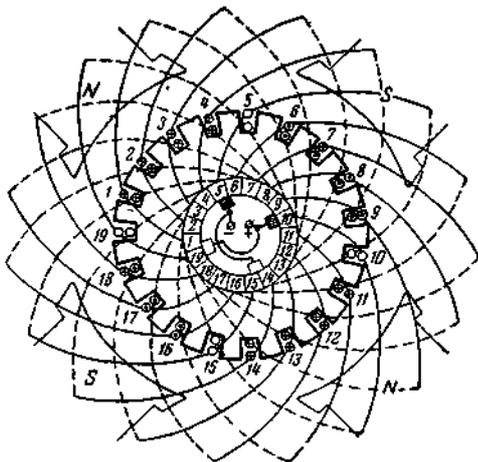


Рис. 5-16а. Радиальная схема простой волновой обмотки (кривые линии вне якоря условно показывают лобовые соединения на задней стороне машины, кривые внутри якоря — лобовые соединения на ее передней стороне (см рис. 5-16).

На рис. 5-17 представлены параллельные ветви обмотки, соответствующие положению якоря и коллектора относительно полюсов и щеток, показанному на рис. 5-16. Получаются две параллельные ветви. Для любой волновой обмотки можно взять только две щетки (заштрихованные на рис. 5-16 и 5-17). Однако в обычных случаях берут число щеток равным числу полюсов, так как в этом случае поверхность коллектора лучше используется и его размеры можно сократить. Выключаемые при этом секции (замкнутые щетками) практически не изменяют (при большом числе секций в параллельной ветви) ее э.д.с.

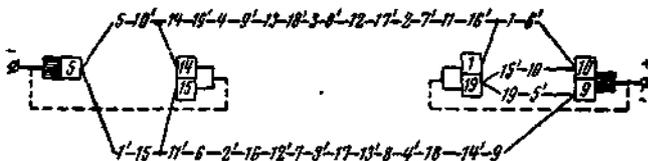


Рис. 5-17. Параллельные ветви простой волновой обмотки (см. рис. 5-16) при двух щетках и при четырех щетках.

Сложную волновую обмотку можно представить себе, как a простых волновых обмоток, уложенных на якоре, имеющем число пазов и число коллекторных пластин в a раз больше, чем это нужно для одной простой волновой обмотки. Сложные волновые обмотки на практике встречаются сравнительно редко.

Простая волновая обмотка находит себе самое широкое применение для нормальных машин небольшой и средней мощности при $2p=4$ и 6 . Ее преимущество перед простой петлевой обмоткой заключается в том, что она при любом числе полюсов имеет только две параллельные ветви и, следовательно, при $2p>2$ требует меньше проводников. При этом сечение проводников должно быть взято больше, чем при петлевой обмотке, но при меньшем числе проводников изготовление обмотки облегчается. Другим важным преимуществом простой волновой обмотки является то, что она не требует уравнивающих соединений, тогда как петлевая обмотка при $2p>2$ должна быть снабжена уравнивающими соединениями.

Число параллельных ветвей волновой обмотки, как отмечалось, зависит только от x коллекторных делений между началом и концом одного обхода по окружности коллектора. Это можно доказать, пользуясь теми же рассуждениями, что и в отношении петлевой обмотки. Для волновой обмотки можно также построить векторные диаграммы э.д.с. — многоугольники э.д.с. обмотки. Здесь сдвиг по фазе э.д.с. секций, следующих одна за другой при обходе обмотки, соответствует их сдвигу в магнитном поле, равному $2\alpha - \gamma$ (см. рис. 5-11,б). Так как число параллельных ветвей $2a$ равно общему сдвигу в магнитном поле при обходе всех секций обмотки, т. е. $(2\alpha - \gamma)S$, поделенному на α , то получим: $2a = (2\alpha - \gamma)S : \alpha$. Подставляя сюда (5-8) и $\alpha = S/2p$, будем иметь:

$$2a = \left(\frac{S}{p} - \frac{S \mp x}{p} \right) S : \frac{S}{2p} = 2x$$

(здесь знак минус опускаем, так как $2a$ — число существенно положительное).

г) Уравнивающие соединения.

Обратимся к рис. 5-12, 5-12а и 5-13, где приведены схемы простой петлевой обмотки и ее параллельных ветвей. При различных потоках отдельных магнитных цепей э.д.с. параллельных ветвей будут неодинаковы. Различие потоков может быть вызвано эксцентричным положением якоря относительно полюсов, раковинами, получающимися при отливке станины. Допустим, например, что э.д.с. верхней ветви на рис. 5-13 больше э.д.с. третьей (сверху) ветви. Тогда в контуре, состоящем из этих ветвей, правых и левых щеток и соединительных проводников между ними, будет проходить уравнивающий (постоянный) ток, причем он будет иметь большое значение, даже при небольшом различии э.д.с. ветвей обмотки. В результате верхние щетки будут иметь чрезмерную нагрузку, что может вызвать искрение под этими щетками.

Для того чтобы уменьшить уравнивающие токи, проходящие через щетки, устраивают уравнивающие соединения. Они представляют собой проводники, соединяющие друг с другом точки обмотки с теоретически равными потенциалами, т. е. те точки обмотки, которые имели бы равные потенциалы, если бы были соблюдены все условия симметрии. На рис. 5-12 и 5-13 показаны пунктиром четыре группы уравнивающих соединений (каждая группа представляет собой соединение a "равнопотенциальных" точек). Для реальных обмоток делают обычно 6—12 групп уравнивающих соединений. Только для обмоток быстроходных машин, таких, например, как возбудители к мощным турбогенераторам, часто делают полное возможное число групп уравнивающих соединений, равное K/a .

При наличии уравнивающих соединений уравнивающие токи будут проходить главным образом по этим соединениям. Токи будут переменными. Они образуют многофазную систему и, следовательно, создадут н.с., вращающуюся с такой же скоростью, с какой вращается якорь, но в противоположную сторону. Эта н.с. относительно полюсов будет неподвижной и согласно закону Ленца будет выравнивать

потоки под полюсами. Тем самым будет почти полностью устраняться причина, вызывающая уравнивающие токи через щетки.

При простой волновой обмотке нельзя выполнить уравнивающие соединения, но они здесь не требуются, так как секции любой параллельной ветви этой обмотки располагаются под всеми полюсами и неравенство отдельных потоков в одинаковой степени сказывается на э.д.с. обеих параллельных ветвей.

1.2 Лекция №2 (2 часа).

Тема: «Основные электромагнитные и энергетические соотношения»

1.2.1 Вопросы лекции:

1. ЭДС обмотки якоря и пульсации ЭДС.
2. Электромагнитный момент машины постоянного тока.
3. Реакция якоря и её влияние на работу машины постоянного тока.

1.2.2 Краткое содержание вопросов

1. ЭДС обмотки якоря и пульсации ЭДС.

На рис. 5-20 представлена кривая поля машины при холостом ходе (или кривая распределения индукции B в воздушном зазоре вдоль окружности якоря). Допустим, что щетки стоят на геометрической нейтрали. Тогда можем считать, что при $y_1 = \square$ все проводники одной параллельной ветви обмотки находятся как бы под одним полюсом, так как в этом случае э.д.с. сторон витка складываются арифметически.

Электродвижущая сила, наводимая в проводнике, движущемся со скоростью v и имеющем активную длину l , равна:

$$e_x = B_x l v, \quad (5-10)$$

где B_x — индукция в той точке, где в данный момент находится проводник.

Для определения э.д.с. параллельной ветви E_a (э.д.с. якоря) нужно просуммировать э.д.с. всех $N/2a$ проводников, составляющих параллельную ветвь (N — общее число проводников обмотки якоря):

$$E_a = \sum_{\left(\frac{N}{2a}\right)} e_x = l v \sum_{\left(\frac{N}{2a}\right)} B_x \quad (5-11)$$

Сумму индукций в правой части формулы (5-11) с большой точностью можно заменить произведением средней индукции B_{cp} (рис. 5-20) и числа $N/2a$:

$$\sum_{\left(\frac{N}{2a}\right)} B_x = \frac{N}{2a} B_{cp} \quad (5-12)$$

Подставляя в (5-11) $v = \frac{\pi D n}{60} \cdot \frac{2p}{2p} = 2\tau \frac{pn}{60}$ и найденное значение суммы индукций, а также учитывая, что

$$\Phi = B_{cp} l \tau, \quad (5-13)$$

получим искомую формулу для э.д.с.:

$$E_a = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} N \Phi, \quad (5-14)$$

где Φ — магнитный поток, В·с.

Отметим, что под Φ в формуле (5-14) следует понимать магнитный поток, определяемый площадью фигуры, ограниченной кривой поля, осью абсцисс и линиями, проведенными через щетки (рис. 5-20). Если щетки сместить с геометрической нейтрали, то э.д.с. в параллельной ветви уменьшится в соответствии с уменьшением потока Φ , так как последний теперь будет определяться разностью площадей A и B (рис. 5-20).

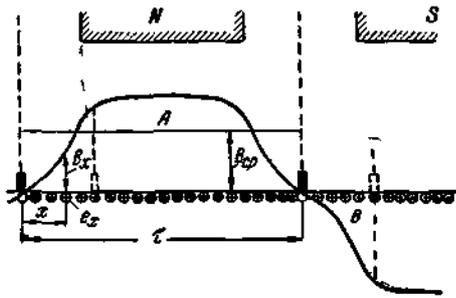


Рис. 5-20. Кривая поля и наведение э.д.с. в параллельной ветви обмотки якоря.
5-5. Магнитная цепь и ее расчет

На рис. 5-21 изображена магнитная цепь машины постоянного тока. Расчет ее заключается в определении н.с., необходимой для создания в воздушном зазоре машины магнитного потока, могущего навести в обмотке якоря заданную э.д.с.

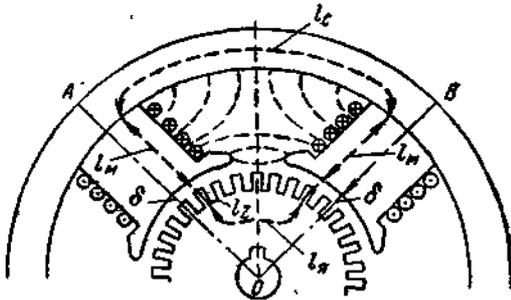


Рис. 5-21. Магнитная цепь машины постоянного тока.

Картина распределения магнитного поля в машине в пределах ее сектора AOB (рис. 5-21) для всех подобных секторов одинакова. Поэтому для определения н.с., создающей магнитный поток, достаточно ограничиться расчетом магнитного поля в пределах одного сектора, т. е. в пределах одной пары полюсов. Обозначим искомую н.с. через $F_{\text{цепи}}$. Она, как указывалось, для замкнутого контура магнитной линии (показана жирным пунктиром на рис. 5-21) определяется равенством

$$\oint Hdl = F_{\text{цепи}}, \quad (5-15)$$

где H — напряженность поля в направлении dl , правая часть равенства — полный ток внутри рассматриваемого контура, равный н.с.

Интеграл $\oint Hdl$ заменяют суммой $\sum H_x l_x$ и выбирают отдельные участки магнитной цепи таким образом, чтобы H_1, H_2, \dots вдоль этих участков можно было считать приблизительно постоянными. При этом (5-15) переходит в

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = F_{\text{цепи}}. \quad (5-16)$$

Левая часть этого равенства представляет собой сумму магнитных напряжений. Перепишем ее в следующем виде:

$$F_1 + F_2 + \dots + F_n = F_{\text{цепи}}, \quad (5-17)$$

где $F_x = H_x l_x$, т. е. F_x равно магнитному напряжению какого-либо участка магнитной цепи ($x = 1, 2, \dots, n$).

Магнитную цепь машины разбиваем на следующие участки: 1) 2δ — воздушные зазоры; 2) $2l_z$ — зубцы якоря; 3) l_a — сердечник якоря; 4) $2l_m$ — полюсы; 5) l_c — ярмо статора.

Расчет н.с. $F_{\text{цепи}}$, производим в таком порядке: по э.д.с. E_a , которая должна наводиться в обмотке якоря, находим магнитный поток Φ [см. формулу (5-14)]; по размерам машины находим сечение S_x для каждого участка магнитной цепи; затем определяем индукцию

$$B_x = \frac{\Phi}{S_x}; \quad (5-18)$$

по значению B_x , пользуясь кривыми намагничивания для соответствующего материала, находим H_x и $H_x l_x$; наконец, просуммировав магнитные напряжения всех участков, определяем н.с. цепи $F_{\text{цепи}}$.

Магнитные напряжения для полюсов (и ярма статора) находятся по потоку Φ_M (и $\Phi_M/2$), который больше потока Φ в воздушном зазоре из-за наличия поля рассеяния. Магнитные линии этого поля в промежутке между полюсами показаны на рис 5-21 тонким пунктиром.

Отношение $\Phi_M / \Phi = \sigma$ называется коэффициентом рассеяния полюсов.

Таким образом, имеем:

$$\Phi_M = \sigma \Phi; \quad (5-19)$$

для нормальных машин постоянного тока

$$\sigma = 1,12 \div 1,17.$$

Задавая различные значения э.д.с. в пределах $E_a = (0,5 \div 1,25) U_n$ и определяя соответствующие значения потока Φ и затем, как указано, $F_{\text{цепи}}$, можем построить кривую $E_a = f(F_{\text{цепи}})$.

На рис. 5-22 представлена кривая $E_0 = f(F_{\text{цепи}})$, здесь э.д.с. E_a обозначена через E_0 , чтобы показать, что мы имеем э.д.с. при холостом ходе машины. Приведенная кривая называется характеристикой холостого хода. Она имеет важное значение при исследовании электрической машины.

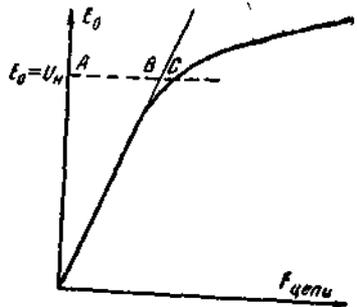


Рис. 5-22. Характеристика холостого хода.

На оси абсцисс можно было бы вместо $F_{\text{цепи}}$ взять ток в обмотке возбуждения I_B , называемый током возбуждения. Он равен $I_B = F_{\text{цепи}} / 2w_B$, где w_B — число витков обмотки возбуждения на одном полюсе.

Начальная часть характеристики идет в виде прямой линии, так как она соответствует ненасыщенному состоянию стальных участков магнитной цепи. Здесь можно считать н.с. $F_{\text{цепи}}$ равной магнитному напряжению воздушных зазоров F_{\square} , а F_{\square} пропорциональна Φ или E_0 . При увеличении э.д.с. E_0 , а следовательно, и потока Φ начинает сказываться насыщение стальных участков магнитной цепи; характеристика холостого хода при этом искривляется.

При $E_0 = U_n$ и при номинальной скорости вращения n_n большая часть $F_{\text{цепи}}$ приходится на воздушные зазоры $2\square$. Для нормальных машин постоянного тока имеем приблизительно такое соотношение:

$$F_{\square} / F_{\text{цепи}} = 0,80 \div 0,9. \quad \text{На рис. 5-22 это соотношение} \quad \frac{F_{\delta}}{F_{\text{цепи}}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}}.$$

2. Электромагнитный момент машины постоянного тока.

а) Общие сведения.

Под коммутацией в собственном смысле этого слова понимают переключение секции из одной ветви обмотки якоря в другую и происходящее при этом изменение тока в ней с одного направления на другое. Процессы, возникающие при этом в секции и под щеткой, называются коммутационными процессами. Их исследование представляет собой

важную задачу, так как от ее правильного решения в большой степени зависит надежность работы коллекторной машины.

Под коммутацией в широком смысле слова понимаются все явления и процессы, возникающие под щеткой при работе машины. Говорят, что у машины хорошая коммутация, если нет искрения под щетками, и плохая коммутация, если под щетками возникает искрение.

Искрение щеток вызывается различными причинами. Оно может быть обусловлено механическими неисправностями: "эллиптичностью" коллектора, плохой стяжкой его пластин, шероховатостью его поверхности, выступанием в отдельных местах слюды над коллекторными пластинами, дрожанием щеткодержателей, щеточных болтов, траверсы и пр.

При указанных неисправностях в отдельные моменты времени будет нарушаться контакт щетки с коллектором и происходить разрыв цепи с током, что и приводит к искрению.

Неправильно подобранные щетки, чрезмерное или слишком слабое нажатие щеток на коллектор, неправильная их расстановка по коллектору также могут послужить причинами искрения под щетками.

Современные способы изготовления коллектора и всей щеточной аппаратуры позволяют получить эти части машины вполне надежными и удовлетворительно работающими в отношении коммутации.

Коммутационные процессы отличаются большой сложностью, так как они протекают под влиянием многочисленных факторов. Их теоретическое исследование встречает большие затруднения и возможно только при ряде допущений. Поэтому здесь важное значение имеют правильно и тщательно поставленные эксперименты.

Много дали для понимания коммутационных процессов теоретические и особенно экспериментальные работы академика К. И. Шенфера, проф. В. Т. Касьянова и других советских ученых.

Затруднения обычно возникают при решении вопросов, связанных с коммутацией в быстроходных мощных машинах [если произведение мощности на скорость вращения близко к предельным значениям: $P \cdot n \approx (2,5 \div 3,5) \cdot 10^6$ кВт·об/мин]. Однако в настоящее время выводы теории и главным образом большой опыт, накопленный отечественными заводами, позволяют и для таких машин эти вопросы разрешать вполне удовлетворительно.

Рассмотрим вначале изменение тока в секции обмотки якоря при его вращении. Оно представлено кривой на рис. 5-27. Когда секция находится в одной параллельной ветви, то за время прохождения ею полюсного деления ток в ней сохраняет свое значение

$$i_a = \frac{I_a}{2a}$$

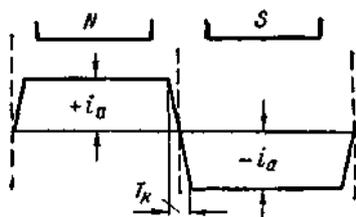


Рис. 5-27. Изменение тока в секции за время прохождения ею двух полюсных делений.

При переходе секции в другую параллельную ветвь ток в ней быстро изменяется с одного направления на другое за время T_k замыкания ее щеткой и далее имеет то же значение i_a , пока секция не будет снова замкнута щеткой. Время T_k называется периодом коммутации. Обычно оно составляет тысячные доли секунды. Вид кривой изменения тока

в секции (рис. 5-27) объясняется тем, что ток в ней, пока она не замкнута щеткой, создается постоянной э.д.с. E_a всей параллельной ветви, а не э.д.с. одной секции.

Обратимся к рис. 5-28, где изображена секция простой петлевой обмотки, замкнутая щеткой. Будем пренебрегать толщиной изоляционной прослойки между коллекторными пластинами и примем, что ширина щетки равна ширине коллекторной пластины.

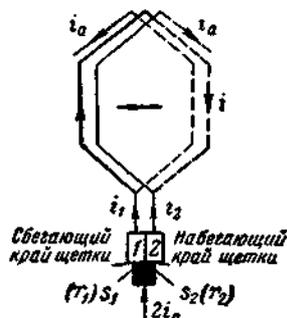


Рис. 5 28. Коммутируемая секция.

Секция, замкнутая щеткой, называется коммутируемой секцией.

В момент, когда набегающий край щетки получит соприкосновение с пластиной 2, имеем начало коммутации. Примем, что конец коммутации получается в момент, когда пластина 1 отойдет от щетки.

Будем пренебрегать сопротивлениями самой секции и соединительных проводников между секцией и коллекторными пластинами. Они незначительны по сравнению с сопротивлениями переходного контакта между щеткой и коллекторными пластинами. Обозначив сопротивления переходных контактов сбегающего и набегающего краев щетки через r_1 и r_2 , составим уравнение напряжений для указанного на рис. 5-28 контура:

$$i_1 r_1 - i_2 r_2 = \square e; \quad (5-27)$$

здесь $\square e$ — сумма э.д.с., наведенных в коммутируемой секции. В эту сумму входят э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции (рис. 5-29) и э.д.с. внешнего поля, имеющего место в коммутационной зоне, причем под последней понимается та часть поверхности якоря, где лежат стороны коммутируемых секций.

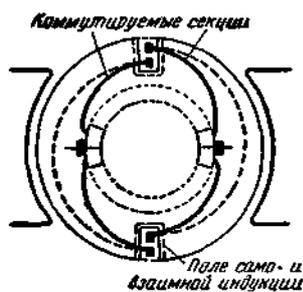


Рис. 5-29. Коммутируемые секции.

Подставив в (5-27) равенства (рис. 5-28)

$$i_1 = i_a + i; \quad (5-28)$$

$$i_2 = i_a - i; \quad (5-29)$$

получим:

$$i = i_a \frac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2} + \frac{\Sigma e}{r_1 + r_2}. \quad (5-30)$$

Примем, что r_1 и r_2 не зависят от плотности тока и что они обратно пропорциональны площадям соприкосновения соответственно сбегающего края щетки S_1 , и набегающего края щетки S_2 :

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (5-31)$$

Площадь S_2 пропорциональна времени t , протекшему от начала коммутации, а площадь S_1 — времени $T_k - t$, оставшемуся до конца коммутации. Поэтому можем написать:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{t}{T_k - t} \quad (5-32)$$

В действительности r_1 и r_2 зависят от плотности тока, так как ток проходит не только через точки непосредственного соприкосновения щетки с коллекторными пластинами, но и через тонкие воздушные прослойки между ними, в которые к тому же попадает увлажненный воздух. Следовательно, мы здесь имеем также ионные процессы, в том числе и электролитические, которые не могут быть точно рассчитаны. Кроме того, надо отметить нестабильность контакта щетки с коллекторными пластинами, в особенности ее сбегающего края, что приводит к изменению периода коммутации, отличающегося в действительности от его расчетного значения T_k . Принятое нами допущение позволяет все же проследить приближенно процессы с их качественной стороны и получить некоторые исходные данные для расчета дополнительных полюсов, которые могут быть уточнены опытной проверкой.

б) Прямолинейная коммутация.

Допустим, что сумма э.д.с., наведенных в коммутируемой секции, в любой момент времени равна нулю: $\square e = 0$. Тогда равенство (5-30) принимает вид:

$$i = i_a \frac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2} \quad (5-33)$$

Отсюда, учитывая (5-32), получим:

$$i = i_a \left(1 - \frac{2t}{T_k} \right) \quad (5-34)$$

Полученное равенство показывает, что в рассматриваемом случае ток i в коммутируемой секции будет линейной функцией времени (рис. 5-30). Такая коммутация называется прямолинейной. При прямолинейной коммутации плотность тока под щеткой в любой момент времени будет распределена равномерно.

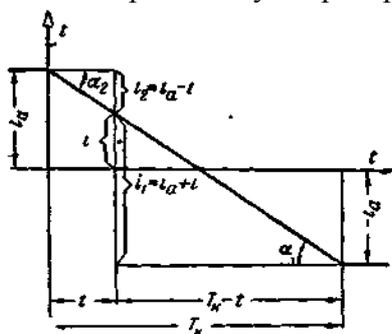


Рис. 5-30. Прямолинейная коммутация.

Плотности тока под набегающим краем щетки $\Delta_2 = \frac{i_2}{S_2}$, под сбегающим краем щетки $\Delta_1 = \frac{i_1}{S_1}$. Так как $S_2 \square t$ и $S_1 \square T_k - t$, то $\Delta_2 \equiv \frac{i_2}{t} \equiv \text{tg} \alpha_2$ и $\Delta_1 \equiv \frac{i_1}{T_k - t} \equiv \text{tg} \alpha_1$ (рис. 5-30); но $\square_1 = \square_2$, следовательно, $\square_1 = \square_2$.

в) Криволинейная коммутация.

Рассмотрим э.д.с., наведенные в коммутируемой секции. Примем, что в коммутационной зоне нет внешнего поля (например, при положении щеток на физической нейтрали). В этом случае в коммутируемой секции будут иметь место только э.д.с. самоиндукции и э.д.с. взаимной индукции. Последняя будет наводиться вследствие

изменения тока и создаваемого им поля соседней секции, замкнутой другой щеткой (рис. 5-29).

Результирующая э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции называется реактивной э.д.с., Обозначим ее через e_R . Она согласно закону Ленца будет задерживать изменение тока. Ток i вследствие этого будет проходить нулевое значение позже, чем при прямолинейной коммутации (рис. 5-31). Такая коммутация называется замедленной. При замедленной коммутации плотность тока на сбегающем крае щетки возрастает. Здесь $\Delta_1 \equiv \operatorname{tg}\alpha_1$ будет больше, чем $\Delta_2 \equiv \operatorname{tg}\alpha_2$. В этом-случае может быть искрение при разрыве цепи в момент, когда коллекторная пластина 1 отходит от щетки, так как реактивная э.д.с.

$$e_R = -L \frac{di}{dt}$$

(L_R учитывает индуктивность и взаимную индуктивность коммутируемой секции) достигает больших значений из-за большой скорости изменения тока di/dt в конце периода коммутации.

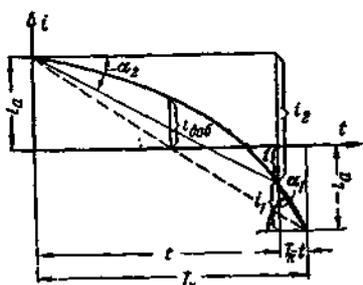


Рис. 5-31. Замедленная коммутация.

Электродвижущая сила, наведенная в коммутируемой секции внешним полем, называется коммутирующей; обозначим ее через e_k . Полярность внешнего поля устанавливается таким образом, чтобы e_k была направлена против e_R . Если при этом $e_k > e_R$, то процесс изменения тока i ускоряется (рис. 5-32). Коммутация называется ускоренной. При ускоренной коммутации перегружается ток набегающей край щетки. При его чрезмерной перегрузке может возникнуть искрение в моменты замыкания секции, когда пластина 2 подходит к щетке.

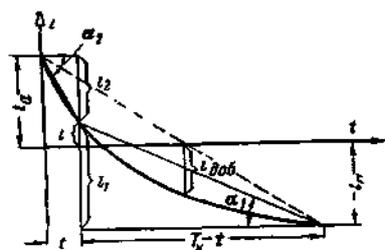


Рис. 5-32. Ускоренная коммутация.

г) Электродвижущие силы коммутируемой секции.

Вначале найдем реактивную э.д.с. При этом будем считать, что ширина секции равна полюсному делению и что ширина щетки $b_{щ}$ равна ширине коллекторной пластины b_k . Для этого случая можем написать:

$$e_R = (L + M) \frac{di}{dt} = L_R \frac{di}{dt}. \quad (5-35)$$

Здесь мы опускаем знак минус и считаем, что закон изменения тока di/dt в коммутируемых секциях один и тот же, индуктивность L_R учитывает и взаимную индуктивность. Ее мы можем найти следующим образом:

$$L_R = \frac{\Psi}{i} = \frac{w_c i w_c}{i} \Lambda_R = w_c^2 \Lambda_R,$$

где \square и w_c — потокосцепление секции и ее число витков;
 \square_R — расчетная магнитная проводимость, равная:

$$\begin{aligned} \Lambda_R &= 2l(2\mu_0\lambda_{\text{п}}) + 2l_{\text{л}}\mu_0\lambda_{\text{л}} = \\ &= 2l(2 \cdot 0,4\pi\lambda_{\text{п}} + \frac{l_{\text{л}}}{l} \cdot 0,4\pi\lambda_{\text{л}}) \cdot 10^{-8} = 2l\zeta \cdot 10^{-8}, \end{aligned}$$

где l и $l_{\text{л}}$ — длины пазовой и лобовой частей секции (рис 5-33), $\lambda_{\text{п}}$ и $\lambda_{\text{л}}$ — коэффициенты магнитной проводимости (взаимная индукция учитывается умножением на 2 коэффициента $\lambda_{\text{п}}$ для пазовой части секции); $\zeta = 2 \cdot 0,4\lambda_{\text{п}} + l_{\text{л}}/l \cdot 0,4\lambda_{\text{л}}$ — коэффициент магнитной проводимости, отнесенный к единице длины пазовой (активной) части секции, следовательно,

$$L_R = 2w_c^2 l \zeta \cdot 10^{-8}. \quad (5-36)$$

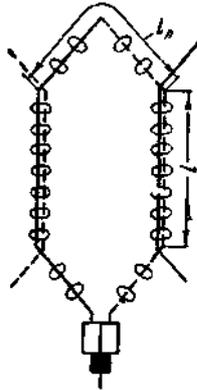


Рис. 5-33. К определению реактивной э.д.с. e_R .

Мы определяем среднее значение реактивной э.д.с. e_R . В соответствии с этим можем написать:

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{\text{ср}} = \frac{2i_a}{T_{\text{к}}},$$

где

$$T_{\text{к}} = \frac{b_{\text{ш}}}{v_{\text{к}}} = \frac{b_{\text{к}}}{v_{\text{к}}} = \frac{60 \cdot \pi D_{\text{к}}}{\pi D_{\text{к}} n K} = \frac{60}{nK},$$

следовательно,

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{\text{ср}} = \frac{\pi D_{\text{к}} n K}{60 K w_c} = \frac{A}{w_c} v_a, \quad (5-37)$$

где $v_a = \frac{\pi D_{\text{к}} n}{60}$, см/с — окружная скорость якоря.

Подставляя (5-36) и (5-37) в (5-35), получим:

$$e_R = 2w_c A l \zeta v_a \cdot 10^{-8}, \text{ В.} \quad (5-38)$$

Полученная формула имеет большое практическое значение, хотя и не является точной. Она показывает, от каких в основном факторов зависит э.д.с. e_R . Коэффициент ζ для нормальных машин лежит в сравнительно узких пределах и может быть определен опытным путем. Его значение для машин с открытыми пазами на якоре $\zeta = 3,7 \div 6$, для машин с полузакрытыми пазами на якоре $\zeta = 6 \div 9$; оно тем больше, чем больше глубина паза и чем меньше его ширина.

Коммутирующая э.д.с., наведенная в коммутационной секции внешним полем, рассчитывается по следующей формуле

$$E_{\text{к}} = 2w_c B_{\text{к}} l v_a \cdot 10^{-8}, \text{ В,} \quad (5-39)$$

где $B_{\text{к}}$, Гс — индукция внешнего поля в коммутационной зоне.

д) Способы улучшения коммутации.

Дополнительные полюсы. Обратимся к равенству (5-30). Мы можем переписать его в следующем виде:

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{доб}}, \quad (5-40)$$

$$i_{\text{пр}} = i_a \frac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2} \quad \text{и} \quad i_{\text{доб}} = \frac{\Sigma e}{r_1 + r_2}$$

Таким образом, ток коммутации i можно считать состоящим из тока прямолинейной коммутации $i_{\text{пр}}$ и накладывающегося на него добавочного тока $i_{\text{доб}}$.

Способы улучшения коммутации основаны на уменьшении добавочного тока $i_{\text{доб}}$. Его мы можем уменьшить, увеличивая $r_1 + r_2$, что достигается выбором щеток.

Чем больше ожидаемая результирующая э.д.с. $\square e$, тем тверже должны быть щетки, так как они создают в переходном контакте относительно большое сопротивление. Для небольших машин низкого напряжения берут мягкие (графитные) щетки. От правильного выбора щеток и от их качества в большой степени зависит коммутация. Лучшими считаются электро-графитированные щетки, полученные путем отжига угля в электропечах.

Уменьшение $i_{\text{доб}}$ может быть также достигнуто путем уменьшения $\square e$.

Стремятся эту сумму э.д.с. сделать равной нулю:

$$\square e = e_R + e_k = 0. \quad (5-41)$$

Чтобы этого достигнуть, нужно создать в коммутационной зоне такое поле, которое бы наводило в коммутируемой секции э.д.с. e_k , равную э.д.с. e_R и направленную против нее. Поле в коммутационной зоне называется коммутирующим. Оно должно иметь определенную полярность. В малых машинах мощностью обычно не свыше 0,5 кВт надлежащее коммутирующее поле получают сдвигом щеток за физическую нейтраль по вращению в генераторе и против вращения в двигателе. Однако равенство $e_k = -e_R$ при этом достигается только при некоторой определенной нагрузке, так как при изменении нагрузки физическая нейтраль смещается и указанное равенство нарушается. Чтобы различие между e_k и e_R было невелико, берут значение e_R не свыше 1—2 В, что не вызывает затруднений в случае малых машин. Для машин средней и особенно большой мощности такое значение e_R потребовало бы значительного увеличения размеров машин и было бы невыгодно.

В современных машинах для создания коммутирующего поля применяются дополнительные полюсы. Их обмотка, как указывалось, соединяется последовательно с обмоткой якоря (рис. 5-34). При этом коммутирующее поле увеличивается пропорционально току якоря, если магнитная цепь дополнительных полюсов слабо насыщена. Поэтому e_k будет пропорциональна току якоря, так же как и e_R . Следовательно, здесь мы получаем автоматичность действия дополнительных полюсов.

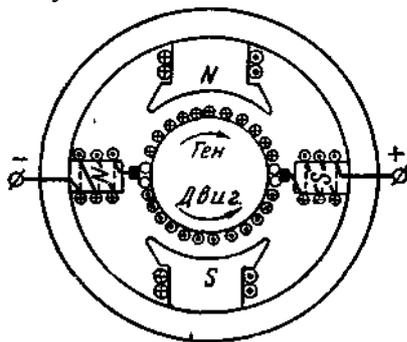


Рис. 5-34. Соединение обмотки дополнительных полюсов с обмоткой якоря.

Число витков обмотки дополнительных полюсов должно быть так выбрано, чтобы ее н.с. не только компенсировала поперечную н.с. якоря, но и имела некоторый избыток, необходимый для создания в коммутационной зоне надлежащего поля.

На рис. 5-35 представлена кривая поля машины, имеющей дополнительные полюсы. Здесь же указаны необходимые полярности дополнительных полюсов при работе машины генератором и двигателем (см. также рис. 5-34).

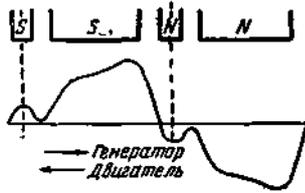


Рис. 5-35. Кривая поля машины с дополнительными полюсами.

Необходимая полярность коммутирующего поля определяется на основании следующих рассуждений.

Обозначим условно направление тока в секции i_a до коммутации стрелкой, как указано на рис. 5-36. Направление э.д.с. E_a параллельной ветви, в которой находится секция при работе машины генератором, будет такое же, как и тока i_a . Пусть рассматриваемая секция замыкается щеткой. Ток i_a будет уменьшаться. При этом возникает э.д.с. e_R , которая по закону Ленца стремится поддержать прежнее значение тока. Следовательно, она направлена в ту же сторону, что и i_a . Электродвижущая сила e_K должна быть направлена против e_R . Для этого коммутируемая секция должна находиться в поле противоположной полярности по отношению к полю, которое наводит э.д.с. E_a (см. рис. 5-34, где направление э.д.с. E_a , например, нижней параллельной ветви обмотки якоря определялось полем южной полярности).

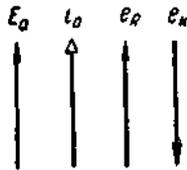


Рис. 5-36. К определению полярности дополнительных полюсов генератора.

Так как в двигателе E_a и i_a имеют противоположные направления, то коммутирующее поле должно иметь ту же полярность, что и поле, наводящее э.д.с. E_a (рис. 5-37).

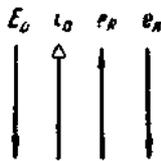


Рис. 5-37. К определению полярности дополнительных полюсов двигателя.

Мы вначале приняли ширину щетки равной ширине коллекторной пластины. В действительности щетка берется шире коллекторной пластины в 2—4 раза (при простых волновых обмотках в 2—2,7 раза; при простых петлевых обмотках в 3—4 раза), что дает лучшее использование коллектора и улучшает коммутацию.

Ширина щетки не должна быть слишком большой, так как это может привести к чрезмерному расширению коммутационной зоны. По той же причине не следует брать шаг y_1 с большим укорочением [обычно $y_1 = Z_p/2 p - (1 \div 3)$]. Небольшое укорочение y_1 сказывается благоприятно на коммутации, так как при этом несколько уменьшается e_R за счет уменьшения э.д.с. взаимоиנדукции. К тому же самому ведет выбор K/a , равного нечетному числу, и выбор ступенчатой обмотки (для мощных машин).

Для небольших машин (до 40—50 кВт) часто пазы на якоре выполняются скошенными примерно на одно пазовое деление. При этом уменьшается шум машины, так как не будут получаться резкие колебания индукции на концах полюсных наконечников, и уменьшаются колебания поля под дополнительными полюсами, что улучшает коммутацию.

Как отмечалось, н.с. дополнительных полюсов должна скомпенсировать в коммутационной зоне поперечную н.с. якоря и, кроме того, создать коммутирующее поле; следовательно, она должна быть равна (на пару полюсов):

$$F_d = \square A + F_k. \quad (5-42)$$

Здесь н.с, создающая коммутирующее поле,

$$F_k \square 1,2 \cdot 1,6 B_k \square_{д}, \quad (5-43)$$

где коэффициент 1,2 учитывает магнитные напряжения стальных участков магнитной цепи дополнительных полюсов и зубчатость якоря; $\square_{д}$, см — воздушный зазор под дополнительным полюсом; B_k — индукция коммутирующего поля, которая определяется из равенства $e_k = e_R$, после подстановки в это равенство (5-39) и (5-38), Гс:

$$B_k = \square A. \quad (5-44)$$

е) *Круговой огонь на коллекторе. Компенсационная обмотка.*

При работе машины постоянного тока может образоваться круговой огонь на коллекторе, под которым понимается электрическая дуга, охватывающая часть или весь коллектор по его цилиндрической поверхности. Явление кругового огня на коллекторе подробно исследовалось в Советском Союзе К. И Шенфером, О. Б. Броном, В. С. Александровым, А. И. Москвитиним и др. Исследования позволили выявить причины этого сложного явления. Оно может возникнуть при перегрузках машины. В этом случае сильно искажается поле под главными полюсами из-за поперечной реакции якоря (дополнительные полюсы компенсируют реакцию якоря только в коммутационной зоне). В результате возрастают максимальная индукция в воздушном зазоре и пропорциональное этой индукции максимальное напряжение $U_{к.м}$ между соседними коллекторными пластинами (рис. 5-38).

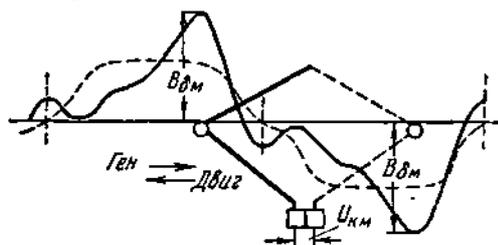


Рис. 5-38. Максимальная индукция $B_{\square м}$ в воздушном зазоре машины при ее перегрузке, определяющая максимальное напряжение $U_{к.м}$ между соседними коллекторными пластинами (пунктирная кривая — кривая поля машины при холостом ходе).

Если при этом поверхность коллектора загрязнена и он окружен воздухом, ионизированным вследствие искрения под щетками, то создаются условия для образования небольших электрических дуг между пластинами, которые в дальнейшем могут перейти в устойчивую мощную дугу. Такая дуга опасна для машины и может привести к серьезным повреждениям. В машинах небольшой и средней мощности нормального исполнения образование кругового огня на коллекторе наблюдается крайне редко. Это явление не следует смешивать с явлением кругового искрения, которое обычно не причиняет большого вреда машине, однако требует более частой чистки коллектора и приводит к более быстрому износу щеток и коллектора.

Для предотвращения кругового огня на коллекторе нужно иметь достаточное число коллекторных пластин на полюсное деление, чтобы напряжение между соседними коллекторными пластинами не было слишком большим. В мощных машинах, работающих с большими перегрузками (например, двигатели для крупных прокатных станов), кроме того, нужно применить компенсационную обмотку, чтобы не было искажения поля под главными полюсами. Проводники компенсационной обмотки, которая соединяется последовательно с обмоткой якоря, закладываются в пазы полюсных наконечников (рис. 5-39). Она при этом компенсирует поперечную реакцию якоря под главными полюсами при всех нагрузках машины.

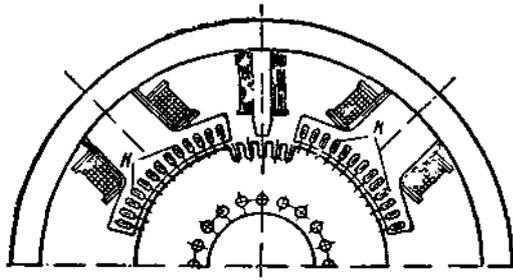


Рис. 5-39. Машина с компенсационной обмоткой в пазах полюсных наконечников.

Компенсационная обмотка обычно применяется для мощных и быстроходных машин при мощности на один полюс свыше 80—100 кВт, при $U > 400$ В, если машина подвергается перегрузкам свыше 120% и если $e_R > 6$ В. Применение ее для нормальных машин становится экономически целесообразным при мощностях свыше 900 кВт, даже если указанные условия отсутствуют.

3. Реакция якоря и её влияние на работу машины постоянного тока.

При холостом ходе машины магнитное поле в ней создается только обмоткой возбуждения, так как только по этой обмотке будет проходить ток. При нагрузке ток проходит и по обмотке якоря, н.с. которой изменяет поле машины, на что впервые была указано Э. Х. Ленцем.

Воздействие н.с. якоря на поле машины называется реакцией якоря. При помощи рис. 5-23 мы можем выяснить, как изменяется поле машины в результате этого воздействия. На рис. 5-23,а изображено поле машины при ее холостом ходе, когда оно создается только н.с. обмотки возбуждения. На рис. 5-23,б показано поле якоря. Такое поле получается в машине при наличии тока только в обмотке якоря. При этом сам якорь превращается в электромагнит. Его н.с. имеет ось, всегда совпадающую с линией щеток.

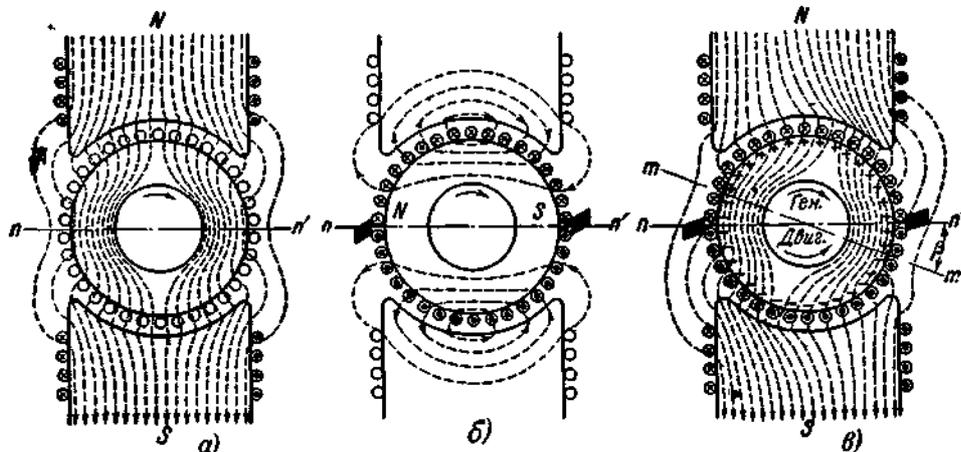


Рис. 5-23. Реакция якоря при положении щеток на геометрической нейтрали. а — поле при холостом ходе; б — поле якоря, в — поле при нагрузке (nn' — геометрическая нейтраль, mm' — физическая нейтраль)

Мы расположили щетки на геометрической нейтрали, т. е. на линии, перпендикулярной оси полюсов. В этом случае токи в проводниках якоря верхней и нижней его частей имеют противоположные направления. Намагничивающая сила якоря, действующая по линии щеток, будет наибольшей, так как соответствующая магнитная линия охватывает наибольший полный ток. Далее н.с. убывает и под серединой полюса становится равной нулю. Можно приближенно считать, что она убывает по закону прямой линии, как это показано на рис. 5-24, где кривая 2 представляет собой кривую н.с. якоря, ординаты которой равны соответствующей н.с. якоря на половину обхода (на один полюс).

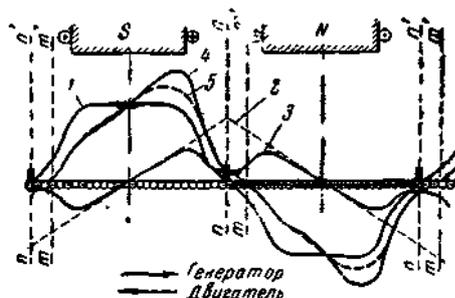


Рис. 5-24. Реакция якоря при положении щеток на геометрической нейтрали. 1 — кривая поля при холостом ходе, 2 — кривая н.с. якоря, 3 — кривая поля якоря, 4 — кривая результирующего поля без учета изменения насыщения, 5 — кривая действительного поля машины при нагрузке (nn' — геометрическая нейтраль, mm' — физическая нейтраль).

На рис. 5-23,е показано поле машины при ее нагрузке. Мы видим, что в результате реакции якоря поле машины, работающей генератором, изменилось: произошло усиление поля под сбегающей половиной полюса и ослабление его под набегающей половиной полюса. Другим следствием реакции якоря является смещение физической нейтрали, т. е. линии, проходящей через точки окружности якоря, где индукция равна нулю.

При холостом ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической. При нагрузке она смещается относительно геометрической нейтрали: при работе генератором — в сторону вращения, при работе двигателем — против вращения (при принятых на рис. 5-23,в направлениях поля и токов в обмотке якоря машина при работе двигателем будет вращаться в обратную сторону).

На рис. 5-24 показаны кривые поля машины при холостом ходе и при нагрузке: здесь также приведена кривая поля якоря. Если кривую поля машины при ее нагрузке будем определять, исходя из принципа наложения, т. е. складывая ординаты кривой поля при холостом ходе 1 и кривой поля якоря 3, то получим кривую результирующего поля 4. Однако принцип наложения здесь не может дать точных результатов, так как поле в ферромагнитных телах не является линейной функцией тока. Кривая действительного поля машины при нагрузке 5 отличается от кривой результирующего поля 4. Кривая 5 показывает, что ослабление поля под набегающей половиной полюса будет больше, чем усиление поля под сбегающей половиной полюса (вследствие насыщения главным образом зубцов якоря). В результате получается ослабление общего поля и, следовательно, уменьшение полезного потока Φ , определяющего значение э.д.с. якоря.

Уменьшение э.д.с. якоря при положении щеток на геометрической нейтрали также вызвано смещением физической нейтрали, так как при этом и параллельные ветви будут входить проводники с обратными э.д.с. (см. рис. 5-23,в, где крестами и черточками внутри якоря показаны направления э.д.с., наведенных в проводниках).

В машинах мощностью от 0,3 кВт и выше обычно применяются дополнительные полюсы, о назначении которых сказано в следующем § 5-6. Они помещаются между главными полюсами (рис. 5-1), оси их совпадают с геометрическими нейтральными машинами. Их обмотка соединяется последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы ее н.с. действовала против н.с. обмотки якоря. Действие н.с. дополнительных полюсов ограничивается сравнительно неширокой зоной поверхности якоря, где находятся проводники замыкаемых щетками секций. Щетки при наличии дополнительных полюсов должны стоять на геометрической нейтрали.

В небольших машинах, не имеющих дополнительных полюсов, щетки нужно сдвинуть вслед за физической нейтралью: в генераторе — по вращению, в двигателе — против вращения.

В этом случае для определения влияния реакции якоря его н.с. F_a , действующую по линии щеток, заменяют двумя н.с. F_q и F_d , действующими по продольной и поперечной

осям машины и в сумме равным F_a (рис. 5-25,а и б; на рис. 5-25,а стрелки показывают направления н.с.).

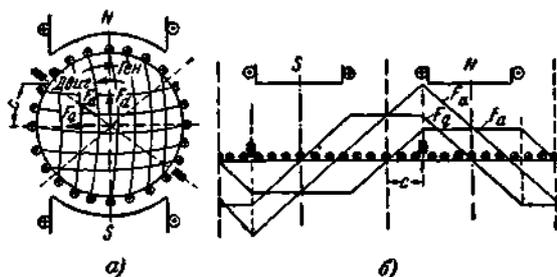


Рис. 5-25. Разложение н.с. якоря F_a на поперечную F_q и продольную F_d н.с.

Поперечная н.с. F_q реакции якоря практически действует так же, как н.с. якоря F_a при положении щеток на геометрической нейтрали, т. е. искажает поле под главными полюсами и несколько уменьшает полезный поток Φ (рис. 5-24).

Продольная н.с. F_d реакции якоря действует против н.с. обмотки возбуждения и, следовательно, уменьшает полезный поток Φ . При сдвиге щеток в обратную сторону от геометрической нейтрали мы получили бы продольную н.с. F_d , действующую согласно с н.с. обмотки возбуждения и, следовательно, увеличивающую полезный поток Φ . Однако такой сдвиг для нормальных машин недопустим, как будет показано в § 5-7, из-за возникающего при этом искрения под щетками.

Поперечная н.с. якоря, как мы видели искажает поле под главными полюсами и вместе с этим уменьшает полезный поток Φ , которым определяется э.д.с. якоря E_a при данной скорости вращения. Мы можем пренебречь действием н.с. якоря вне полюсной дуги и считать, что поле под полюсами искажается вследствие действия н.с. якоря, равной на полюс $b_{\square}A$; здесь b_{\square} — длина полюсной дуги (обычно $b_{\square} \approx 0,68 \square$ [см]), A /см;

$$A = \frac{I_a N}{2\pi D}, \quad (5-20)$$

есть линейная нагрузка, условно показывающая нагрузку в амперах, приходящуюся на 1 см длины окружности якоря ($I_a/2a$ — ток в проводнике обмотки).

Рассматриваемая н.с. $b_{\square}A$ действует по обходу, включающему воздушные зазоры, зубцы якоря, пути по ярму якоря и поперек полюса. Последними двумя магнитными сопротивлениями можно пренебречь и считать, что поперечная н.с. якоря изменяет лишь магнитные напряжения воздушных зазоров и зубцов. Поэтому используется "переходная" характеристика (рис. 5-26), представляющая собой зависимость

$$B_{\square} = f[0,5(F_{\square} + F_z)], \quad (5-21)$$

где $B_{\square} = \Phi/b_{\square}l_{\square}$ — индукция в воздушном зазоре (расчетная длина по оси $l_{\delta} \approx \frac{l_m + l}{2}$, где l_m — длина полюса; l — длина якоря за вычетом радиальных вентиляционных каналов).

Под каждой половиной полюса действует н.с. якоря $0,5b_{\square}A$. Отложим $0,5b_{\square}A$ вправо и влево от н.с., соответствующей индукции $B_{\square E}$. Последняя определяется по э.д.с. якоря

$$E_a = U \pm (I_a \sum r_x + 2\Delta U_{\text{щ}}). \quad (5-22)$$

Здесь обозначают: U — напряжение на зажимах машины, I_a — ток якоря; $\sum r_x$ — сумму сопротивлений внутренней цепи якоря; $2\Delta U_{\text{щ}}$ — падение напряжения в переходных контактах щеток, которое практически можно принять постоянным при изменении тока якоря в пределах $0,2-1,5 I_n$ и приближенно равным 2 В при угольных и графитных щетках. В формуле (5-22) нужно взять знак плюс для генератора, знак минус для двигателя.

Из рис 5-26 видим, что поток, который при холостом ходе можно принять пропорциональным площади прямоугольника $ACHF$, при нагрузке уменьшается, так как

теперь он будет определяться площадью криволинейного четырехугольника $ABGF$. Уменьшение потока под одной половиной полюса будет больше, чем увеличение потока под другой половиной полюса. При этом мы принимаем, что при холостом ходе машины индукция в воздушном зазоре по длине дуги якоря b_{\square} (практически равной длине дуги полюсного наконечника) распределена равномерно, а при нагрузке она распределена соответственно кривой BEG .

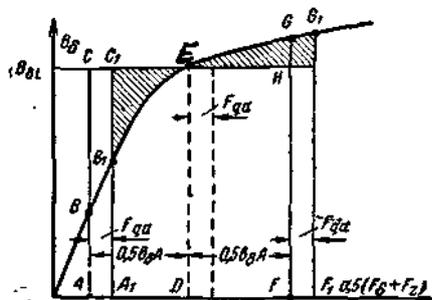


Рис. 5-26. Переходная характеристика (к определению размагничивающей н.с. F_{qd} обусловленной поперечной реакцией якоря).

Для того чтобы поток при нагрузке остался неизменным, необходимо н.с. обмотки возбуждения увеличить на некоторую величину F_{qd} , которая находится следующим образом.

Передвинем отрезок $\overline{AF} = b_s A$ вправо настолько, чтобы заштрихованные площади были равны между собой. При этом мы получаем площадь криволинейного четырехугольника $A_1B_1G_1F_1$ равной площади прямоугольника $ACHF$. Найденная указанным способом F_{qd} и представляет собою ту н.с., которую должна добавочно создать обмотка возбуждения, чтобы скомпенсировать размагничивающее действие поперечной н.с. якоря.

Значение н.с. F_{qd} будет, очевидно, зависеть от насыщения машины, т. е. от положения точки E на переходной характеристике, и от тока якоря I_a . Обе эти зависимости имеют сложный характер и не могут быть точно выражены аналитически. Если принять, что машина (как это обычно бывает) работает при насыщении, соответствующем точке E на переходной характеристике, то можно допустить, что при небольшом отклонении от этой точки, вызванном изменением E_a из-за изменения внутреннего падения напряжения, н.с. F_{qd} зависит только от I_a . Как показывают опыт и расчеты, для машин, у которых поперечная реакция якоря резко проявляется, зависимость F_{qd} от I_a может быть приближенно представлена следующим уравнением:

$$F_{qd} = kI_a^\alpha, \quad (5-23)$$

где k — постоянный коэффициент; $\alpha \approx 1,5 \div 2$ для тока якоря $I_a = (0,6 \div 1,5) I_n$.

Величина F_{qd} будет относительно тем больше, чем меньше воздушный зазор машины. Действительно, при уменьшении воздушного зазора будет уменьшаться F_{\square} и, следовательно, будет уменьшаться масштаб m_a (А/мм) для н.с. на оси абсцисс рис 5-26. Тогда отрезки \overline{AD} и \overline{DF} , равные $0,5b_{\square}A/m_a$ [мм], будут увеличиваться, что приведет к возрастанию F_{qd} .

Для небольших машин (до $30 \div 40$ кВт) иногда при $I_a = I_n$ отрезок \overline{AD} получается несколько больше отрезка \overline{OD} . В этом случае под одним краем полюсного наконечника будет иметь место "опрокидывание" поля, т. е. изменение его направления. Для машин средней и большой мощности (примерно свыше 50 кВт) воздушный зазор обычно выбирается таким образом, чтобы при номинальной нагрузке не было опрокидывания поля под одним из краев полюсного наконечника ($\overline{AD} < \overline{OD}$).

При отсутствии дополнительных полюсов, когда для улучшения коммутации (§ 5-7, д) приходится щетки смешать с геометрической нейтральной, необходимо учесть размагничивающую продольную н.с. якоря F_d , которая равна (на один полюс)

$$F_d = cA, \quad (5-24)$$

где c (см) — сдвиг щеток относительно геометрической нейтральной (рис 5-25, а). Для малых машин ($< 0,5$ кВт) можно принять:

$$c \approx 0,4 (\text{см} - b_{\text{щ}}).$$

Таким образом, размагничивающая реакция якоря (на пару полюсов)

$$F_{\text{р.я.}} = 2 (F_{qd} + F_d) \quad (5-25)$$

и н.с. обмотки возбуждения при нагрузке

$$F_{\text{в}} = F_E + F_{\text{р.я.}} \quad (5-26)$$

где F_E — н.с., соответствующая э.д.с. E_a при нагрузке (определяется по характеристике холостого хода)

1.3 Лекция №3 (2 часа).

Тема: «Генераторы постоянного тока»

1.3.1 Вопросы лекции:

1. Генераторы постоянного тока.
2. Генератор с независимым возбуждением.
3. Генераторы с параллельным и смешанным возбуждением.

1.3.2 Краткое содержание вопросов

1. Генераторы постоянного тока.

а) Классификация генераторов по способу возбуждения.

В зависимости от способа возбуждения основного магнитного поля машины различают генераторы с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

Генератор, обмотка возбуждения которого получает питание от постороннего источника тока (например, от аккумуляторной батареи или от другого генератора постоянного тока), называется генератором с независимым возбуждением (рис. 5-41, а).

Генератор с параллельным возбуждением имеет обмотку возбуждения, подключенную параллельно к якорю (рис. 5-41, б). В генераторе последовательного возбуждения обмотка возбуждения соединена последовательно с якорем (рис. 5-41, в).

В генераторе со смешанным возбуждением на главных полюсах помещаются две обмотки: одна из них соединяется параллельно, другая — последовательно с якорем (рис. 5-41, г).

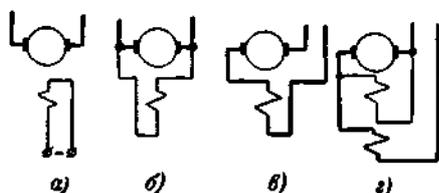


Рис. 5-41. Генераторы постоянного тока.

По параллельной обмотке возбуждения проходит небольшой ток, составляющий 1—5% номинального тока якоря. Она выполняется обычно с большим числом витков из проводника относительно небольшого сечения. По последовательной обмотке возбуждения проходит полный ток якоря, поэтому она выполняется с небольшим числом витков из проводника относительно большого сечения.

Генераторы малой мощности выполняются иногда с постоянными магнитами; их можно назвать магнито-электрическими. По свойствам они приближаются к генераторам с независимым возбуждением.

На щитке машины указываются номинальные величины: мощность (электрическая мощность на зажимах для генератора или мощность на валу для двигателя в ваттах или киловаттах), напряжение, ток, скорость вращения.

2. Генератор с независимым возбуждением.

б) Генератор с независимым возбуждением.

Схема генератора с независимым возбуждением приведена на рис. 5-42. Здесь R_p — регулировочный реостат в цепи возбуждения; R_n —нагрузочный реостат.

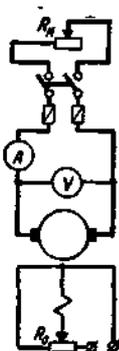


Рис. 5-42. Генератор с независимым возбуждением.

При холостом ходе генератора, когда отключена внешняя цепь, напряжение на его зажимах, измеряемое вольтметром, можно считать равным э.д.с. якоря. Таким образом, опытным путем легко может быть найдена характеристика холостого хода; $E_0 = f(I_B)$ при $n = \text{const}$. Она представлена на рис. 5-43. При ее снятии ток возбуждения I_B изменяют от 0 до некоторого максимума, соответствующего $E_0 \approx 1,25 U_n$, и затем его уменьшают до нуля. При этом получают восходящая и нисходящая ветви характеристики холостого хода. Расхождение этих ветвей объясняется наличием гистерезиса в полюсах и ярме статора. При $i_B=0$ э.д.с. в обмотке якоря индуцируется потоком остаточного магнетизма. Она обычно составляет 2-4% от U_n .

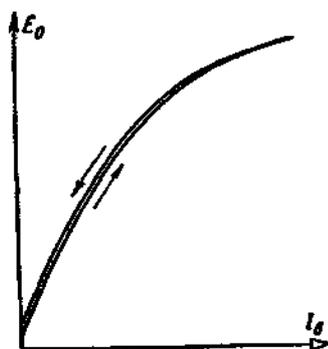


Рис. 5-43. Характеристика холостого хода.

Регулировочный реостат R_p имеет холостой контакт, соединенный с противоположным зажимом обмотки возбуждения. Такое соединение делается для того, чтобы при переводе ручки реостата на холостой контакт обмотка возбуждения была замкнута, так как при ее размыкании образовывались бы (из-за ее большой индуктивности) электрические дуги, приводящие к подгоранию контактов.

Для определения н.с. реакции якоря снимают также нагрузочные характеристики: $U = f(I_B)$ при $I_a = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Одна из них при $I_a = I_n$ представлена на рис. 5-44.

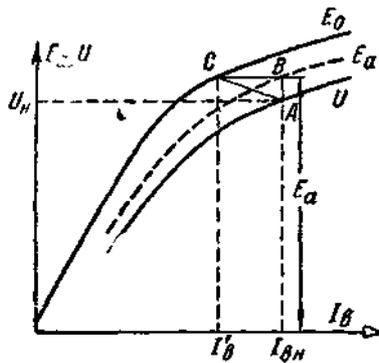


Рис. 5-44. Характеристики — нагрузочная (U), внутренняя нагрузочная (E_a) и холостого хода (E_0) (к определению реакции якоря).

Если к ординатам нагрузочной характеристики прибавить внутреннее падение напряжения в цепи якоря $I_a \square r_x + 2 \square U_{ш}$ [см. § 5-6, уравнение (5-22) и далее], то получим внутреннюю нагрузочную характеристику $E_a = f(I_a)$. Она показана на рис. 5-44 пунктиром. Здесь же приведена характеристика холостого хода.

Мы видим, что для создания э.д.с. E_a при холостом ходе потребовался бы ток возбуждения $I'_в$, тогда как для создания той же э.д.с. E_a при нагрузке требуется ток возбуждения $I_{в.н}$; следовательно, $I_{в(р.я)} = I_{в.н} - I'_в = \overline{BC}$ идет на компенсацию реакции якоря. Для определения н.с. реакции якоря $F_{р.я}$ надо ток $I_{в(р.я)}$ умножить на число витков $2w_b$ пары полюсов: $F_{р.я} = 2w_b I_{в(р.я)}$. Для уточнения результатов следует, брать нисходящую ветвь характеристики холостого хода и снимать нагрузочную характеристику, начиная с наибольшего значения U и уменьшая I_a . Тогда будет исключено влияние гистерезиса.

Треугольник ABC , у которого один катет \overline{AB} равен внутреннему падению напряжения в цепи якоря, а другой катет \overline{BC} равен току $I_{в(р.я)}$ (соответствующему реакции якоря), называется реактивным (или характеристическим) треугольником.

Если снять несколько нагрузочных характеристик для различных значений тока якоря I_a , то можно найти зависимость $I_{в(р.я)}$ (или $F_{р.я}$) не только от насыщения, но и от тока I_a .

Большое практическое значение имеет внешняя характеристика: $U = f(I)$ при $n = \text{const}$ и $I_b = \text{const}$ (рис. 5-45). Она снимается при включенном рубильнике (рис. 5-42); ток нагрузки I изменяют при помощи реостата R_n .

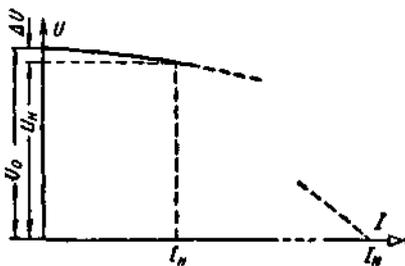


Рис. 5-45. Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением.

Внешняя характеристика показывает, что напряжение на зажимах генератора при увеличении тока нагрузки понижается. Понижение напряжения вызвано уменьшением потока Φ , а следовательно, и э.д.с. E_a из-за реакции якоря, а также внутренним падением напряжения.

При дальнейшем уменьшении внешнего сопротивления R_n ток будет увеличиваться и при $R_n = 0$ достигнет наибольшего значения I_k . Ток I_k — ток короткого замыкания. Он опасен для машины, так как в несколько раз превышает ее номинальный ток. Для предохранения машины от короткого замыкания во внешней цепи ставят предохранители, отключающие цепь при токе, превышающем допустимый для машины.

Изменение напряжения генератора характеризуется повышением напряжения при переходе от режима номинальной нагрузки к режиму холостого хода, отнесенным к номинальному напряжению (рис. 5-45):

$$\Delta U\% = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\% \quad (5-50)$$

Для генераторов с независимым возбуждением, работающих при $I_B = \text{const}$, $\Delta U\% = 5 \div 10\%$.

Напряжение на зажимах генератора можно поддерживать постоянным при изменении нагрузки путем регулирования тока возбуждения. Как при этом нужно регулировать ток возбуждения, показывает регулировочная характеристика: $I_B = f(I)$ при $n = \text{const}$ и $U = \text{const}$ (рис. 5-46).



Рис. 5-46. Регулировочная характеристика.

Генераторы с независимым возбуждением применяются в тех случаях, где необходимо регулирование напряжения в широких пределах: например, для питания электролитических ванн, в схеме генератор-двигатель (§ 5-10, в). Они на практике встречаются сравнительно редко. Гораздо чаще применяются генераторы, работающие с самовозбуждением.

3. Генераторы с параллельным и смешанным возбуждением.

в) Генератор с параллельным возбуждением.

Схема генератора с параллельным возбуждением представлена на рис. 5-47. Здесь обмотка возбуждения питается от самого генератора. Такая работа возможна благодаря самовозбуждению машины. Принцип самовозбуждения заключается в следующем.

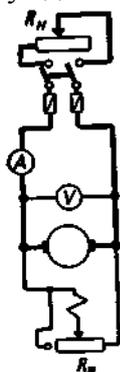


Рис. 5-47. Генератор с параллельным возбуждением.

В полюсах и ярме машины обычно всегда имеет место остаточный магнетизм, наличие которого обуславливает самовозбуждение.

Действительно, поток остаточного магнетизма при вращении якоря наводит в его обмотке небольшую э.д.с., которая создает небольшой ток в обмотке возбуждения. Этот ток при правильном соединении обмотки возбуждения с обмоткой якоря увеличивает поток полюсов, который в свою очередь наводит в якоре большую э.д.с. Она создает в обмотке возбуждения соответственно больший ток — снова увеличивается поток и э.д.с. в якоре и т. д. до тех пор, пока не установится соответствие между током возбуждения, магнитным потоком и э.д.с.

Для уяснения процесса самовозбуждения обратимся к рис. 5-48. Здесь изображены характеристика холостого хода $E_0 = f(I_B)$ и "прямая постоянного сопротивления цепи

возбуждения"

$E_0 = r_b I_b$, где E_0 принята равной напряжению, приложенному к цепи возбуждения; r_b — сопротивление этой цепи.

Можно считать, что падение напряжения в цепи якоря, вызванное током I_b , ничтожно, поэтому напряжение на зажимах якоря, а следовательно, и на зажимах цепи возбуждения можно принять равным э.д.с. E_b . При постоянном сопротивлении r_b цепи возбуждения напряжение на ее зажимах пропорционально току I_b , т. е. изменяется при изменении I_b по закону прямой линии, которую мы назвали прямой постоянного сопротивления цепи возбуждения (встречается также название "вольт-амперная" характеристика цепи возбуждения).

Оба уравнения $E_0=f(I_0)$ и $E_0=r_b I_b$ одновременно будут удовлетворяться только в точке A . В этой точке мы получаем установившуюся в процессе самовозбуждения э.д.с. $E_0 = \overline{BA}$ при данном сопротивлении r_b . При отклонении э.д.с. от этого значения вследствие какой-нибудь причины после устранения этой причины э.д.с. снова вернется, очевидно, в исходное положение, т. е. будет равна \overline{BA} .

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\overline{BA}}{\overline{OB}} \equiv r_b$$

На рис. 5-48 При увеличении r_b угол α будет увеличиваться и при совпадении прямой постоянного сопротивления цепи возбуждения с прямолинейной частью характеристики холостого хода будет равен критическому значению $\alpha_{\text{кр}}$. Соответствующее ему значение $r_{b,\text{кр}}$ ($\operatorname{tg} \alpha_{\text{кр}} = r_{b,\text{кр}}$) называется критическим сопротивлением цепи возбуждения. Оно определяет "порог самовозбуждения" — при увеличении r_b сверх $r_{b,\text{кр}}$ самовозбуждение невозможно.

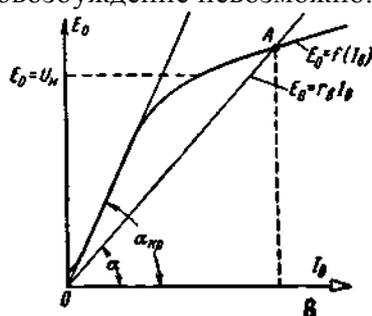


Рис. 5 48. Самовозбуждение генератора с параллельным возбуждением.

При $r_b = r_{b,\text{кр}}$ напряжение на зажимах якоря практически будет неустойчивым. Поток остаточного магнетизма дает очень небольшое напряжение ($0,02—0,04 U_n$), которое может быть практически устойчивым только при холостом ходе. Этим и объясняется то, что у генератора нормального исполнения получить устойчивое напряжение при холостом ходе, которое было бы меньше $60—70\%$ номинального, не представляется возможным.

Если все же требуется от генератора параллельного возбуждения, чтобы он давал устойчивое напряжение, начиная, например, с 20% номинального, то приходится переходить к специальному выполнению его главных полюсов. Полюсы при этом собирают из листов, показанных на рис. 5-49,а, или их выполняют, как показано на рис. 5-49,б. В обоих случаях в полюсах получают участки (a и b или участки сплошных листов), которые насыщаются при малом значении потока, вследствие чего характеристика холостого хода искривляется в своей начальной части (рис. 5-50). Генераторы с такой характеристикой применяются в качестве возбудителей, например, для турбогенераторов, для которых требуется изменять их ток возбуждения в широких пределах.

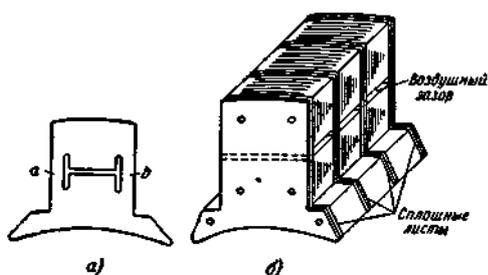


Рис. 5-49. Полюсы для получения искривленной в начальной части характеристики холостого хода.

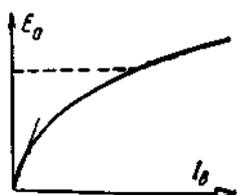


Рис. 5-50. Характеристика холостого хода, искривленная в начальной части.

Обмотка возбуждения должна быть присоединена к зажимам якоря таким образом, чтобы ток, проходящий по этой обмотке, увеличивал поток остаточного магнетизма, в противном случае машина не может самовозбудиться.

Убедиться в наличии остаточного магнетизма можно путем измерения напряжения при холостой работе машины с отключенной обмоткой возбуждения. Если при включении обмотки возбуждения напряжение уменьшается, то это указывает на неправильное присоединение обмотки возбуждения. Следует или поменять местами ее концы, или изменить направление вращения машины. Обычно применяют первый способ. Генераторы с параллельным возбуждением часто встречаются на практике.

Так как ток, ответвляющийся в обмотку возбуждения, составляет небольшую долю номинального тока, то характеристика холостого хода генератора с параллельным возбуждением, снятая для напряжения на зажимах, а не для э.д.с., практически не отличается от той же характеристики генератора с независимым возбуждением; то же можно сказать и о регулировочной характеристике.

Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением $U=f(I)$ при $n = \text{const}$ и $r_b = \text{const}$ представлена на рис. 5-51. Верхняя кривая здесь представляет собой внешнюю характеристику при постоянном токе возбуждения.

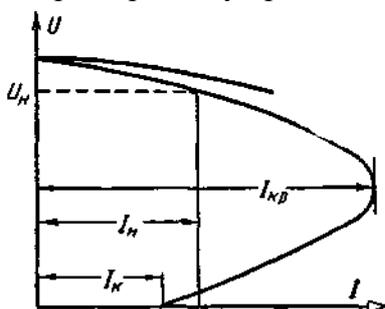


Рис. 5-51. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением.

Понижение напряжения на зажимах генератора с параллельным возбуждением будет больше, чем на зажимах генератора независимого возбуждения, работающего при постоянном токе возбуждения. У генератора с параллельным возбуждением напряжение понижается не только из-за реакции якоря и внутренних сопротивлений цепи якоря, но и вследствие уменьшения тока возбуждения.

При некотором нагрузочном токе дальнейшее уменьшение внешнего сопротивления влечет за собой не увеличение тока, а его уменьшение. Этот наибольший

возможный ток $I_{кр}$ генератора с параллельным возбуждением называется критическим током (рис. 5-51).

Представленный на рис. 5-51 вид внешней характеристики объясняется следующим образом. Если мы при критическом токе уменьшим сопротивление внешней цепи, то в первый момент ток в якоре возрастет. Это вызовет возрастание реакции якоря и внутреннего падения напряжения, а следовательно, понижение напряжения уа его зажимах, которое еще больше уменьшится вследствие обусловленного им уменьшения тока возбуждения. В результате установится режим работы, при котором напряжение будет снижено на относительно большую величину (например, на 30%), чем было уменьшено внешнее сопротивление (например, на 20%), что и приводит к уменьшению нагрузочного тока.

Когда сопротивление внешней цепи равно нулю, т. е. при коротком замыкании, ток якоря равен I_k (рис. 5-51). Этот ток обусловлен наличием остаточного магнетизма. Для больших машин он может быть больше номинального.

Внезапное короткое замыкание для генератора с параллельным возбуждением так же опасно, как и для генератора с независимым возбуждением. Магнитный поток здесь не может быстро уменьшиться из-за большой индуктивности обмотки возбуждения; следовательно, и э.д.с., наведенная им в обмотке якоря, будет уменьшаться постепенно, что приводит к большим значениям тока в цепи якоря в процессе перехода к установившемуся режиму короткого замыкания.

Поэтому генераторы с параллельным возбуждением также должны быть снабжены предохранителями, причем при большой их мощности часто устанавливаются быстродействующие выключатели, отключающие короткозамкнутую цепь еще до того, как ток якоря достиг опасных значений.

г) Генератор с последовательным возбуждением.

Схема генератора с последовательным возбуждением приведена на рис. 5-52.

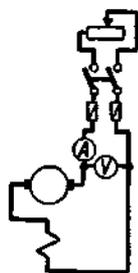


Рис. 5-52. Генератор с последовательным возбуждением.

Характеристику холостого хода этого генератора можно снять только при питании обмотки возбуждения от постороннего источника.

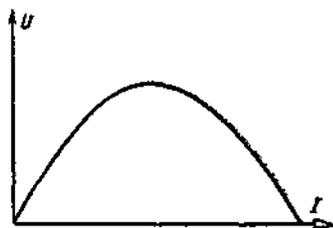


Рис. 5-53. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением.

Внешняя характеристика генератора показана на рис. 5-53. Так как одновременно с током в якоре возрастает и ток в обмотке возбуждения, то напряжение растет вместе с нагрузкой. Однако напряжение будет расти только до некоторого предела, так как дальнейшее увеличение тока в обмотке возбуждения увеличивает магнитный поток лишь в небольшой степени из-за насыщения стальных участков магнитной цепи машины. Ток в обмотке якоря вызывает все большее уменьшение напряжения как вследствие реакции

якоря, так и вследствие падения напряжения в сопротивлении цепи якоря. Поэтому в дальнейшем при увеличении нагрузочного тока напряжение уменьшается. Генераторы с последовательным возбуждением на практике применяются в редких случаях и только в специальных схемах.

д) Генератор со смешанным возбуждением.

Схема генератора со смешанным возбуждением приведена на рис. 5-54. Можно ее изменить, соединив конец параллельной обмотки возбуждения *a* с точкой *b*. Полученная в этом случае схема принципиально не будет отличаться от приведенной на рис. 5-54.

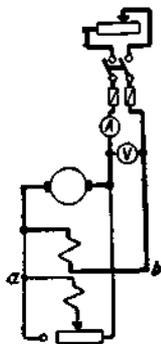


Рис. 5-54. Генератор со смешанным возбуждением.

Мы видели, что у генератора с параллельным возбуждением напряжение при увеличении нагрузки падает и что для поддержания его постоянным нужно увеличивать ток возбуждения.

В генераторе со смешанным возбуждением последовательная обмотка при увеличении нагрузки автоматически увеличивает магнитный поток соответственно току, проходящему по ней.

Таким образом, создается возможность иметь почти постоянное напряжение при любых нагрузках. Внешняя характеристика генератора имеет вид, представленный на рис. 5-55 (кривая *a*). Для получения этой характеристики последовательную обмотку нужно присоединить таким образом, чтобы поток, создаваемый ею, складывался с потоком, создаваемым параллельной обмоткой. Такое соединение последовательной обмотки называется согласным. Оно наиболее часто применяется на практике. При встречном (дифференциальном) включении обеих обмоток — последовательной и параллельной — напряжение при увеличении нагрузки будет резко падать (кривая *c* на рис. 5-55).

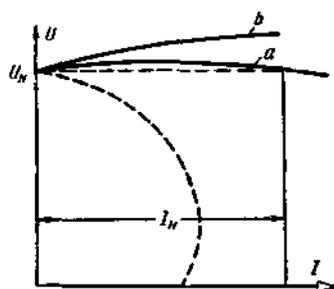


Рис. 5-55. Внешние характеристики генераторов со смешанным возбуждением.

В некоторых случаях применяются генераторы, которые автоматически поддерживают приблизительно постоянное напряжение в конце линии на зажимах приемников. Их внешняя характеристика представлена на рис. 5-55 (кривая *b*).

1.4 Лекция №4 (2 часа).

Тема: «Двигатели постоянного тока»

1.4.1 Вопросы лекции:

1. Общие сведения.
2. Пуск двигателя в ход.

3. Основные характеристики двигателей постоянного тока.
4. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.

1.4.2 Краткое содержание вопросов

1. Общие сведения.

а) Общие вопросы теории.

Для того чтобы двигатель вращался с постоянной скоростью, развиваемый им момент M должен равняться тормозящему моменту нагрузки $M_{ст}$:

$$M_c = M_{ст}. \quad (5-51)$$

Если это равенство нарушается, то скорость вращения двигателя уменьшается или увеличивается до тех пор, пока снова момент двигателя не будет уравновешен моментом нагрузки.

Устойчивая работа двигателя постоянного тока, так же как и асинхронного двигателя (см. § 3-14,а), может быть только при выполнении условия

$$\frac{dM_{ст}}{dn} > \frac{dM}{dn}. \quad (5-52)$$

Это условие выполняется при кривых изменения моментов M и $M_{ст}$, показанных на рис. 5-56,а, и не выполняется при кривых, показанных на рис. 5-56,б. Действительно, в случае кривых рис. 5-56,а при возмущении режима работы, вызвавшем увеличение скорости вращения (положительное приращение Δn), после прекращения возмущения двигатель вернется в исходную точку, так как тормозящий момент $M_{ст}$ больше момента двигателя M ($\Delta M_{ст} > \Delta M$); при отрицательном приращении Δn момент двигателя M больше тормозящего момента $M_{ст}$ ($\Delta M > \Delta M_{ст}$), следовательно, двигатель после прекращения возмущения также вернется в исходную точку. Обратные соотношения получаются в случае кривых моментов рис. 5-56,б; при таких кривых двигатель не может работать устойчиво.

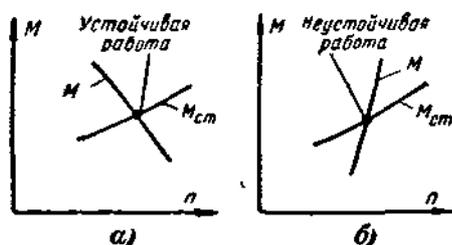


Рис. 5-56. Кривые вращающих моментов. M —двигателя; $M_{ст}$ — нагрузочного.

Обычно для устойчивой работы двигателя необходимо, чтобы при увеличении его скорости вращения развиваемый им вращающий момент уменьшался.

Для изменения направления вращения (для реверсирования) двигателя нужно изменить или направление магнитного потока, или направление тока в обмотке якоря; одновременное же изменение направлений потока и тока якоря не приведет к изменению направления вращения, в чем мы можем убедиться, пользуясь "правилом левой руки".

При пуске двигателей в ход, т. е. при включении их в сеть, необходимо последовательно с обмоткой якоря соединить добавочное сопротивление, которое называется пусковым реостатом.

Если бы не было в цепи якоря пускового реостата, то при пуске в первый момент мы получили бы ток в якоря (здесь мы пренебрегаем влиянием индуктивности цепи якоря, которая несколько уменьшает пусковой ток в начальный период)

$$I_a = \frac{U}{\Sigma r}, \quad (5-53)$$

где Σr — сумма всех сопротивлений внутренней цепи якоря (включая и сопротивление переходных контактов щеток). Так как сопротивление Σr мало, то ток в якоря получился бы во много раз больше номинального.

Для примера возьмем нормальный двигатель мощностью 10 кВт при напряжении $U_n = 110$ В, номинальном токе $I_n = 108$ А и сопротивлении $\Sigma r = 0,08$ Ом. Начальный пусковой ток этого двигателя, если бы мы его включили в сеть без пускового реостата, был бы

$$I_a = \frac{U_n}{\Sigma r} = \frac{110}{0,08} = 1375 \text{ , А,}$$

т. е. превосходил бы почти в 13 раз номинальный ток.

От такого тока могли бы пострадать обмотка якоря и прежде всего коллектор и щетки. Поэтому необходимо последовательно с якорем включать добавочное сопротивление r_d , чтобы пусковой ток, равный теперь

$$I_a = \frac{U_n}{\Sigma r + r_d} \quad (5-54)$$

не превышал допустимого для двигателя. Так как время пуска сравнительно невелико, то пусковой ток берут несколько больше номинального, доводя его для небольших двигателей до двукратного значения номинального тока.

При пуске двигатель развивает начальный пусковой момент. Двигатель начинает вращаться; в его обмотке якоря начинает наводиться э.д.с. E_a . Применяя "правило левой руки", найдем направление вращения двигателя; применяя при этом "правило правой руки", найдем, что наведенная в якоре э.д.с. направлена против тока и, следовательно, против приложенного к двигателю напряжения. Поэтому она называется противо-э.д.с. или обратной э.д.с. Ее роль при работе машины двигателем была впервые выяснена в работах Э. Х. Ленца и Б. С. Якоби.

При вращении двигателя ток в якоре определяется равенством

$$I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r + r_d} \quad (5-55)$$

По мере нарастания скорости вращения и пропорциональной ей обратной э.д.с. E_a добавочное сопротивление нужно уменьшать, т. е. выводить пусковой реостат. Выводить пусковой реостат нужно постепенно, чтобы успевали расти скорость вращения и обратная э.д.с.

Ток в якоре при нормальной работе двигателя, когда выведен весь реостат,

$$I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r} \quad (5-56)$$

Согласно изложенному выше можем написать уравнение напряжений двигателя:

$$U = E_a + I_a \Sigma r \quad (5-57)$$

Найдем скорость вращения двигателя. Из (5-14) следует:

$$E_a = c_n \Phi; \quad (5-58)$$

отсюда, учитывая (5-57), получим:

$$n = c_n \frac{E_a}{\Phi} = c_n \frac{U - I_a \Sigma r}{\Phi} \quad (5-59)$$

$$c_n = \frac{1}{c_s} = \frac{1}{\frac{p}{a} \cdot \frac{1}{60} N}$$

где $\frac{1}{a}$ - постоянная величина.

Из (5-59) следует, что скорость вращения прямо пропорциональна э.д.с. якоря E_a и обратно пропорциональна магнитному потоку Φ .

В зависимости от способа возбуждения различают двигатели: с параллельным, с последовательным и со смешанным возбуждением.

2. Пуск двигателя в ход.

б) Двигатель с параллельным возбуждением.

Схема двигателя с параллельным возбуждением представлена на рис. 5-57. Пусковой реостат здесь имеет три зажима. Один из них (ручка реостата) присоединяется к сети; другой (конец пускового сопротивления) — к якорю; третий (полоска, по которой скользит ручка реостата) — к обмотке возбуждения или через регулировочный реостат R_p , или непосредственно.

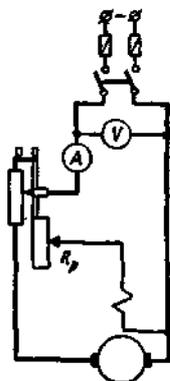


Рис. 5-57. Двигатель с параллельным возбуждением.

Пусковой реостат имеет холостой контакт, не соединенный с пусковым сопротивлением, выполняемый иногда из какого-нибудь изоляционного материала.

Первый контакт пускового реостата соединяется с полоской, к которой присоединена обмотка возбуждения (рис. 5-57). Это делается для того, чтобы цепь возбуждения при остановке двигателя, когда ручка реостата ставится на холостой контакт, была замкнута. Она при этом будет замкнута на обмотку якоря, пусковое сопротивление и регулировочный реостат, если он имеется.

Энергия магнитного поля, запасенная в магнитной системе машины, будет постепенно переходить в электрическую энергию; уменьшение магнитного потока, сцепляющегося с обмоткой возбуждения, вызовет в ней сравнительно небольшую э.д.с. Резкий же разрыв цепи возбуждения при наличии в ней тока приводит к быстрому изменению потока и, следовательно, к появлению большой э.д.с. в обмотке возбуждения, опасной для ее изоляции.

Выключать рубильник следует после того, как ручка реостата поставлена на холостой контакт. Отключая двигатель указанным способом, мы предохраняем контакты рубильника от подгорания и сеть от резкого изменения нагрузки; кроме того, при следующем включении двигателя в сеть мы обеспечиваем пуск его при включенном пусковом реостате.

Магнитный поток Φ двигателя с параллельным возбуждением при $I_b = \text{const}$ изменяется из-за реакции якоря незначительно. Поэтому с большим приближением можно считать в соответствии с (5-49), что его вращающий момент пропорционален току якоря:

$$M \propto I_a. \quad (5-60)$$

Зависимость $n = f(I)$ при $I_b = \text{const}$ и $U = \text{const}$ называется скоростной характеристикой (рис. 5-58). Ток $I = I_a + I_b$ мало отличается от тока I_a , так как I_b составляет небольшую долю от I_n .

Зависимость $n = f(M)$ при $I_b = \text{const}$ и $U = \text{const}$ называется механической характеристикой (рис. 5-58). Она отличается от скоростной практически только масштабом по оси абсцисс. Сплошная кривая на рис. 5-58 представляет собой обычную характеристику. Она показывает, что скорость вращения с увеличением нагрузки на валу падает.

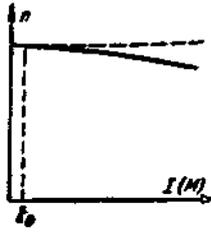


Рис. 5-58. Скоростная $n = f(I)$ или механическая $n = f(M)$ характеристика двигателя с параллельным возбуждением.

Обратимся к формуле (5-59) для скорости n . Из нее видим, что при увеличении тока уменьшается числитель $U - I_a \square r$, при этом будет также уменьшаться знаменатель Φ вследствие реакции якоря. Обычно числитель уменьшается больше, чем знаменатель. Поэтому скорость вращения при увеличении I (или M) будет падать. Если же в двигателе создается сильная реакция якоря, что приводит к большому уменьшению потока Φ , то скорость вращения с увеличением нагрузки будет не падать, а возрастать, например, согласно пунктирной кривой на рис. 5-58. Двигатель с такой характеристикой для работы в обычных условиях практики непригоден, так как он будет работать неустойчиво (рис. 5-56, б).

Показанный на рис. 5-58 ток I_0 есть ток двигателя при холостом ходе (при отсутствии нагрузки на валу).

Двигатели с параллельным возбуждением являются лучшими из регулируемых электродвигателей. Они позволяют плавно и экономично регулировать скорость вращения.

На рис. 5-59 приведены рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением: M , n , I , $\square = f(P_2)$ при $U = \text{const}$ и $I_B = \text{const}$ (\square — к.п.д., P_2 — мощность на валу).

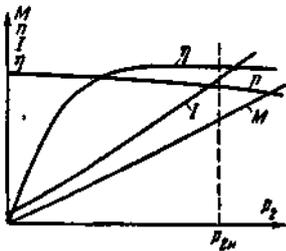


Рис. 5-59. Рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением.

Формула (5-59) показывает, что для изменения n достаточно изменять поток Φ . Изменение потока достигается путем изменения тока возбуждения при помощи регулировочного реостата R_p (рис. 5-57). Так как ток возбуждения составляет небольшую долю номинального тока якоря, то при указанном способе регулирования скорости вращения потери в регулировочном реостате незначительны.

При увеличении тока возбуждения скорость вращения падает, при уменьшении тока возбуждения она возрастает.

При уменьшении I_B поток становится меньше. Так как при этом скорость вращения в первый промежуток времени остается почти постоянной вследствие инерции вращающихся частей, то уменьшается э.д.с. E_a . Уменьшение E_a приводит согласно (5-56) к увеличению тока якоря I_a , причем даже небольшое уменьшение E_a дает относительно большое увеличение тока I_a , так как значения U и E_a мало отличаются одно от другого.

В качестве примера рассмотрим работу двигателя при $U = 110$ В, $E_a = 105$ В, $\square r = 0,08$ Ом и токе якоря

$$I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r} = \frac{110 - 105}{0,08} = 62,5 \text{ А.}$$

Если магнитный поток Φ уменьшить путем уменьшения тока возбуждения на 5%, то э.д.с. E_a в первый промежуток времени, когда скорость еще не успела возрасти, будет равна приблизительно 100 В, а ток якоря

$$I_a \approx \frac{110 - 100}{0,08} = 125 \text{ А,}$$

т. е. при уменьшении Φ на 5% ток возрастает приблизительно на 100%.

Обращаясь к формуле (5-49), мы устанавливаем, что момент M , развиваемый двигателем, повышается, потому что I_a увеличивается больше, чем уменьшается Φ . Увеличение M приводит к увеличению скорости вращения. При ее увеличении будет возрастать э.д.с. E_a , следовательно, будут уменьшаться I_a и M . Режим устанавливается при более высокой скорости вращения, при которой момент двигателя M будет равен моменту нагрузки $M_{ст}$.

Применяя аналогичные рассуждения, можно доказать, что при увеличении тока возбуждения скорость вращения будет падать.

Рассмотрим, как производится определение скоростной характеристики $n = f(I)$ и механической характеристики $n = f(M)$. Оно может быть произведено при помощи кривой $E_a/n = f(I_B)$, полученной из характеристики холостого хода, снятой опытным путем или найденной путем расчета. Эта кривая представлена на рис 5-60. При других масштабах на осях координат она представляет собой зависимость $\Phi = f(I_B)$, так как

$$\frac{E_a}{n} = \frac{1}{60} \cdot \frac{p}{a} N\Phi = c\Phi$$

Будем считать, что известны величины при номинальной нагрузке: $U_n, I_{ан} (I_{ан} = I_n - I_{в.н}), n_n, I_{в.н}, I_{в(р.я)}$ или $F_{р.я} (I_{в(р.я)} - \text{ток возбуждения, соответствующий размагничивающей н.с. реакции якоря } F_{р.я})$. Тогда определение скорости вращения n при холостом ходе производится следующим образом.

Сначала находим э.д.с. якоря при номинальной нагрузке $E_{ан} = U_n - I_{ан}r$, затем — э.д.с. якоря при холостом ходе $E_0 = U_n - I_{а0}r$, причем для двигателей, имеющих ток холостого хода $I_{а0} < 0,1 I_n$ можно приближенно принять $E_{а0} \approx U_n$. Далее по кривой рис. 5-60

находим для $I_{в.н} = \overline{OA_0}$:

$$\frac{\overline{A_0B_0}}{n_0} = \frac{E_{а0}}{n_0} \approx \frac{U_n}{n_0} \quad (5-61)$$

и для $I_{в.н} - I_{в(р.я)} = \overline{OA_n}$:

$$\frac{\overline{A_nB_n}}{n_n} = \frac{E_{ан}}{n_n} \quad (5-62)$$

Из равенств (5-61) и (5-62) получаем:

$$n_0 = n_n \frac{E_{а0}}{E_{ан}} \frac{\overline{A_nB_n}}{\overline{A_0B_0}} \approx n_n \frac{U_n}{E_{ан}} \frac{\overline{A_nB_n}}{\overline{A_0B_0}} \quad (5-63)$$

$$\frac{\overline{A_nB_n}}{\overline{A_0B_0}} = \frac{\Phi_n}{\Phi_0}$$

Очевидно, что $\frac{\overline{A_nB_n}}{\overline{A_0B_0}} = \frac{\Phi_n}{\Phi_0}$, т. е. отношению потоков при нагрузке Φ_n и при холостом ходе Φ_0 .

Если известна скорость вращения n_0 при холостом ходе, то скорость вращения при нагрузке равна:

$$n_n = n_0 \frac{E_{ан}}{E_{а0}} \frac{\overline{A_0B_0}}{\overline{A_nB_n}} \approx n_0 \frac{E_{ан}}{U_n} \frac{\overline{A_0B_0}}{\overline{A_nB_n}} \quad (5-64)$$

Промежуточные значения скорости вращения при $I_a < I_{ан}$ найдем определив E_a и $I_{в(р.я)}$ для тока I_a .

Зная E_a , I_a и n , найдем вращающий момент, кг·м

$$M = 0,102 \cdot 60 \frac{E_a I_a}{2\pi n} = \frac{0,973}{n} E_a I_a, \quad (5-65)$$

и, следовательно, можем построить механическую характеристику $n = f(M)$. Как отмечалось, для устойчивой работы двигателя необходимо, чтобы n_0 было больше n_n .

Если двигатель с параллельным возбуждением предназначен для широких пределов регулирования скорости вращения (например, 4:1) путем изменения тока возбуждения, то при ослабленном поле реакция якоря может оказаться слишком сильной (работа будет протекать на начальной части кривой рис. 5-60) и мы можем получить $A_0 B_0 / A_n B_n > E_{a0} / E_{an}$ и $n_n > n_0$ согласно (5-64).

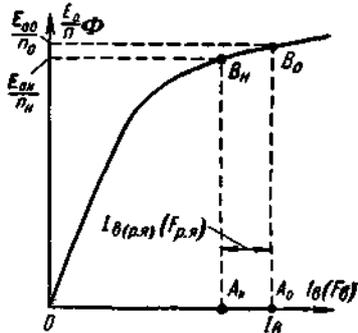


Рис. 5-60. К определению скоростной характеристики.

Тогда необходимо для уменьшения относительного значения реакции якоря (величины $I_{B(p,y)} / I_{B,n}$) выполнить двигатель с увеличенным воздушным зазором \square . Такие двигатели стоят дороже, чем нормальные двигатели с пределами регулирования скорости вращения примерно 1:1,5.

Регулировать скорость вращения двигателя можно также путем изменения напряжения U на зажимах якоря, что следует из формулы (5-59). Изменение U может быть достигнуто при помощи реостата, включенного в цепь якоря. Такой способ регулирования скорости вращения неэкономичен, так как он приводит к непроизводительной затрате большой энергии в реостате. Действительно, при уменьшении n , например, на 50%, если при этом ток в якоре остается неизменным, мы должны уменьшить U почти на 50% и, следовательно, почти половину мощности поглотить в реостате. Реостат при этом получается громоздким и дорогим, так как рассчитывается на длительную нагрузку большим током.

3. Основные характеристики двигателей постоянного тока.

Иногда в специальных случаях применяют отдельный генератор для питания двигателя, скорость вращения которого нужно регулировать в широких пределах. Получается так называемая система "генератор — двигатель". Соответствующая схема показана на рис. 5-61. Здесь ДПТ — двигатель переменного тока (обычно асинхронный); Г — генератор постоянного тока независимого возбуждения, получающий ток возбуждения от небольшого генератора с параллельным возбуждением В; Д — регулируемый двигатель и РМ — рабочий механизм (например, прокатный стан). Регулирование скорости вращения двигателя получается достаточно экономичным, так как здесь изменение напряжения U на зажимах двигателя достигается путем изменения относительно небольшого тока в обмотке возбуждения генератора. В схеме не требуется также пусковой реостат, так как пуск производится при пониженном напряжении, которое в дальнейшем постепенно повышается.

Здесь же легко осуществляется реверсирование двигателя (изменение направления вращения), если это требуется. В этом случае изменяют направление тока в обмотке возбуждения генератора при помощи переключателя (не показанного на рис. 5-61).

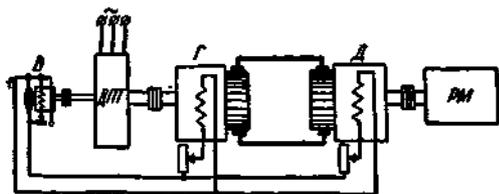


Рис. 5-61. Система генератор-двигатель.

г) Двигатель с последовательным возбуждением.

Схема двигателя с последовательным возбуждением приведена на рис. 5-62. Здесь ток возбуждения равен току якоря. Вследствие этого при малых насыщениях, когда можно считать $\square \square I_a$, вращающий момент двигателя пропорционален квадрату тока [см. (5-49)] При больших значениях тока, когда стальные участки магнитной цепи насыщаются, момент двигателя почти пропорционален току.

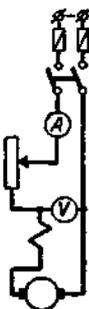


Рис. 5-62. Двигатель с последовательным возбуждением.

С увеличением нагрузки при увеличении, следовательно, тока возрастает магнитный поток, что приводит согласно (5-59) к снижению скорости вращения. При холостом ходе и при малых нагрузках на валу ток двигателя имеет небольшое значение. Небольшое значение будет иметь и магнитный поток. Следовательно, скорость вращения согласно (5-59) при этом сильно возрастает. Она будет превышать допустимое значение в отношении механической прочности вращающихся частей машины. Поэтому нельзя допускать работу двигателя с последовательным возбуждением при холостом ходе и при малых нагрузках. Обычно для нормальных двигателей нагрузка не должна быть меньше 25—30% номинальной. Лишь малые двигатели (мощностью на десятки ватт) допускают работу при холостом ходе, так как их собственные потери достаточно велики.

На рис. 5-63 представлены рабочие характеристики двигателя с последовательным возбуждением. Пунктирные части характеристик относятся к тем нагрузкам, при которых не может быть допущена работа двигателя вследствие большой скорости вращения. Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением $n = f(M)$ при $U = \text{const}$ представлена на рис. 5-64.

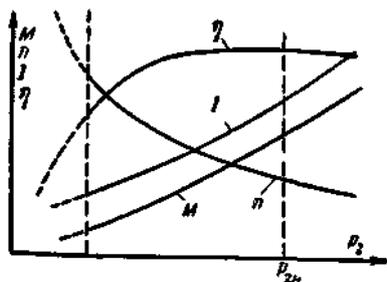


Рис. 5-63. Рабочие характеристики двигателя с последовательным возбуждением.

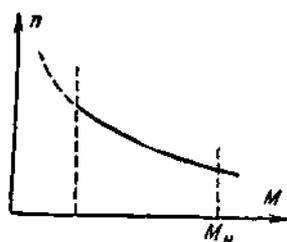


Рис. 5-64. Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением.

Благодаря своим свойствам двигатель особенно пригоден для электрической тяги, для электроприводов к кранам и подъемникам. В этих случаях требуется, чтобы при больших нагрузках скорость резко уменьшалась, а вращающий момент (сила тяги) значительно увеличивался.

Скорость вращения последовательного двигателя можно регулировать путем изменения напряжения U на зажимах якоря или путем изменения магнитного потока. На рис. 5-65 показаны схемы: а) для регулирования путем изменения U при помощи реостата и б) для регулирования путем изменения потока. Так как обычно требуется понижение скорости вращения, то чаще применяют первый способ, который так же неэкономичен, как соответствующий способ регулирования скорости вращения двигателя с параллельным возбуждением.

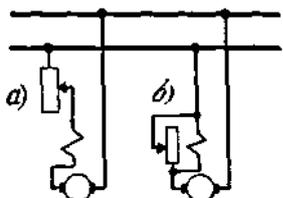


Рис. 5-65. Схемы для регулирования скорости вращения двигателя с последовательным возбуждением.

Для электрической тяги (например, для трамвая) применяются два одинаковых двигателя, установленных на одном и том же вагоне. В этом случае можно получить необходимое число ступеней скорости вращения (7—10) путем комбинирования последовательного и параллельного соединения двигателей вместе с регулировочными сопротивлениями.

д) *Двигатель со смешанным возбуждением.*

Схема двигателя со смешанным возбуждением представлена на рис. 5-66. Обычно последовательная обмотка включается согласно с параллельной таким образом, чтобы ее н.с. складывалась с н.с. параллельной обмотки. В этом случае скорость вращения двигателя при увеличении нагрузки будет более резко падать, чем у двигателя с параллельным возбуждением и менее резко, чем у двигателя с последовательным возбуждением.

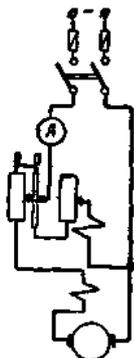


Рис. 5-66. Двигатель со смешанным возбуждением.

Двигатели с параллельным возбуждением, имеющие возрастающую скоростную характеристику (пунктирная кривая на рис. 5-58), не могут работать устойчиво, поэтому они снабжаются последовательной обмоткой с небольшим числом витков, действующей согласно с параллельной обмоткой.

Число ее витков рассчитывается таким образом, чтобы получилась падающая скоростная характеристика, при которой работа двигателя становится устойчивой. Такая последовательная обмотка называется стабилизирующей.

4. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.

Способы регулирования частоты вращения. Частота вращения двигателя постоянного тока

(8.107)

$$n = [U - I_a(\Sigma Ra + R_{доб})] / (c_e \Phi).$$

Следовательно, ее можно регулировать тремя способами: 1) включением добавочного реостата $R_{доб}$ в цепь обмотки якоря; 2) изменением магнитного потока Φ ; 3) изменением питающего напряжения U .

На примере двигателя с параллельным возбуждением рассмотрим принципиальные особенности, свойственные этим способам регулирования.

Включение реостата в цепь якоря. При включении реостата в цепь якоря частота вращения с ростом нагрузки уменьшается более резко, чем при работе двигателя без реостата:

(8.108)

$$= \frac{U - I_a(\Sigma Ra + R_{доб})}{c_e \Phi} = \frac{U - I_a(\Sigma Ra)}{c_e \Phi} - \frac{I_a R_{доб}}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n.$$

Это показано на рис. 8.66, где приведены скоростные и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением: 1 — естественная (при $R_{доб} = 0$); 2 — реостатная (при $R_{доб} > 0$). Частоты вращения при холостом ходе для обеих характеристик равны, значения Δn (уменьшение частоты вращения при нагрузке) различны. При одном и том же токе якоря $\Delta n_{ест} / \Delta n_{реост} = \Sigma Ra / (\Sigma Ra + R_{доб})$. Чем больше добавочное сопротивление $R_{доб}$, тем круче с увеличением нагрузки падает частота вращения.

Механические характеристики $n = f(M)$ двигателя с параллельным возбуждением можно получить из скоростных характеристик $n = f(I_a)$ путем изменения масштаба по оси абсцисс, так как для двигателя этого типа $M = c_M \Phi I_a = c I_a$ (момент пропорционален току якоря).

Основным недостатком данного метода регулирования является возникновение больших потерь энергии в реостате (особенно при низких частотах вращения), что видно из соотношения

(8.109)

$$\Delta n / n_0 = I_a(\Sigma Ra + R_{доб}) / U = I_a^2(\Sigma Ra + R_{доб}) / (U I_a) = \Delta P_{эл} / P_1,$$

где $\Delta P_{эл}$ — электрические потери в цепи якоря; P_1 — мощность, подведенная к якорю.

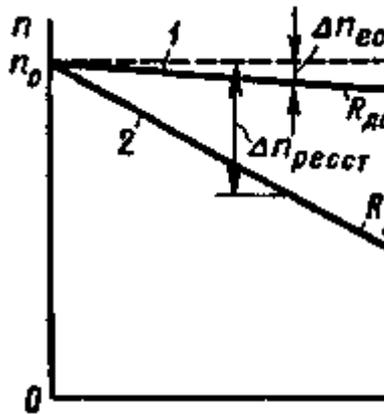


Рис. 8.66. Скоростные и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при регулировании частоты вращения путем включения реостата в цепь якоря

Решая уравнение (8.109) относительно $\Delta P_{эл}$, получаем (8.110)

$$\Delta P_{эл} = P1 \Delta n / n0 = P1 (n0 - n) / n0,$$

т.е. с уменьшением частоты вращения якоря потери линейно возрастают.

Очевидно, что данный способ позволяет только уменьшать частоту вращения (по сравнению с частотой при естественной характеристике). Иногда существенным является то обстоятельство, что при включении в цепь якоря значительного сопротивления характеристики двигателя становятся крутопадающими (мягкими), вследствие чего небольшие изменения нагрузочного момента приводят к большим изменениям частоты вращения.

Изменение магнитного потока. Чтобы изменить магнитный поток, необходимо регулировать ток возбуждения двигателя. При различных магнитных потоках $\Phi1$ и $\Phi2$ частота вращения определяется формулами

(8.111)

$$1 = \frac{U}{\Phi1} \frac{-Ia \sum Ra}{ce} = \frac{a \sum Ra}{e \Phi1} \frac{1}{n01 - \Delta n1} =$$

$$2 = \frac{U}{\Phi2} \frac{-Ia \sum Ra}{ce} = \frac{a \sum Ra}{e \Phi2} \frac{1}{n02 - \Delta n2} =$$

В двигателе с параллельным возбуждением, например, частота вращения при холостом ходе и падение частоты вращения изменяются обратно пропорционально изменению магнитного потока:

(8.112)

$$n02/n01 = \Delta n2/\Delta n1 = \Phi1/\Phi2.$$

Таким образом, скоростные характеристики 1 и 2 двигателя при различных магнитных потоках $\Phi1$ и $\Phi2$ не являются параллельными (рис. 8.67,а). Эти

характеристики пересекаются в точке A при частоте вращения, равной нулю, так как в данном случае ток $I_{ак}$ не зависит от потока:

$$(8.113)$$

$$I_{ак} = U/\Sigma R_a$$

и определяется значениями напряжения и сопротивления цепи якоря. Значение тока $I_{ак}$ при $n = 0$ называют током короткого замыкания.

Механические характеристики для двигателя с параллельным возбуждением строят на основании следующих соображений. Каждая из механических характеристик является практически линейной (если пренебречь реакцией якоря) и может быть построена по двум точкам: точке холостого хода, в которой момент равен нулю, и точке короткого замыкания, в которой момент максимален.

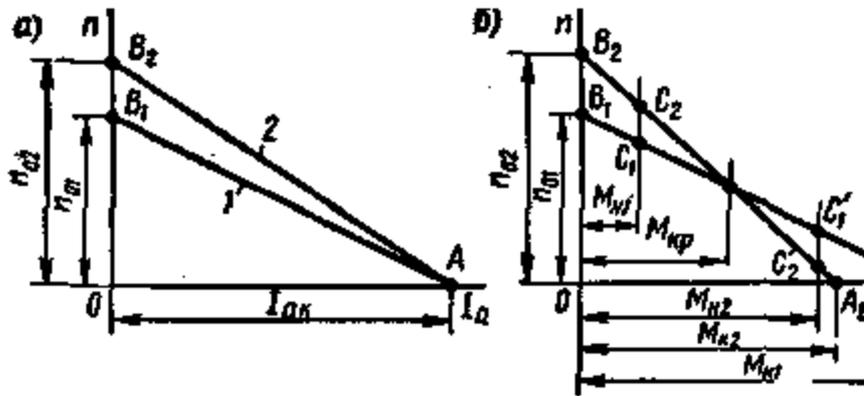


Рис. 8.67. Скоростные и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при регулировании частоты вращения путем изменения магнитного потока

Сравнивая моменты при коротком замыкании, соответствующие различным значениям магнитного потока, получаем

$$(8.114)$$

$$M_{к1}/M_{к2} = cM\Phi_1 I_{ак} / (cM\Phi_2 I_{ак}) = \Phi_1/\Phi_2.$$

Таким образом, с уменьшением магнитного потока частота вращения при холостом ходе возрастает, а момент при коротком замыкании снижается. Следовательно, механические характеристики, построенные при различных значениях магнитного потока, пересекаются при некотором значении момента $M_{кр}$ и частоте вращения, меньшей частоты вращения при холостом ходе, но большей нуля (рис. 8.67, б). Из рассмотрения механических характеристик видно, что при значениях нагрузочного момента, меньших $M_{кр}$, уменьшение потока ведет к увеличению частоты вращения (см. точки C_1 и C_2 при нагрузочном моменте $M_{н1}$). При значениях нагрузочного момента, больших $M_{кр}$, уменьшение потока приводит к уменьшению частоты вращения (см. точки C'_1 и C'_2 при нагрузочном моменте $M_{н2}$).

В двигателях параллельного возбуждения средней и большой мощности уменьшение потока используют для повышения частоты вращения (рис. 8.68, а). В микродвигателях, наоборот, магнитный поток уменьшают для снижения частоты вращения.

Аналогично располагаются и механические характеристики у двигателей с последовательным возбуждением; в двигателях большой и средней мощности при уменьшении магнитного потока частота вращения возрастает (рис. 8.68, б).

Уменьшение магнитного потока в двигателях последовательного возбуждения осуществляют путем включения регулировочного реостата $R_{р.в}$ параллельно обмотке возбуждения OB (рис. 8.69), вследствие чего ток возбуждения

$$(8.115)$$

$$I_{в} = I_a R_{р.в} / (R_{в} + R_{р.в}) = \beta I_a,$$

где $R_{р.в}$ — сопротивление регулировочного реостата, включенного параллельно обмотке возбуждения; $\beta = I_{в}/I_a$ — коэффициент регулирования возбуждения.

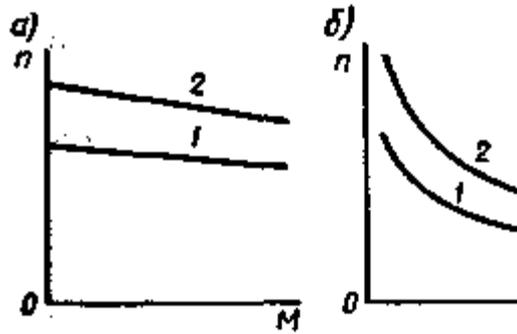


Рис. 8.68. Механические характеристики двигателей: *1* — при нормальном возбуждении; *2* — при уменьшении магнитного потока

При включении реостата $R_{рв}$ параллельно обмотке возбуждения требуемое распределение тока I_a между обмоткой и реостатом обеспечивается только при стационарном режиме. При переходных процессах, когда токи I_a и I_B изменяются, в обмотке возбуждения возникает значительная ЭДС самоиндукции, под действием которой ток I_B уменьшается по сравнению с его значением при стационарном режиме, а ток $I_{рв}$ возрастает, т. е. происходит значительное ослабление возбуждения. Наиболее опасен этот режим для двигателей электрифицированного транспорта (электровозов, электропоездов, трамваев, троллейбусов). При отключении двигателя от сети и последующем включении (при отрыве токоприемника от контактного провода) в первый момент почти весь ток I_a идет по реостату $R_{рв}$, а ток I_B весьма мал. Это приводит к значительному возрастанию тока I_a из-за резкого уменьшения ЭДС E , индуцированной в обмотке якоря. Практически при этих условиях возникает резкий бросок тока I_a , сопровождающийся нарушением нормальной коммутации и образованием кругового огня.

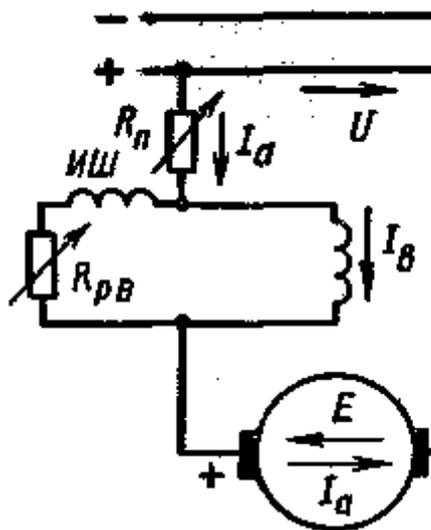


Рис. 8.69. Схема включения регулировочного реостата в двигателе с последовательным возбуждением

Чтобы обеспечить при переходных процессах такое же распределение тока I_a между обмоткой возбуждения и реостатом $R_{р.в}$, как и при стационарном режиме, последовательно с реостатом включают индуктивный шунт $ИШ$ (катушку с ферромагнитным сердечником). Индуктивность его выбирают так, чтобы отношение индуктивностей реостата и обмотки возбуждения было приблизительно равно отношению их сопротивлений.

Рассмотренный способ регулирования весьма прост и экономичен, поэтому его широко применяют на практике. Однако при этом регулирование частоты вращения можно осуществить только в сравнительно небольшом диапазоне; обычно $n_{max}/n_{min} = 2 \div 5$. Нижний предел n_{min} ограничивается насыщением магнитной цепи машины, которое не позволяет увеличивать в значительной степени магнитный поток. Верхний предел n_{max} определяется условиями устойчивости (при сильном уменьшении Φ двигатель идет в «разнос»), а также тем, что при глубоком ослаблении возбуждения резко увеличивается искажающее действие реакции якоря и возрастает реактивная ЭДС, что повышает опасность возникновения искрения на коллекторе и появления кругового огня. Поэтому двигатели, предназначенные для работы в режимах глубокого ослабления возбуждения, должны иметь компенсационную обмотку и пониженное значение реактивной ЭДС при номинальном режиме.

Изменение питающего напряжения на зажимах якоря. При изменении питающего напряжения от U_1 до U_2 частоты вращения определяются соответственно формулами

$$(8.116)$$

$$n_1 = (U_1 - I_a \Sigma Ra) / (ce\Phi) = U_1 / (ce\Phi) - I_a \Sigma Ra / (ce\Phi) = n_{01} - \Delta n_1;$$

$$(8.117)$$

$$n_2 = (U_2 - I_a \Sigma Ra) / (ce\Phi) = U_2 / (ce\Phi) - I_a \Sigma Ra / (ce\Phi) = n_{02} - \Delta n_2.$$

В двигателе с параллельным возбуждением частота вращения при холостом ходе изменяется пропорционально изменению напряжения, т. е. $n_{02}/n_{01} = U_2/U_1$, а уменьшение частоты вращения, обусловленное воздействием нагрузки, при $M_n = \text{const}$ остается неизменным: $\Delta n_1 = \Delta n_2 = \text{const}$. В связи с этим скоростные характеристики двигателя с параллельным возбуждением представляют собой семейство параллельных прямых 1, 2 и 3 (рис. 8.70, а). Механические характеристики $n = f(M)$ получаются из скоростных путем изменения масштаба оси абсцисс, так как момент пропорционален току якоря.

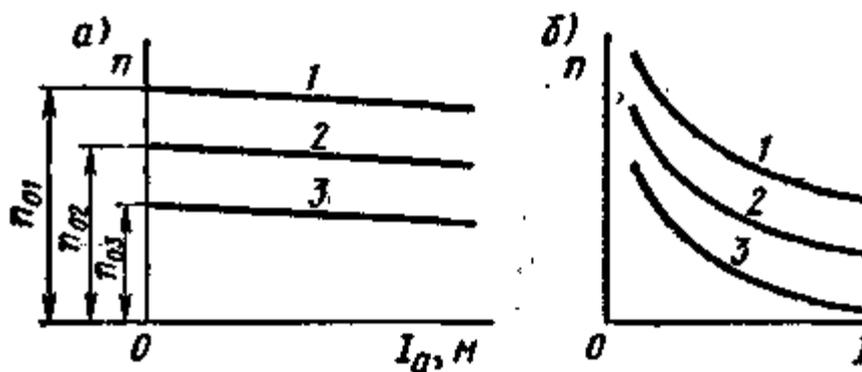


Рис. 8.70. Скоростные и механические характеристики двигателей при регулировании частоты вращения путем изменения напряжения на зажимах якоря

Скоростные и механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением строят аналогично (рис. 8.70, б). Регулирование частоты вращения двигателя путем изменения напряжения на зажимах якоря обычно ведут «вниз», т. е. уменьшают напряжение и частоту вращения по сравнению с номинальными.

Изменение направления вращения. Чтобы изменить направление вращения двигателя, необходимо изменить направление электромагнитного момента M , действующего на якорь. Как следует из (8.84), это можно осуществить двумя способами: путем изменения направления тока I_a в обмотке якоря или изменения направления

магнитного потока Φ , т. е. тока возбуждения. Для этого переключают провода, подводящие ток к обмотке якоря или обмотке возбуждения.

1.5 Лекция №5 (2 часа).

Тема: «Назначение, устройство и принцип действия трансформаторов»

1.5.1 Вопросы лекции:

1. Назначение, классификация и область применения.
2. Принцип действия трансформатора.
3. Устройство и конструктивное исполнение отдельных элементов трансформатора.

1.5.2 Краткое содержание вопросов

1. Назначение, классификация и область применения.

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат с двумя (или больше) обмотками, имеющими между собой магнитную связь, осуществляемую переменным магнитным полем, и служит для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения при сохранении частоты тока неизменной.

Для усиления магнитной связи между обмотками они помещаются на стальном сердечнике (рис. 2-1). Трансформаторы, не имеющие стального сердечника, называются воздушными. Они применяются в специальных случаях при преобразовании переменных токов высокой частоты (от 10000— 20000 Гц и выше). Мы будем рассматривать трансформаторы со стальным сердечником.

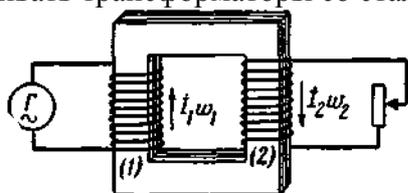


Рис. 2-1. Двухобмоточный трансформатор.

G — генератор переменного тока.

Трансформатор имеет не меньше двух обмоток; из них первичной обмоткой I называется обмотка, которая получает энергию преобразуемого переменного тока, вторичными обмотками 2 — обмотки, которые отдают энергию преобразованного переменного тока.

Трансформаторы применяются в основном для преобразования однофазного и трехфазного тока. В соответствии с этим различают однофазные и трехфазные трансформаторы.

Впервые трансформаторы получили техническое применение в схемах со свечами Яблочкова. П. Н. Яблочков разработал конструкцию однофазного трансформатора с разомкнутым сердечником и при своих опытах, а также при эксплуатации своих осветительных установок выявил основные его свойства.

Техническое применение для передачи электрической энергии на дальние расстояния трансформаторы начинают получать в конце 80-х годов прошлого столетия.

В системе электропередачи трансформаторы являются необходимыми элементами. Передача большой мощности на дальние расстояния практически может быть осуществлена только при относительно небольшом значении тока и, следовательно, при высоком напряжении.

В начале линии электропередачи устанавливаются трансформаторы, повышающие напряжение переменного тока, вырабатываемого на электрических станциях. Напряжение в начале линии электропередачи берут тем выше, чем больше длина линии и передаваемая мощность. Оно достигает 220—250 кВ при расстоянии 200— 400 км и при мощности 300— 200 тыс кВт. При расстоянии около 1000 км и мощности порядка 1 млн кВт (например, для электропередачи Куйбышев — Москва и Волгоград — Москва) требуется напряжение 400—500 кВ.

В конце линии электропередачи, устанавливаются понижающие напряжение трансформаторы, так как для распределения энергии по заводам, фабрикам, жилым домам и колхозам необходимы сравнительно низкие напряжения.

Впервые трехфазная линия электропередачи высокого напряжения (15000 В; из Лауфена на Неккаре до Франкфурта-на-Майне, протяженность около 175 км), положившая начало широким работам по электрификации, была построена при ближайшем участии русского инженера М.О. Доливо-Добровольского. Им же были разработаны конструкции трехфазных трансформаторов, основные черты которых сохранились до настоящего времени.

В настоящее время трансформаторы находят себе самое широкое применение. Существует очень много разнообразных типов их, различающихся как по назначению, так и по выполнению.

Прежде всего нужно выделить группу силовых трансформаторов, которым будет уделено основное внимание в последующем изложении. Это те трансформаторы, которые устанавливаются в начале и конце линий электропередачи, на заводах и фабриках, в жилых домах, при электрификации сельского хозяйства. Такие трансформаторы строятся на мощности от нескольких до десятков тысяч киловольт-ампер.

Переменный ток по пути от электрической станции, где он создается, до потребителя обычно приходится трансформировать 3—4 раза. Отсюда следует, что мощность силовых трансформаторов, необходимых для передачи и распределения электроэнергии, в 3—4 раза больше мощности установленных на электрических станциях генераторов.

Каждый трансформатор снабжается щитком, прикрепленным на видном месте, с указанными на нем номинальными величинами. Последние характеризуют режим работы, для которого трансформатор предназначен. На щитке трансформатора указываются следующие номинальные величины:

1. кажущаяся мощность, ВА или кВА;
2. линейные напряжения, В или кВ;
3. линейные токи, А, при номинальной мощности;
4. частота, Гц;
5. число фаз;
6. схема и группа соединений (§ 2-12);
7. напряжение короткого замыкания (§ 2-7);
8. режим работы (длительный или кратковременный);
9. способ охлаждения.

Кроме того, на щитке трансформатора приводятся дополнительные данные, необходимые при установке и эксплуатации трансформатора:

10. полный вес трансформатора;
11. вес масла;
вес выемной (внутренней, опущенной в масло) части трансформатора.

2. Принцип действия трансформатора.

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток (рис. 2.1), размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, т. е. уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток машины. Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока — электрической сети с напряжением u_1 . Ко 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 *A* и *X*; обмотки НН — буквами *a* и *x*.

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 Максвелла, числам витков w_1 и w_2 соответствующей обмотки и скорости изменения потока $d\Phi/dt$.

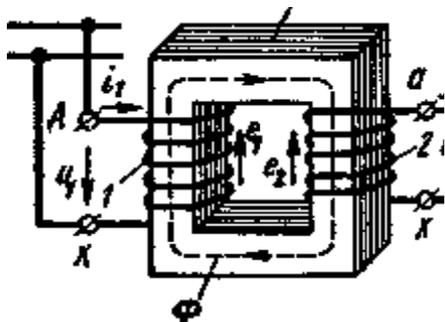


Рис. 2.1. Электромагнитная система однофазного трансформатора: 1, 2 — первичная и вторичная обмотки; 3 — магнитопровод

Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке, $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$; $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$.

Следовательно, отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяется выражением

$$\frac{E_1/E_2 = e_1/e_2 = w_1/w_2.}{(2.1)}$$

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

$$\frac{U_1/U_2 \approx w_1/w_2.}{(2.2)}$$

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*,

Отношение ЭДС $E_{ВН}$ обмотки высшего напряжения к ЭДС $E_{НН}$ обмотки низшего напряжения (или отношение их чисел витков) называют *коэффициентом трансформации*

$$\frac{k = E_{ВН}/E_{НН} = w_{ВН}/w_{НН}}{(2.3)}$$

Коэффициент k всегда больше единицы.

В системах передачи и распределения энергии в ряде случаев применяют трехобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиоэлектроники и автоматики — многообмоточные трансформаторы. В таких трансформаторах на магнитопроводе размещают три или большее число изолированных друг от друга обмоток, что дает возможность при питании одной из обмоток получать два или большее число различных напряжений (U_2 , U_3 , U_4 и т.д.) для электроснабжения двух или большего числа групп потребителей. В трехобмоточных силовых трансформаторах различают обмотки высшего, низшего и среднего (СН) напряжений.

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность же остается приблизительно постоянной (она несколько уменьшается из-за внутренних потерь энергии в трансформаторе). Следовательно,

$$\frac{I_1/I_2 \approx U_2/U_1 \approx w_2/w_1.}{(2.4)}$$

При увеличении вторичного напряжения трансформатора в k раз по сравнению с первичным, ток i_2 во вторичной обмотке соответственно уменьшается в k раз.

Трансформатор может работать только в цепях переменного тока. Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику постоянного тока, то в его магнито-проводе образуется магнитный поток, постоянный во времени по величине и направлению. Поэтому в первичной и вторичной обмотках в установившемся режиме не индуцируются ЭДС, а следовательно, не передается электрическая энергия из первичной цепи во вторичную. Такой режим опасен для трансформатора, так как из-за отсутствия ЭДС E_1 первичной обмотке ток $I_1 = U_1/R_1$ весьма большой.

Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является способность его преобразовывать нагрузочное сопротивление. Если к источнику переменного тока подключить сопротивление R через трансформатор с коэффициентом трансформации k , то для цепи источника

$$\boxed{R' = P_1/I_1^2 \approx P_2/I_2^2 \approx I_2^2 R / I_1^2 \approx k^2 R} \quad (2.5)$$

где P_1 — мощность, потребляемая трансформатором от источника переменного тока, Вт;

$P_2 = I_2^2 R \approx P_1$ — мощность, потребляемая сопротивлением R от трансформатора.

Таким образом, трансформатор изменяет значение сопротивления R в k^2 раз. Это свойство широко используют при разработке различных электрических схем для согласования сопротивлений нагрузки с внутренним сопротивлением источников электрической энергии.

3. Устройство и конструктивное исполнение отдельных элементов трансформатора.

Основными частями трансформатора являются его сердечник и обмотки. Сердечник для уменьшения потерь от вихревых токов собирается из листов специальной электротехнической стали с относительным содержанием кремния до 4—5%. Толщина стали берется 0,5 или 0,35 мм (еще более тонкие листы применяются при повышенной частоте тока). Листы перед сборкой сердечника покрываются с обеих сторон лаком, что дает более прочную и тонкую изоляцию между листами, чем бумага, которой иногда оклеиваются листы до нарезки их на полосы.

Сердечник состоит из стержней, на которых помещаются обмотки, и ярм, которые замыкают стержни и не имеют обмоток. Сборка листов (полос) сердечника производится, как правило, «внахлестку». Таким путем удается свести до весьма малого значения магнитные сопротивления стыков между стержнями и ярмами.

На рис. 2-2 показаны отдельные слои листов, из которых состоит сердечник однофазного трансформатора, а на рис. 2-3 — два слоя листов сердечника трехфазного трансформатора.

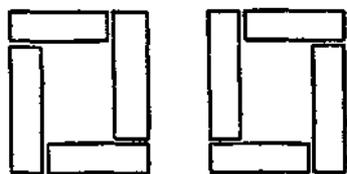


Рис. 2-2. Листы сердечника однофазного трансформатора при сборке их «внахлестку».



Рис. 2-3. Листы сердечника трехфазного трансформатора при сборке их «внахлестку».

Листы сердечника стягиваются при помощи накладок и шпилек, изолированных от листов (рис. 2-4). Листы верхнего яра окончательно закладываются и затем стягиваются, после того как помещены обмотки на стержнях сердечника (рис. 2-5).

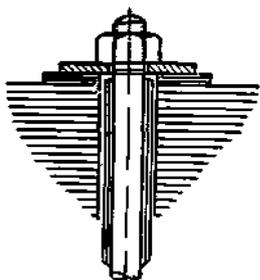


Рис. 2-4 Изоляция шпильки, стягивающей листы сердечника.

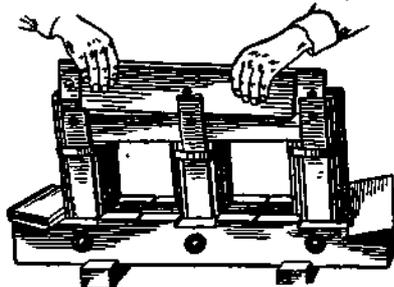


Рис. 2-5. Сборка сердечника трехфазного трансформатора.

Различные формы сечения стержня и яра представлены на рис. 2-6 и 2-7. Сечение по рис. 2-6,*а* применяется лишь для небольших трансформаторов; сечения по рис. 2-6,*б* и *в* применяются для трансформаторов средней и большой мощности. При большом числе ступеней сечения его периметр приближается к окружности, и, следовательно, при том же сечении стержня уменьшается средняя длина витка обмоток, а при этом и количество расходуемой обмоточной меди.



Рис. 2-6. Форма сечения стержней.

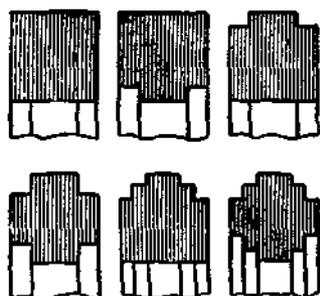


Рис. 2-7. Формы сечения яра.

По выполнению сердечника принято различать два типа трансформаторов: стержневой и броневой. Стержневой тип трансформатора (рис. 2-5) получил преобладающее применение на практике. Однофазный броневой трансформатор показан на рис. 2-8. Из броневых трансформаторов в Советском Союзе получили некоторое распространение однофазные броневые трансформаторы малой мощности: радиотехнические, звоноквые и др.

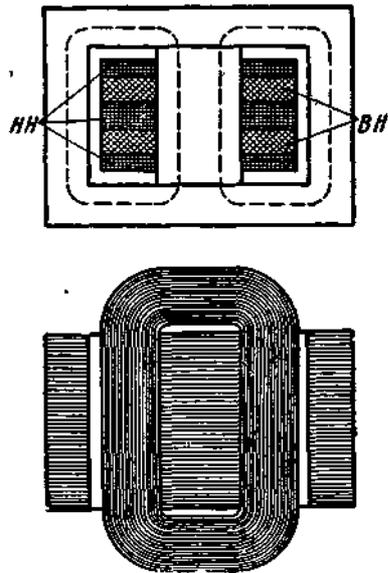


Рис. 2-8. Однофазный броневой трансформатор с дисковыми чередующимися обмотками.

Обмотки трансформаторов выполняются в виде цилиндрических катушек из проводников круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или специальной (кабельной) бумагой.

В зависимости от номинального напряжения следует различать обмотку низшего напряжения и обмотку высшего напряжения. Обмотка низшего напряжения (НН) помещается ближе к стержню, а обмотка высшего напряжения (ВН) — снаружи; она охватывает обмотку низшего напряжения (рис. 2-9). При таком расположении обмоток уменьшается расход изоляционных материалов, так как обмотка высшего напряжения относительно стержня будет иметь собственную изоляцию и изоляцию обмотки низшего напряжения. Обмотки, показанные на рис. 2-9, называются концентрическими.

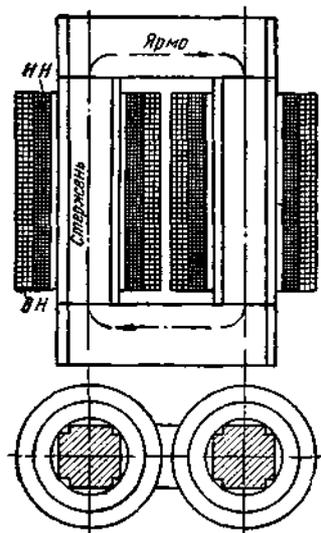


Рис. 2-9. Однофазный стержневой трансформатор с концентрическими обмотками.

Иногда каждую из обмоток разделяют на отдельные катушки и располагают их на стержне в чередующемся порядке, как показано на рис. 2-10. Такие обмотки называются дисковыми чередующимися. Они на практике встречаются редко и применяются главным образом для броневых трансформаторов (рис. 2-8).

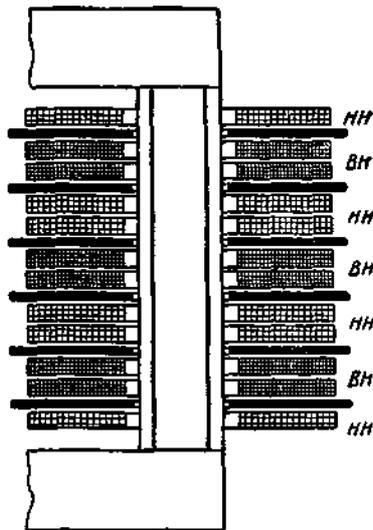


Рис.2.10. Дисковая чередующаяся обмотка.

Трансформаторы выполняются с воздушным и масляным охлаждением. Первые называются сухими, вторые — масляными. В масляных трансформаторах сердечник вместе с обмотками помещается в баке с маслом. Масляные трансформаторы более надежны в работе. Масло предохраняет изоляцию обмоток от вредного воздействия воздуха, улучшает условия охлаждения обмоток и сердечника, так как имеет большую теплопроводность, чем воздух; кроме того, вследствие большой диэлектрической прочности позволяет сократить изоляционные расстояния, т. е. расстояния от меди обмоток до стали сердечника.

1.6 Лекция №6 (2 часа).

Тема: «Рабочий процесс трансформатора»

1.6.1 Вопросы лекции:

1. Режим холостого хода.
2. Режим работы трансформатора под нагрузкой.
3. Схемы замещения трансформатора.

1.6.2 Краткое содержание вопросов

1. Режим холостого хода.

Под холостым ходом трансформатора понимается режим его работы при разомкнутой вторичной обмотке. В этих условиях трансформатор со стороны первичной обмотки во всем подобен катушке со стальным сердечником.

Обратимся к рис. 2-11, где схематически изображен однофазный трансформатор. Здесь первичная обмотка с числом витков w_1 и вторичная обмотка с числом витков w_2 расположены для наглядности на разных стержнях.

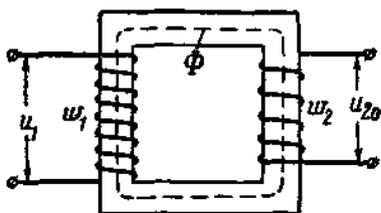


Рис. 2-11. Холостой ход трансформатора.

Пусть к первичной обмотке при разомкнутой вторичной подведено напряжение u_1 . По первичной обмотке будет протекать ток i_0 . В трансформаторе возникнет магнитное поле, которое будет создаваться намагничивающей силой (н.с.) $i_0 w_1$ первичной обмотки.

Магнитным полем вне сердечника можем вначале пренебречь, так как магнитная проницаемость стали во много раз больше магнитной проницаемости воздуха (или масла).

Полю в сердечнике соответствует магнитный поток Φ , сцепляющийся со всеми витками обеих обмоток. Он будет наводить в первичной обмотке э.д.с.

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2-1)$$

и вторичной обмотке э.д.с.

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2-2).$$

Напряжение на зажимах первичной обмотки

$$u_1 = i_0 r_1 - e_1.$$

Активное падение напряжения $i_0 r_1$ в первичной обмотке имеет практически ничтожное значение. Поэтому можно считать, что первичное напряжение u_1 в любой момент времени уравнивается только э.д.с. e_1 . Если напряжение u_1 представляет собой синусоидальную функцию времени, то, следовательно, э.д.с. e_1 и наводящий её поток Φ — также синусоидальные функции времени. Подставив в (2-1) и (2-2) $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, где Φ_m — амплитуда потока, $\omega = 2\pi f$ — угловая частота тока, t — время, с, получим:

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f w_1 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); \quad (2-3)$$

$$e_2 = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f w_2 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (2-4)$$

Полученные уравнения показывают, что e_1 и e_2 отстают по фазе от потока Φ на угол $\frac{\pi}{2}$. Действующие значения обеих э.д.с. соответственно равны:

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad (2-5)$$

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m, \quad (2-6)$$

где Φ_m — в В·с.

Из (2-5) и (2-6) следует:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (2-7)$$

Так как при холостом ходе $U_{20} \approx E_2$ и $U_1 \approx E_1$, то можем написать:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (2-8)$$

Отношение напряжений при холостом ходе трансформатора называется коэффициентом трансформации. Обычно берется отношение высшего напряжения к низшему. Если при холостом ходе трансформатора к его первичной обмотке подведено номинальное напряжение $U_{1н}$, указанное на щитке трансформатора, то на зажимах вторичной обмотки должно получиться вторичное номинальное напряжение $U_{20} = U_{2н}$.

Вследствие перемагничивания стали сердечника в нем возникают магнитные потери, т. е. потери от гистерезиса и вихревых токов. Можно считать, что мощность P_0 , потребляемая трансформатором при холостом ходе и напряжении $U_1 = U_{1н}$, идет только на

покрытие магнитных потерь P_c , так как при этом электрические потери $I_0^2 r_1$ практически ничтожны. Следовательно, ток холостого хода I_0 наряду с реактивной составляющей I_{0p} имеет активную составляющую I_{0a} , т. е.

$$I_0 = \sqrt{I_{0p}^2 + I_{0a}^2}. \quad (2-9)$$

Реактивная составляющая I_{0p} , которую называют также намагничивающим током, идет на создание магнитного поля в сердечнике трансформатора. Ее значение определяется из расчета магнитной цепи трансформатора (§2-14).

Активная составляющая тока холостого хода I_{0a} определяется по формуле

$$I_{0a} = \frac{P_c}{U_{1н}}. \quad (2.10)$$

Магнитные потери могут быть рассчитаны по обычным формулам (§ 2-14).

Приложенное к первичной обмотке напряжение u_1 , как отмечалось, уравнивается в основном э.д.с. e_1 . Поэтому при синусоидальном u_1 мы можем написать векторное (комплексное) уравнение

$$U \approx -\dot{E}_1. \quad (2-11)$$

Следовательно, векторная диаграмма трансформатора при его холостом ходе будет иметь вид, представленный на рис. 2-12.

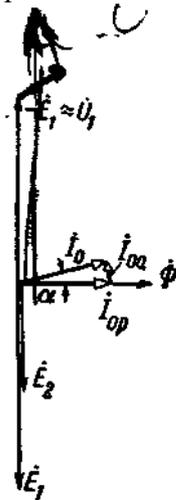


Рис. 2-12. Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе.

Она отличается от диаграммы для реактивной катушки со стальным сердечником только наличием вектора вторичной э.д.с. Так же как и для реактивной катушки со стальным сердечником, можно написать:

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_{12} = \dot{I}_0 (r_{12} + jx_{12}); \quad (2-12)$$

здесь

$$|Z_{12}| = z_{12} = \frac{E_1}{I_0}; \quad r_{12} = \frac{P_c}{I_0^2};$$

$$x_{12} = \sqrt{z_{12}^2 - r_{12}^2}. \quad (2-13)$$

2. Режим работы трансформатора под нагрузкой.

а) Первичный ток.

Работа трансформатора при нагрузке характеризуется наличием тока I_2 во вторичной обмотке, увеличение которого (как будет ясно из последующего) вызывает увеличение тока I_1 в первичной обмотке.

При нагрузке трансформатора магнитный поток Φ в его сердечнике, называемый главным потоком, создается согласно закону полного тока совместным действием н.с. обеих обмоток:

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_0 w_1, \quad (2-14)$$

где i_1, i_2, i_0 — мгновенные значения токов, причем в общем случае i_0 отличается от мгновенного значения тока холостого хода.

Так как мы принимаем токи синусоидальными, то можем написать (рис. 2-1):

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1. \quad (2-15)$$

Результирующая н.с. $I_0 w_1$ должна иметь такое значение, чтобы создаваемый ею поток наводил в первичной обмотке э.д.с. E_1 , почти полностью уравновешивающую приложенное напряжение U_1 . Поток в сердечнике трансформатора и результирующая н.с. $I_0 w_1$ при нагрузке, не превышающей значительно номинальную, мало отличаются от тех же потока и н.с. первичной обмотки при холостом ходе, если в обоих случаях напряжение U_1 сохраняет свое значение.

Разделив обе части равенства (2-15) на w_1 , получим:

$$I_1 + I \frac{w_2}{w_1} = I_0, \quad (2-16)$$

или

$$I_1 + I'_2 = I_0, \quad (2-17)$$

где

$$I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} \quad (2-18)$$

— вторичный ток, приведенный к числу витков первичной обмотки.

Очевидно, что вторичная обмотка с током I'_2 должна иметь число витков w_1 , чтобы ее н.с. $I'_2 w_1$ была равна н.с. $I_2 w_2$ действительной вторичной обмотки. При этом вместо уравнения н.с. (2-15) можно пользоваться уравнением токов (2-17).

Из (2-17) получаем значение первичного тока I_1

$$I_1 = I_0 - I'_2. \quad (2-19)$$

Мы видим, что первичный ток I_1 имеет две составляющие: одна из них (I_0) идет на создание потока в сердечнике трансформатора, другая ($-I'_2$) компенсирует размагничивающее действие вторичного тока. Следовательно, при увеличении вторичного тока будет увеличиваться и первичный ток, чтобы поток оставался почти равным потоку при холостом ходе.

Так как ток I_0 имеет относительно небольшое значение, то при токах, близких к номинальным, можно принять

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}.$$

б) Уравнения напряжений.

Будем вначале считать, что потокосцепления обмоток трансформатора пропорциональны их токам и что магнитные потери в сердечнике отсутствуют (такие условия получаются в воздушном трансформаторе). При этом, так же как для двух магнитно связанных контуров, можем написать следующие уравнения напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + i_1 r_1; \quad (2-20)$$

$$u_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} - i_2 r_2, \quad (2-21)$$

где u_1 и u_2 — мгновенные значения первичного и вторичного напряжений; L_1 , L_2 и M — полные индуктивности и взаимная индуктивность обмоток; r_1 и r_2 — их активные сопротивления.

Первичное напряжение u_1 имеет составляющие, уравновешивающие э.д.с.

самоиндукции $(-L_1 \frac{di_1}{dt})$ и взаимоиндукции $(-M \frac{di_2}{dt})$, и составляющую, равную активному падению напряжения $i_1 r_1$. Вторичное напряжение u_2 получается после

вычитания из результирующей э.д.с. самоиндукции и взаимоиндукции $(-L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt})$ активного падения напряжения $i_2 r_2$.

Полагая, так же как и в предыдущем, что в сердечнике трансформатора имеет место главный поток Φ , который создается результирующей н.с. $i_0 w_1$ мы можем для токов i_1 , и i_2 согласно (2-14) написать следующие равенства:

$$i_1 = i_0 - i_2 \frac{w_2}{w_1}; \quad (2-22)$$

$$i_2 = i_0 \frac{w_1}{w_2} - i_1 \frac{w_1}{w_2} \quad (2-23)$$

Подставив (2-23) в (2-20) и (2-22) в (2-21), получим:

$$u_1 = \left(L_1 - M \frac{w_1}{w_2} \right) \frac{di_1}{dt} + M \frac{w_1}{w_2} \frac{di_0}{dt} + i_1 r_1; \quad (2-24)$$

$$u_2 = - \left(L_2 - M \frac{w_2}{w_1} \right) \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_0}{dt} + i_2 r_2 \quad (2-25)$$

или

$$u_1 = M \frac{w_1}{w_2} \frac{di_0}{dt} + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + i_1 r_1; \quad (2-24a)$$

$$u_2 = -M \frac{di_0}{dt} + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2, \quad (2-25a)$$

где $L_1 - M \frac{w_1}{w_2} = L_{\sigma 1}$ и $L_2 - M \frac{w_2}{w_1} = L_{\sigma 2}$ — индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток; им соответствуют э.д.с. рассеяния:

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \quad (2-26)$$

$$e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}. \quad (2-27)$$

Электродвижущие силы

$$e_1 = -M \frac{w_1}{w_2} \frac{di_0}{dt} = w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (2-28)$$

$$e_2 = -M \frac{di_1}{dt} = w_2 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (2-29)$$

рассматриваются как э.д.с., наведенные главным потоком Φ .

Приведем здесь уравнения, относящиеся к общей теории двух магнитно связанных обмоток. Для потокосцепления этих обмоток можем написать:

$$\Psi_1 = L_1 i_1 + M i_2; \quad (2-30)$$

$$\Psi_2 = L_2 i_2 + M i_1. \quad (2-31)$$

Вычтем и прибавим с правой стороны написанных равенств одни и те же величины:

$$\Psi_1 = L_1 i_1 + M i_2 - \lambda_1 M i_1 + \lambda_1 M i_1 = (L_1 - \lambda_1 M) i_1 + M(\lambda_1 i_1 + i_2);$$

$$\Psi_2 = L_2 i_2 + M i_1 - \lambda_2 M i_2 + \lambda_2 M i_2 = (L_2 - \lambda_2 M) i_2 + M(\lambda_2 i_2 + i_1).$$

Здесь коэффициенты λ_1 и λ_2 имеют произвольные значения.

Будем называть величины

$$M(\lambda_1 i_1 + i_2) = \Psi_{r1} \quad \text{и} \quad M(i_1 + \lambda_2 i_2) = \Psi_{r2}$$

главными потокосцеплениями обмоток, а величины

$$(L_1 - \lambda_1 M) i_1 = L_{\sigma 1} i_1 \quad \text{и} \quad (L_2 - \lambda_2 M) i_2 = L_{\sigma 2} i_2$$

их потокосцеплениями рассеяния.

Главными индуктивностями обмоток назовем величины

$$L_{r1} = L_1 - L_{\sigma 1} = L_1 - (L_1 - \lambda_1 M) = \lambda_1 M;$$

$$L_{r2} = L_2 - L_{\sigma 2} = L_2 - (L_2 - \lambda_2 M) = \lambda_2 M.$$

Общий коэффициент рассеяния равен:

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}. \quad (2-32)$$

Коэффициенты рассеяния обмоток равны отношениям индуктивностей рассеяния к главным индуктивностям:

$$\sigma_1 = \frac{L_1 - \lambda_1 M}{\lambda_1 M} \quad \text{и} \quad \sigma_2 = \frac{L_2 - \lambda_2 M}{\lambda_2 M}. \quad (2-33)$$

Между произвольными значениями коэффициентов λ_1 и λ_2 можно установить простое соотношение. Для этого примем (с физической стороны это легко себе представить), что общий коэффициент рассеяния стремится к нулю ($\sigma \rightarrow 0$), если при этом индуктивности рассеяния стремятся к нулю. Вводя $L_1 = \lambda_1 M + L_{\sigma 1}$ и $L_2 = \lambda_2 M + L_{\sigma 2}$ в (2-

32) и принимая $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ равными нулю, получим для $\sigma \rightarrow 0$:

$$\lambda_1 \lambda_2 = 1. \quad (2-34)$$

Отсюда имеем: $L_{r1} L_{r2} = M^2$.

Мы видим, следовательно, что, хотя общий коэффициент рассеяния σ определяется однозначно, отдельные коэффициенты рассеяния σ_1 и σ_2 являются произвольными, так же как λ_1 и λ_2 .

Подразделяя произведение $\lambda_1 \lambda_2$ любым образом на λ_1 и λ_2 можно потокосцепления рассеяния приписать одной или другой обмотке или обоим обмоткам. Мы не имеем также достаточно данных, чтобы однозначно определить главный поток, о котором говорилось ранее. Однако внести определенность в понятия индуктивностей рассеяния мы можем только в том случае, если допустим, что в трансформаторе существует главный поток Φ , созданный н.с. обеих обмоток и сцепляющийся со всеми их витками. Такое допущение,

очевидно, в большой степени оправдывается в применении к нормальным трансформаторам со стальным сердечником.

Мы можем теперь написать:

$$\Psi_{r1} = M(\lambda_1 i_1 + i_2) = \Phi w_1;$$

$$\Psi_{r2} = M(\lambda_2 i_2 + i_1) = \Phi w_2.$$

Отсюда получаем:

$$i_1(\lambda_1 w_2 - w_1) + i_2(w_2 - \lambda_2 w_1) = 0.$$

Так как полученное равенство должно быть справедливо при любых значениях i_1 и i_2 , то выражения в скобках по отдельности должны быть равны нулю; следовательно,

$$\lambda_1 = \frac{w_1}{w_2} \quad \lambda_2 = \frac{w_2}{w_1},$$

что мы и получили ранее в дифференциальных уравнениях, допустив, что в трансформаторе существует главный поток Φ , созданный результирующей н.с. $i_0 w_1$.

Теория электрических машин также основана, как мы покажем в дальнейшем, на допущении существования главного потока, не зависящего от полей рассеяния.

Считая, что токи и э.д.с. уравнений (2-26)—(2-29) изменяются во времени по закону синуса, мы можем эти уравнения переписать в комплексной форме:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_1 = -jx_{11} \dot{I}_1;$$

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -j\omega L_{\sigma 2} \dot{I}_2 = -jx_{22} \dot{I}_2;$$

$$\dot{E}_1 = -j\omega M \frac{w_1}{w_2} \dot{I}_0 = -jx_{12} \dot{I}_0; \quad (2-35)$$

$$\dot{E}_2 = -j\omega M \dot{I}_0 = -jx_{12} \frac{w_2}{w_1} \dot{I}_0.$$

В равенствах (2-35) $x_1 = \omega L_{\sigma 1}$ и $x_2 = \omega L_{\sigma 2}$ — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток, а $x_{12} = \omega M \frac{w_1}{w_2}$ — индуктивное сопротивление взаимной индукции обмоток.

Ранее при рассмотрении режима холостого хода мы пренебрегали полем вне сердечника трансформатора. В действительности это поле согласно закону полного тока должно существовать. Оно называется полем рассеяния. Созданные им потокосцепления обмоток малы по сравнению с потокосцеплениями обмоток, созданными главным потоком. С большим приближением к действительным условиям можно считать, что поле рассеяния и поле в сердечнике, соответствующее главному потоку, существуют независимо одно от другого.

На рис. 2-13 представлена приближенная картина поля рассеяния, которую кладут в основу расчета потокосцеплений рассеяния. Здесь пунктирной линией показан путь главного потока Φ , сплошными линиями показаны индукционные линии поля рассеяния. Они могут быть условно разделены на две группы: сцепляющиеся с первичной обмоткой и сцепляющиеся со вторичной обмоткой. Магнитные сопротивления для потоков соответствующих индукционных трубок рассеяния определяются в основном сопротивлениями тех их частей, которые проходят вдоль обмоток и в промежутке между ними. Их можно принять постоянными, поскольку потоки трубок проходят по материалам (медь, изоляция, воздух или масло), для которых $\mu = \text{const}$. Магнитными сопротивлениями потоков трубок вне обмоток и промежутка между ними можно пренебречь, так как здесь они проходят в основном по стали сердечника.

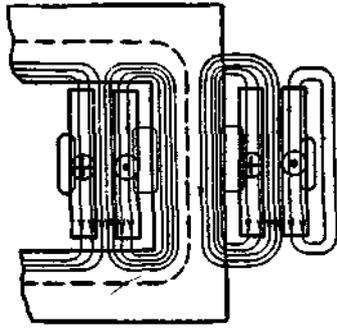


Рис. 2-13. Приближенная картина поля рассеяния трансформатора с концентрическими обмотками, где крестиками и точками условно показаны направления токов в обмотках для рассматриваемого момента времени.

Таким образом, потокосцепления рассеяния и созданные ими э.д.с. рассеяния можно принять пропорциональными н.с. или токам соответствующих обмоток и считать индуктивности $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$, а следовательно x_1 и x_2 , постоянными величинами. Индуктивное сопротивление взаимоиндукции x_{12} зависит от Φ , однако в пределах небольшого изменения Φ_M и, следовательно, E_1 можно принять x_{12} также постоянным.

С учетом приведенных равенств (2-35) уравнения напряжений (2-24a) и (2-25a) для установившегося режима могут быть написаны в комплексной форме:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \quad (2-36)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(r_2 + jx_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2. \quad (2-37)$$

Уравнения (2-36) и (2-37) называются векторными уравнениями напряжений трансформатора (здесь имеются в виду временные векторы напряжений, э.д.с. и токов).

В реальном трансформаторе со стальным сердечником при его работе возникают магнитные потери. Для их учета мы должны считать, так же как при холостом ходе, что ток I_0 имеет наряду с реактивной составляющей I_{0p} активную составляющую I_{0a} [см. уравнения (2-9) — (2-13)]; однако обе эти составляющие мы должны отнести не к \dot{U}_1 а к \dot{E}_1 , так как они зависят от Φ_M .

Вследствие нелинейной связи между потоком Φ и результирующим током i_0 кривая последнего при синусоидальном потоке Φ будет несинусоидальной (§ 2-13). Для облегчения анализа зависимостей, характеризующих работу трансформатора, ток i_0 принимается синусоидальным с действующим значением, равным тому же значению действительного тока. Такое допущение не может привести к заметной ошибке из-за относительной малости тока I_0 .

3. Схемы замещения трансформатора.

2-5. Схема замещения

Расчеты, связанные с исследованием работы трансформатора, можно свести к расчетам простых цепей переменного тока. Для этого заменим трансформатор некоторой схемой, сопротивление которой $Z_{\text{экр}}$ определим; из уравнений напряжений (2-36) и (2-38) и уравнения токов (2-17). Перепишем эти уравнения в следующем виде:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 Z_{12} + \dot{I}_1 Z_1; \quad (2-40)$$

$$\dot{U}'_2 = -\dot{I}_0 Z_{12} - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{I}'_2 Z'; \quad (2-41)$$

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_0 - \dot{I}_1, \quad (2-42)$$

где $\dot{I}_0 Z_{12} = -\dot{E}_1 = -\dot{E}'_2$ [см. уравнение (2-12)]; $Z_1 = r_1 + jx_1$;

$$Z'_2 = r'_2 + jx'_2; \quad Z' = Z \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2$$

— приведенное к числу витков первичной обмотки

сопротивление внешней вторичной цепи, падение напряжения $\dot{I}'_2 Z'$ в котором, очевидно, и есть \dot{U}'_2 .

Подставив в (2-41) значение тока \dot{I}'_2 из (2-42), найдем:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 \frac{Z'_2 + Z'}{Z_{12} + Z'_2 + Z'}$$

Подставив в (2-40) найденное значение \dot{I}_0 , получим:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \left[Z_1 + \frac{Z_{12}(Z'_2 + Z')}{Z_{12} + Z'_2 + Z'} \right] = \dot{I}_1 \left(Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_{12}} + \frac{1}{Z'_2 + Z'}} \right) = \dot{I}_1 Z_{\text{экв}}. \quad (2-43)$$

Сопротивлению $Z_{\text{экв}}$ соответствует схема, представленная на рис. 2-17. Она называется схемой замещения трансформатора. Здесь ветвь с сопротивлением Z_{12} может быть названа ветвью намагничивания. Очевидно, что уравнения напряжений и токов, составленные согласно законам Кирхгофа для этой схемы, будут такими же, как и уравнения (2-40) — (2-42).

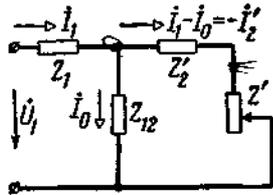


Рис. 2-17. Схема замещения трансформатора.

В схеме замещения переменным параметром является сопротивление Z' ; остальные ее параметры можно считать постоянными. Они могут быть определены путем расчета, а также опытным путем. В последнем случае обращаются к данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

2-6. Опыт холостого хода

По данным опыта холостого хода определяются коэффициент трансформации $\frac{U_{20}}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1}$, магнитные потери P_c и параметры ветви намагничивания Z_{12}, r_{12}, x_{12} . Магнитные потери P_c , как указывалось, могут быть приняты равными мощности P_0 , потребляемой трансформатором при холостом ходе.

При опыте холостого хода собирается схема по рис. 2-18 для однофазного трансформатора или по рис. 2-19 для трехфазного трансформатора. При номинальном напряжении $U_{\text{ин}}$ (линейном в случае трехфазного трансформатора) измеряют I_0, P_0 , и U_{20} . Опыт холостого хода должен производиться при синусоидальном напряжении. Если напряжение заметно отличается от синусоидального, то в данные измерений необходимо внести некоторые поправки (согласно ГОСТ). При исследовании малых трансформаторов следует учитывать потери в приборах, так как они могут быть соизмеримы с потерями холостого хода.

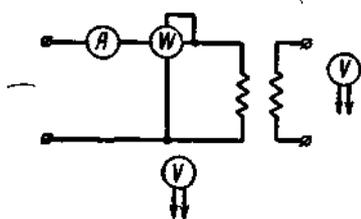


Рис. 2-18 Схема при опыте холостого хода для однофазного трансформатора.

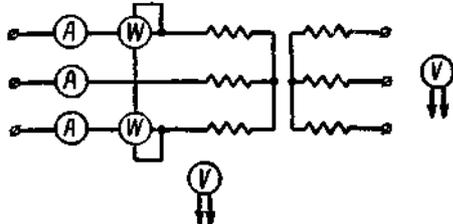


Рис. 2-19. Схема при опыте холостого хода для трехфазного трансформатора.

Измерения U_1 и U_{20} производятся при помощи вольтметров или при высоком напряжении, при помощи вольтметров и измерительных трансформаторов напряжения.

По данным измерений находят коэффициент трансформации: $U_{20}/U_1 \approx w_1/w_2$. По амперметру и ваттметру находят ток I_0 и мощность P_0 в случае однофазного трансформатора. В случае трехфазного трансформатора необходимо измерить токи во всех трех фазах, так как вследствие несимметрии магнитных цепей отдельных фаз токи в них будут различны. За ток холостого хода здесь принимается среднее арифметическое токов отдельных фаз, т. е.

$$I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}. \quad (2-44)$$

Мощности отдельных фаз также различны; поэтому мощность, потребляемую трехфазным трансформатором при холостом ходе, следует измерять двумя ваттметрами по схеме рис. 2-19.

Для нормальных силовых трансформаторов ток холостого хода составляет (0,10—0,04) I_N при номинальных мощностях от 5 до нескольких тысяч киловольт-Ампер.

Холостому ходу будет соответствовать схема замещения рис. 2-17 при $Z' = \infty$. Следовательно, по данным опыта холостого хода получаем:

$$z_0 = [Z_1 + Z_{12}] = \sqrt{(r_1 + r_{12})^2 + (x_1 + x_{12})^2} = \frac{U_1}{I_0}.$$

Так как для нормальных трансформаторов r_{12} больше r_1 и x_{12} больше x_1 в сотни раз, то можно принять:

$$z_{12} \approx z_0; \quad r_{12} \approx r_0 = r_1 + r_{12} = \frac{P_0}{I_0^2};$$

$$x_{12} \approx x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

1.7 Лекция №7 (2 часа).

Тема: «Устройство и особенности конструктивного выполнения 3-х фазных трансформаторов»

1.7.1 Вопросы лекции:

1. Трёхфазные трансформаторы.
2. Преобразование трёхфазного тока.
3. Схемы и группы соединений трёхфазных трансформаторов.

1.7.2 Краткое содержание вопросов

1. Трёхфазные трансформаторы.

Для трансформирования трехфазного тока применяются или трехфазные трансформаторы, или «трехфазные группы», состоящие из трех однофазных трансформаторов.

Наибольшее распространение на практике получили трехфазные стержневые трансформаторы с расположением стержней в одной плоскости.

Сердечник одного из таких трансформаторов показан на рис. 2-28.

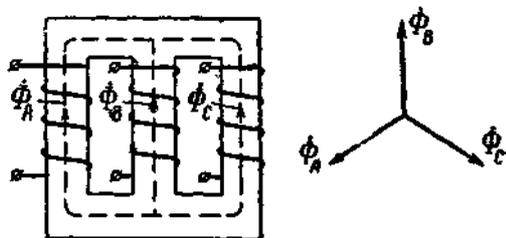


Рис. 2-28. Сердечник трехфазного стержневого трансформатора.

Здесь же указаны потоки (в соответствии с векторным уравнением потоков ($\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0$)), причем за положительное их направление условно принято направление снизу вверх. Очевидно, амплитуда потока в яме равна амплитуде потока в стержне.

Трёхфазная группа, состоящая из трех однофазных трансформаторов, представлена на рис. 2-29.

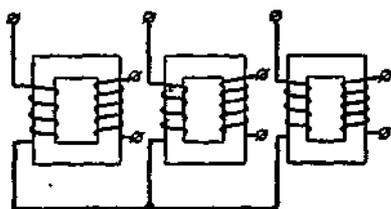


Рис. 2 29. Трёхфазная группа.

Одна из ее обмоток соединена в звезду, другая, как правило, соединяется в треугольник (§ 2-13).

На рис. 2-30,*а* представлен трехфазный броневого трансформатор.

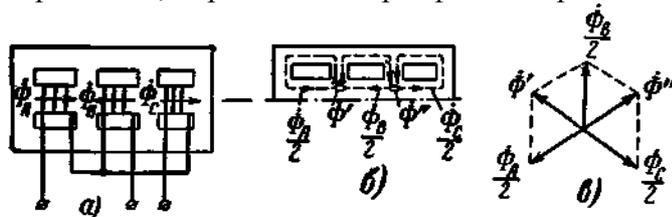


Рис. 2-30. Трёхфазный броневого трансформатор и распределение потоков в его сердечнике.

Обычно его стержни располагаются горизонтально с помещенными на них дисковыми чередующимися обмотками (рис. 2-8). Здесь различают продольные яма, расположенные параллельно стержням, и поперечные яма, расположенные перпендикулярно стержням. Продольные и поперечные яма выполняются обычно с сечением, равным примерно половине сечения стержня. В трехфазном броневого трансформаторе средняя фаза первичной и вторичной обмоток должна быть соединена в обратном порядке по сравнению с крайними фазами. На рис. 2-30,*а* показано соединение обмотки высшего напряжения в звезду. Здесь правый зажим средней фазы принят за начало фазы, а левый — за ее конец в противоположность тому, что принято для крайних фаз. Только в этом случае поток в промежуточных поперечных ямах равен полусумме потоков соседних стержней (рис. 2-30,*б* и *в*).

Неправильным будет соединение, при котором за начало и конец средней фазы приняты такие же зажимы, что и для крайних фаз, так как в этом случае в промежуточных поперечных ярах поток будет равен полуразности потоков в соседних стержнях, т. е. в $\sqrt{3}$ раз больше, чем в предыдущем случае.

2. Преобразование трёхфазного тока.

Преобразование трёхфазного 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 $10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ в фазе) в ряде случаев применяют группы из трех однофазных трансформаторов, которые имеют существенные преимущества при транспортировке и монтаже (мощные высоковольтные трехфазные трансформаторы нетранспортабельны).

Трёхфазная группа. На рис. 2.40 показано включение трех однофазных трансформаторов в трехфазную сеть. Первичные обмотки трансформаторов включены звездой и, следовательно, обмотка каждого трансформатора включена на фазное напряжение.

Если имеется нулевой провод, то работа трансформатора в трехфазной группе ничем не отличается от рассмотренной выше работы однофазного трансформатора. Поэтому в данном случае можно пользоваться векторной диаграммой и всеми уравнениями однофазного трансформатора.

При симметричной нагрузке необходимость в нулевом проводе отпадает; в этом случае также можно рассматривать работу только одной фазы, т. е. однофазный трансформатор;

Трёхстержневой трехфазный трансформатор. Для объяснения принципа действия трехстержневого трехфазного трансформатора представим его в виде трех однофазных трансформаторов (рис. 2.41, а), у которых катушки размещены на стержнях 1, 2 и 3, а ярма 4, 5 и 6 конструктивно объединены в одно общее ярмо. Через это ярмо проходит суммарный поток $\Phi_{рез} = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C$.

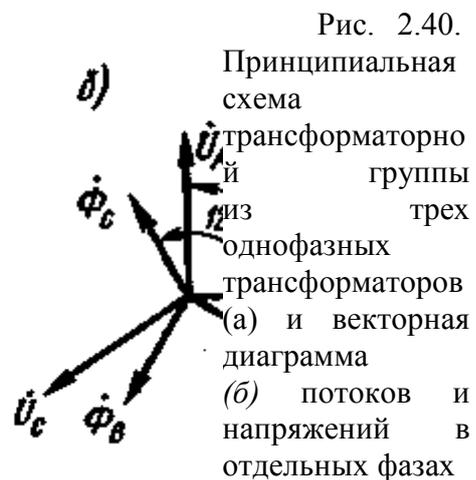
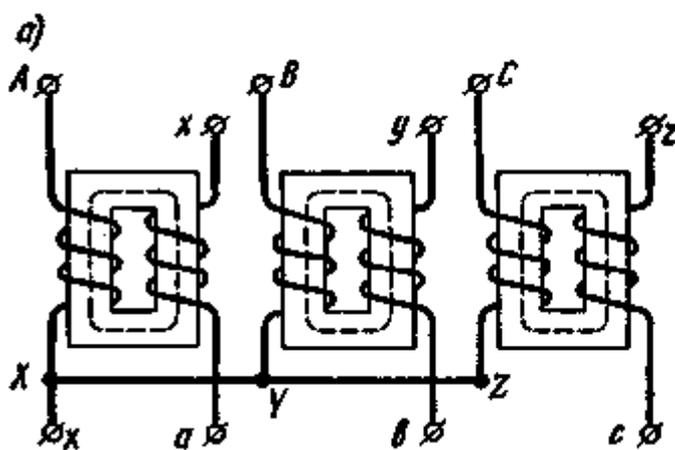


Рис. 2.40.

Принципиальная схема трансформаторной группы из трех однофазных трансформаторов (а) и векторная диаграмма (б) потоков и напряжений в отдельных фазах

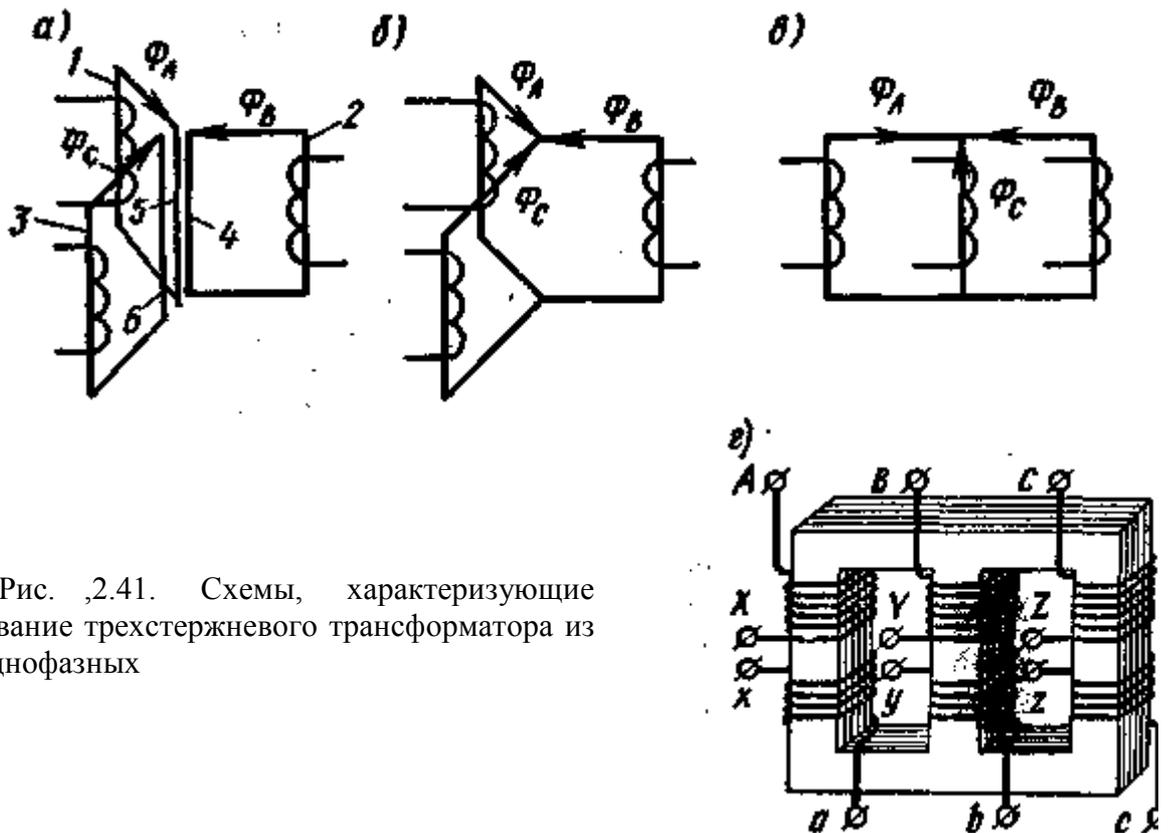


Рис. 2.41. Схемы, характеризующие образование трехстержневого трансформатора из трех однофазных

Однако если на первичные обмотки этих трансформаторов подать систему симметричных трехфазных напряжений (рис. 2.41, б), то сумма Φ_A , Φ_B и Φ_C в любой момент времени будет равна нулю. Следовательно, трехфазный трансформатор можно выполнить без объединенного яра для замыкания потоков отдельных фаз. Полученный таким образом симметричный трехстержневой трансформатор (рис. 2.41, в) можно сделать более компактным, несколько уменьшив длину магнитной цепи, по которой замыкается поток Φ_C , исключив из нее два яра (рис. 2.41, г). Возникшая при этом небольшая магнитная несимметрия контуров, по которым проходят потоки отдельных фаз, вызывает несимметрию токов холостого хода этих фаз. Однако, как показано выше, при нагрузке ток холостого хода оказывает весьма малое влияние на токи в первичной и вторичной обмотках. В результате получаем трехстержневой трансформатор (рис. 2.41, д), в котором первичная и вторичная обмотки каждой фазы расположены на общем стержне. При симметричном питающем напряжении и равномерной нагрузке (являющейся наиболее распространенной) все фазы трехфазного трансформатора находятся практически в одинаковых условиях. Поэтому выведенные выше формулы и схемы замещения для однофазного трансформатора справедливы и для трехфазного трансформатора. Однако в режиме холостого хода, на который большое влияние оказывает схема соединения обмоток, имеются особенности.

Схемы соединения обмоток. Первичная и вторичная обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены по схемам «звезда», «звезда с выведенной нулевой точкой», «треугольники» 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. Согласно ГОСТу схему соединения «звезда» обозначают знаком Y , русской буквой $У$ или латинской Y ; схему «треугольник» — знаком Δ , русской буквой $Д$ или греческой Δ ; схему «зигзаг» — латинской буквой Z . Если нулевая точка обмотки выведена из трансформатора, то у буквенного обозначения ставят индекс n . Начала и концы обмотки ВН обозначают A, B, C и X, Y, Z ; для обмотки НН — a, b, c и x, y, z ; вывод нулевой точки — O (для ВН) и o (для

НН). Схемы соединения обмоток силовых трансформаторов, применяемых в Советском Союзе, приведены в табл. 2.3./p>

Трехфазные трансформаторы характеризуются двумя коэффициентами трансформации:

а) фазным — равным отношению числа витков $w_{ВН}$

фазы обмотки $ВН$ к числу витков $w_{НН}$ фазы обмотки $НН$ или же отношению фазных напряжений этих обмоток в режиме холостого хода:

$$k_{\phi} = w_{ВН}/w_{НН} = U_{оф.вн}/U_{оф.нн} ;(2.59)$$

б) линейным — равным отношению линейного напряжения обмотки $ВН$ к линейному напряжению обмотки $НН$ в режиме холостого хода:

Таблица 2.3

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

$$k_{л} = U_{ол.вн}/U_{ол.нн}(2.60a)$$

Для схем Y/Y и D/D коэффициенты трансформации равны: $k_{л} = k_{\phi}$; для схемы Y/D линейный коэффициент $k_{л} = \sqrt{3}k_{\phi}$, а для схемы D/Y - $k_{л} = k_{\phi}/\sqrt{3}$.

При соединении обмотки трансформатора по схеме Z_n (рис. 2.42, а) каждая фаза состоит из двух одинаковых катушек, которые размещены на разных стержнях и соединены между собой встречно так, чтобы векторы индуцируемых в них ЭДС вычитались (рис. 2.42, б).

Схема Z_n неэкономична, так как при одном и том же фазном напряжении U_{ϕ} она требует большего расхода обмоточного провода, чем при схемах Y и D. Это объясняется тем, что в рассматриваемой схеме фазное напряжение U_{ϕ} в $\sqrt{3}$ раз больше напряжения U_K на каждой катушке, а при размещении двух катушек на одном стержне и их последовательном соединении $U_{\phi} = 2U_K$. Поэтому обычно схему Z_n не применяют; ее используют только в трансформаторах для вентиляльных преобразователей (см. § 2.23).

Особенности режима холостого хода. В § 2.6 показано, что в однофазном трансформаторе из-за насыщения магнитной цепи ток холостого хода при синусоидальном магнитном потоке оказывается несинусоидальным, т. е. возникает ряд высших гармонических:

$$i_0 \approx I_01m \sin \omega t + I_03m \sin 3\omega t + \dots$$

В трехфазном трансформаторе выражения для тока холостого хода в фазах имеют вид

$$i_{0A} = I_{01}m \sin \omega t + I_{03}m \sin 3\omega t + \dots;$$

$$i_{0B} = I_{01}m \sin (\omega t - 2\pi/3) + I_{03}m \sin 3 (\omega t - 2\pi/3) + \dots;$$

$$i_{0C} = I_{01}m \sin (\omega t - 4\pi/3) + I_{03}m \sin 3 (\omega t - 4\pi/3) + \dots$$

Заметим, что третьи гармонические токов во всех фазах совпадают по времени: $i_{03A} = i_{03B} = i_{03C} = I_{03}m \sin 3\omega t$. При некоторых схемах включения обмоток это оказывает влияние на форму кривой магнитного потока трансформатора, а следовательно, и на форму кривой ЭДС.

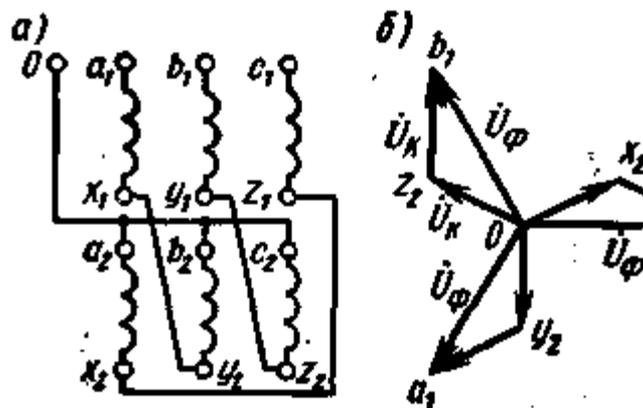


Рис. 2.42. Схема «зигзаг» и ее векторная диаграмма

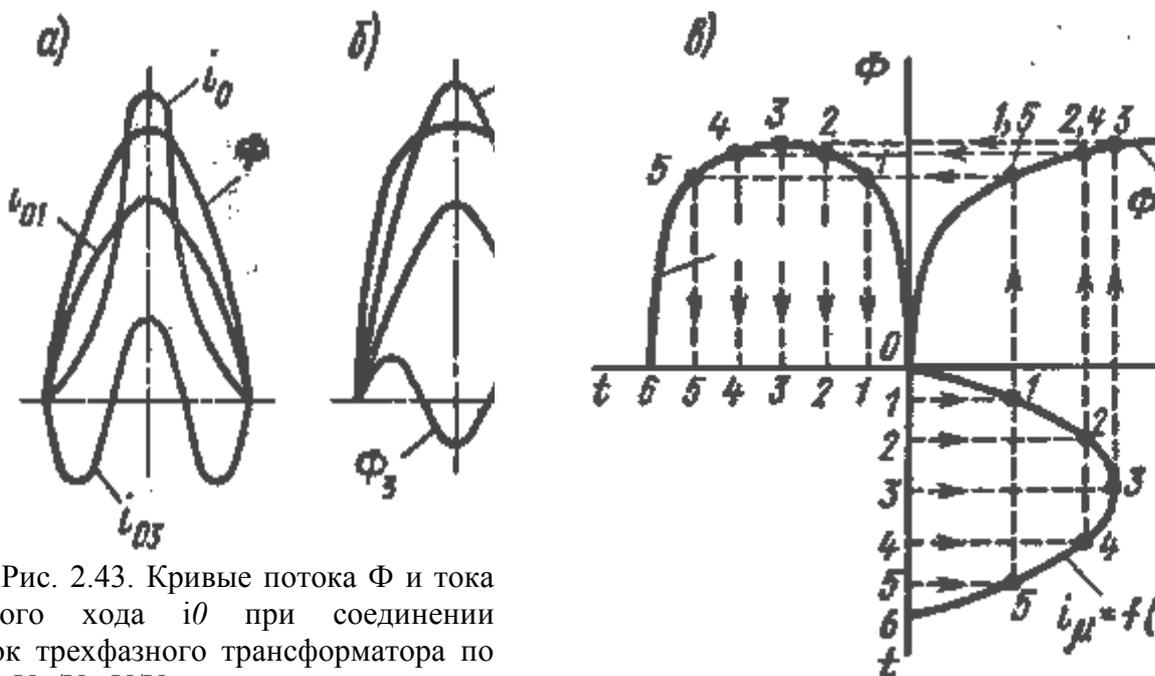


Рис. 2.43. Кривые потока Φ и тока холостого хода i_0 при соединении обмоток трехфазного трансформатора по схемам U_n/U и Y/Y

При соединении обмоток трансформатора по схеме U_n/U третьи гармонические фазных токов замыкаются по нулевому проводу. При этом ток холостого хода i_0 в каждой фазе содержит третью гармоническую i_{03} , а поток Φ является синусоидальным, как в однофазном трансформаторе (рис. 2.43, а).

При соединении обмоток по схеме Y/Y путь для замыкания третьих гармонических фазных токов отсутствует и ток холостого хода оказывается синусоидальным. В результате этого кривая магнитного потока Φ искажается (рис. 2.43, б) и приобретает плоскую форму; при этом поток содержит третью гармоническую Φ_3 . Несинусоидальными являются и ЭДС, индуцированные в фазах, — они имеют заостренную форму. Построение кривой изменения магнитного потока Φ при

синусоидальном изменении тока i_m выполняется так же (рис. 2.43, в), как и построение кривой $i_m = f(t)$ (см. рис. 2.28, б), но в обратном порядке. Следует, однако, отметить, что в трехстержневом трансформаторе возникающие третьи гармонические потоки фаз Φ_{A3} , Φ_{B3} , Φ_{C3} не могут замыкаться по стальному магнитопроводу, так как они аналогично третьим гармоническим токам совпадают по времени и, следовательно, в любой момент времени направлены по контуру магнитопровода встречно (рис. 2.44, а). Поэтому эти гармонические выходят из стержней и замыкаются от ярма к ярму через воздух, т. е. по пути, имеющему большое магнитное сопротивление. Вследствие этого третьи гармонические потоки малы и потоки фаз Φ_A , Φ_B и Φ_C в трехстержневом трансформаторе мало отличаются от синусоидальных.

Обычно амплитуды потоков фаз отличаются на 5—10% от амплитуд их первых гармонических, что вызывает соответствующее небольшое искажение формы кривой фазных ЭДС.

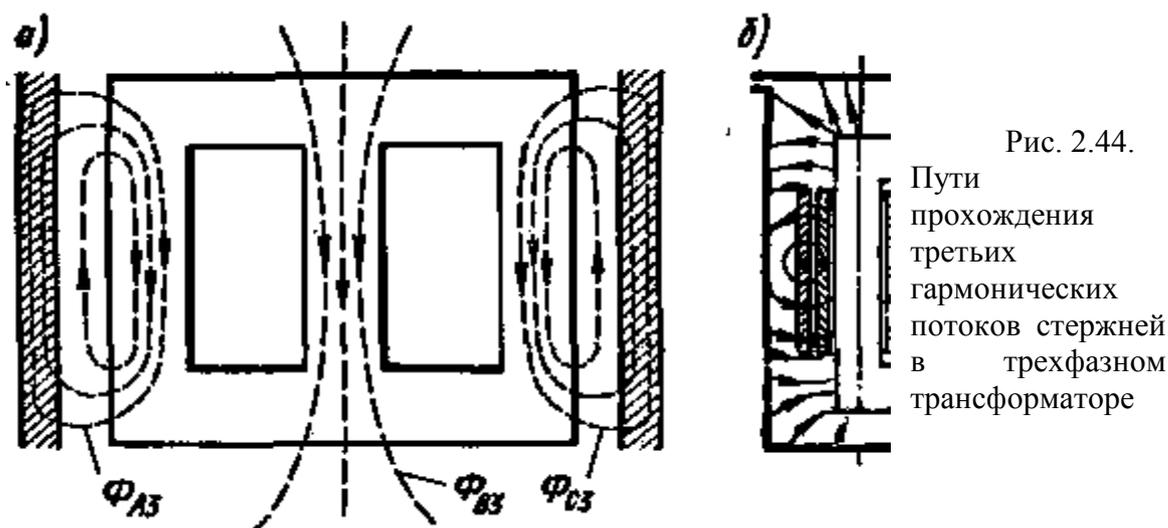


Рис. 2.44.

Пути
прохождения
третьих
гармонических
потоков стержней
в трехфазном
трансформаторе

Еще одним отрицательным последствием возникновения третьих гармонических потоков фаз является увеличение потерь мощности. Эти потоки в трехстержневом трансформаторе замыкаются главным образом по стенкам бака, стяжным болтам и другим металлическим конструктивным деталям, окружающим магнитопровод (рис. 2.44, б). При этом в них индуцируются вихревые токи, создающие дополнительные потери мощности и местный нагрев соответствующих деталей. Отметим, что дополнительные потери достигают значительной величины только в трансформаторах мощностью свыше 1000 кВ • А. В трансформаторах меньшей мощности их практически можно не учитывать.

В группах, состоящих из трех однофазных трансформаторов, третьи гармонические потоки фаз могут замыкаться по тому же пути, что и основная гармоническая, и вследствие этого достигают недопустимой величины. Поэтому для таких групп схему У/Уне применяют.

Если одна из обмоток трансформатора соединена треугольником, то фазные потоки трансформатора становятся практически синусоидальными. Это объясняется тем, что в обмотке, соединенной треугольником, совпадающие по времени третьи гармонические ЭДС вызывают ток тройной частоты I_{23} , который циркулирует по фазным обмоткам (рис. 2.45, а) и уменьшает третьи гармонические потоки. Упрощенно можно считать, что результирующий поток тройной частоты является суммой третьих гармонических потоков, создаваемых первичной и вторичной обмотками $\Phi_{рез3} = \Phi_{13} + \Phi_{23}$.

Как показывает векторная диаграмма (рис. 2.45, б), результирующий поток $\Phi_{рез3}$ незначителен, так как для токов тройной частоты обмотка, соединенная треугольником, является короткозамкнутой и даже небольшая ЭДС \dot{E}_{23} вызывает значительный ток \dot{I}_{23} .

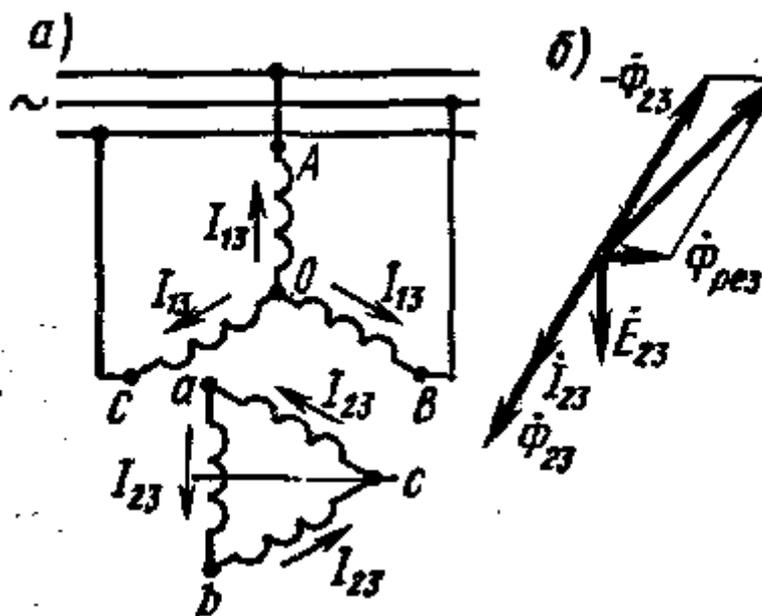


Рис. 2.45. Схема прохождения третьих гармонических тока по фазам трансформатора (а) и векторная диаграмма (б) созданных ими потоков и ЭДС

Таким образом, обмотки трехстержневых трансформаторов лучше всего соединять по схемам У/Д и Ун/Д, которые позволяют практически устранить третьи гармонические в кривых потока и в ЭДС. Силовые трансформаторы средней мощности при вторичных напряжениях не более 400 В можно соединять и по схемам У/У и Д/У, так как это позволяет получать от вторичной обмотки не только линейное напряжение 380 В, используемое в силовых цепях, но и фазное напряжение 220 В, требуемое для осветительных установок.

3. Схемы и группы соединений трёхфазных трансформаторов.

Обратимся к однофазному трансформатору, обмотки которого показаны на рис. 2-31.



Рис. 2-31. Обозначения зажимов обмоток однофазного трансформатора.

Согласно ГОСТ зажимы обмоток обозначаются так, как указано на этом рисунке. Начало и конец обмотки высшего напряжения обозначаются соответственно прописными буквами А и Х. Для обмотки низшего напряжения берутся строчные буквы: а — начало и х — конец обмотки.

Зажимы обмоток трехфазных трансформаторов обозначаются, как указано на рис. 2-32.

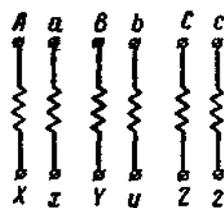


Рис. 2-32. Обозначения зажимов обмоток трех фазного трансформатора.

Зная обозначения зажимов обмоток, мы можем правильно соединить обмотки трехфазного трансформатора и трехфазной группы в звезду или треугольник. Их необходимо также знать при включении трансформаторов на параллельную работу.

Соединение обмотки, например, высшего напряжения в звезду показано на рис. 2-33.

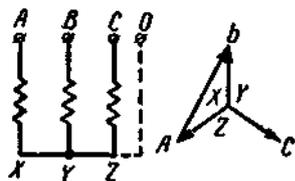


Рис. 2-33. Соединение обмотки в звезду.

Напомним, что в этом случае линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазного, а линейный ток равен фазному.

На рис. 2-34 показано соединение обмотки в треугольник.

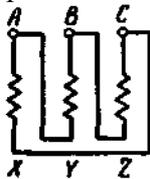


Рис. 2-34. Соединение обмотки в треугольник.

Здесь линейное напряжение равно фазному, а линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше фазного.

Соединение обмоток в звезду и звезду обозначают Y/Y и называют "звезда — звезда" или "игрек — игрек". Соединение обмоток в звезду и треугольник обозначают Y/Δ и называют "звезда — треугольник" или "игрек — дельта". Если от обмотки, соединенной в звезду, выводится нулевая точка, то такое соединение обозначают Y₀ и называют «звезда с нулем» или «игрек нулевое».

Следует иметь в виду, что отношение линейных напряжений $U_{л1}$ и $U_{л2}$ трансформатора зависит не только от чисел витков обмоток w_1 и w_2 (на фазу), но и от способов их соединения:

$$\begin{aligned} \text{при Y/Y} \quad & \frac{U_{л1}}{U_{л2}} = \frac{w_1}{w_2}; \\ \text{при Y/Δ} \quad & \frac{U_{л1}}{U_{л2}} = \frac{\sqrt{3}w_1}{w_2}; \\ \text{при Δ/Y} \quad & \frac{U_{л1}}{U_{л2}} = \frac{w_1}{\sqrt{3}w_2}. \end{aligned}$$

2-11. Группы соединений

В зависимости от сдвига по фазе между линейными первичной и вторичной э.д.с. на одноименных зажимах трансформаторы разделяются на группы соединений, причем каждую группу составляют трансформаторы с одинаковым сдвигом по фазе между указанными э.д.с.

Для обозначения группы соединений выбирается ряд целых чисел от 1 до 12; здесь условно принято, что единица соответствует 30° по аналогии с углами между минутной и часовой стрелками часов в 1, 2, ..., 12 ч. При определении группы соединений с вектором э.д.с. обмотки высшего напряжения нужно совместить минутную стрелку, а с вектором э.д.с. обмотки низшего напряжения — часовую стрелку. Отсчет угла производится от минутной стрелки к часовой по направлению их вращения.

Обратимся к однофазному трансформатору, обмотки которого представлены на рис. 2-35.

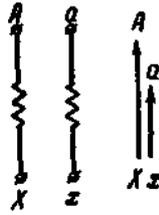


Рис. 2-35. Однофазный трансформатор 1/1-12.

Если они выполнены при одинаковом направлении намотки (например, по часовой стрелке, если смотреть от A к X и от a к x), то наведенные в них э.д.с. изобразятся векторами, направленными в одну и ту же сторону (рис. 2-35). Такой трансформатор принадлежит к группе соединений, обозначаемой числом 12. Его условное обозначение: 1/1-12.

Если тот же трансформатор будет иметь обмотку, например, низшего напряжения, у которой будут переставлены обозначения зажимов по сравнению с предыдущим случаем, то сдвиг между э.д.с. будет равен 180° (рис. 2-36).

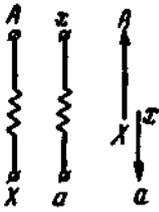


Рис. 2-36. Однофазный трансформатор 1/1-6.

Такой трансформатор принадлежит к группе соединений, обозначаемой числом 6. Обратимся к трехфазному трансформатору, представленному на рис. 2-37.

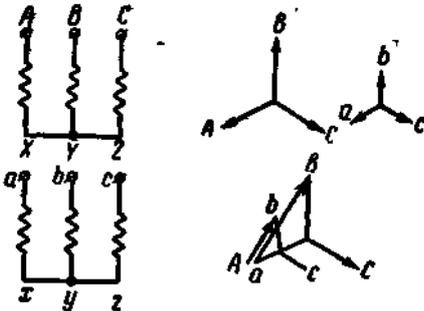


Рис. 2-37. Трехфазный трансформатор Y/Y-12.

Здесь обе обмотки соединены в звезду и намотаны в одинаковом направлении от начал к концам фаз. Векторные диаграммы э.д.с. показывают, что сдвиг между линейными э.д.с. AB и ab в данном случае равен 0° . В этом мы убеждаемся, совместив при наложении диаграмм точки A и a . Следовательно, рассматриваемый трансформатор принадлежит к группе 12. Его полное обозначение: Y/Y-12.

Если у трехфазного трансформатора группы 12 поменять местами начала и концы фаз, например обмотки низшего напряжения, то получается трансформатор группы 6 (рис. 2-38). Его обозначают: Y/Y-6.

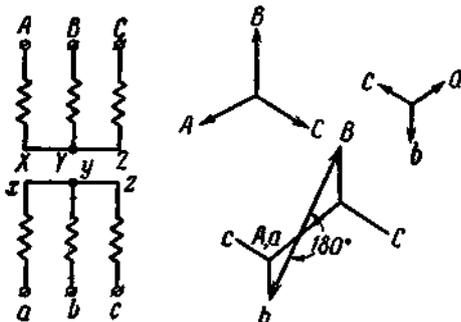


Рис. 2-38. Трехфазный трансформатор Y/Y-6.

Трехфазные трансформаторы с соединением обмоток Y/Y принадлежат к группам 6 и 12, если на каждом стержне сердечника помещены одноименные фазы. Если же у одной из обмоток сделать круговое перемещение обозначений зажимов, например вместо $a-b-c$ сделать $c-a-b$ и затем $b-c-a$, то при каждом перемещении будем поворачивать звезду вторичных э. д. с. на 120° и, следовательно, переходить от группы 12 к группам 4 и 8, а от группы b — к группам 10 и 2. Таким образом, при соединении обмоток Y/Y можем получить все четные группы соединений 2, 4, 6, 8, 10, 12.

Обратимся к трехфазному трансформатору с соединением обмоток Y/Δ представленному на рис. 2-39.

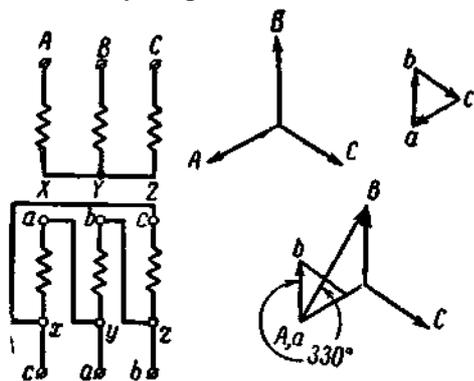


Рис. 2-39. Трехфазный трансформатор Y/Δ -5.

Векторные диаграммы э.д.с., приведенные на этом же рисунке, показывают, что сдвиг между линейными э.д.с. здесь равен 330° . Следовательно, трансформатор принадлежит к группе 11. Он обозначается: Y/Δ -11.

Если у рассмотренного трансформатора (рис. 2-39) поменять местами начала и концы фаз обмотки низшего напряжения, то получается трансформатор группы 5 (рис. 2-40) со сдвигом между линейными э.д.с., равным 150° . Такой трансформатор обозначается Y/Δ -5.

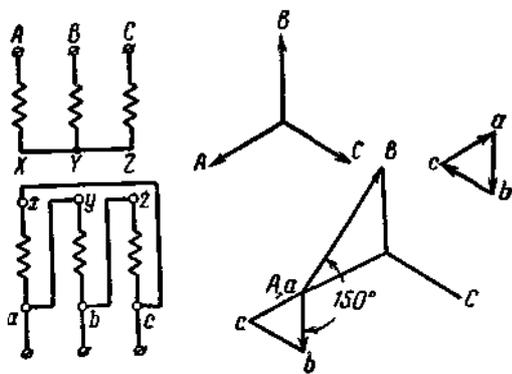


Рис. 2-40. Трехфазный трансформатор Y/Δ -5.

Если сделать круговое перемещение обозначений зажимов для обмотки низшего напряжения трансформаторов, представленных на рис. 2-39 и 2-40, то перейдем соответственно от группы 11 к группам 3 и 7 и от группы 5 к группам 9 и 1. Следовательно, при соединении обмоток Y/Δ (или Δ/Y) можем получить все нечетные группы 1, 3, 5, 7, 9, 11.

Такое большое разнообразие групп соединений трансформаторов не только не требуется, но вызывало бы большие затруднения на практике, например при осуществлении параллельной работы трансформаторов (§ 2-17).

В СССР стандартизованы только две группы соединений: 12 и 11. Все выпускаемые советскими заводами нормальные однофазные трансформаторы и трехфазные с соединением обмоток Y/Y принадлежат к группе 12, а трехфазные трансформаторы с соединением обмоток Y/Δ — к группе 11.

1.8 Лекция №8 (2 часа).

Тема: «Режимы работы трёхфазных трансформаторов»

1.8.1 Вопросы лекции:

1. Регулирование вторичного напряжения трансформаторов.
2. Параллельная работа трансформаторов.

1.8.2 Краткое содержание вопросов

1. Регулирование вторичного напряжения трансформаторов.

Принципы регулирования. При эксплуатации трансформаторов довольно часто возникает необходимость регулирования вторичного напряжения. При этом различают два основных случая:

1) стабилизация вторичного напряжения при незначительном (на 5 — 10%) изменении первичного напряжения, что происходит обычно из-за падения напряжения в линии;

2) регулирование вторичного напряжения (из-за особенностей технологического процесса) в широких пределах при неизменном (или мало изменяющемся) первичном напряжении.

В обоих случаях вторичное напряжение регулируется путем изменения коэффициента трансформации, т. е. соотношения между числами витков первичной и вторичной обмоток.

В первом случае при небольших изменениях первичного напряжения можно изменять число витков либо первичной, либо вторичной обмотки. Например, при снижении первичного напряжения соответственно уменьшают число витков первичной обмотки так, чтобы ЭДС витка осталась неизменной. Поскольку число витков вторичной обмотки не изменяется, неизменной останется и ЭДС вторичной обмотки. При возрастании первичного напряжения соответственно увеличивают число витков первичной обмотки.

Во втором случае, когда требуется регулировать вторичное напряжение при неизменном первичном, изменяют число витков вторичной обмотки. Изменять число витков первичной обмотки в этом случае нельзя, так как это приведет к изменению магнитного потока трансформатора и, как следствие, к его перегреву или плохому использованию. Кроме того, очевидно, что получить малое выходное напряжение $U_2 = U_1 w_2 / w_1$ при неизменном числе витков вторичной обмотки практически невозможно, так как при этом необходимо иметь большое число регулировочных витков*.

Переключение ответвлений обмоток w_1 и w_2 может осуществляться при отключении трансформатора от первичной и вторичной сетей (переключение без возбуждения) или под нагрузкой (регулирование под нагрузкой). Существуют также трансформаторы с плавным регулированием напряжения, в которых плавно изменяют число витков w_2 или магнитный поток Φ_2 , охватываемый этой обмоткой.

* При очень больших мощностях иногда применяют регулирование по высоковольтной первичной стороне (чтобы избежать применения регулирующей аппаратуры на большие токи), используя специальные автотрансформаторные схемы.

Переключение ответвлений без возбуждения. Регулирование напряжения этим способом применяют в масляных и сухих силовых трансформаторах общепромышленного назначения, а также в трансформаторах, предназначенных для вентильных преобразователей. Напряжение регулируют на $\pm 5\%$ от $U_{ном}$ ступенями по 2,5 %, т. е. трансформатор имеет пять ступеней регулирования напряжения. В трансформаторах сравнительно небольшой мощности используют три ступени регулирования напряжения (

+ 5; 0; —5%). В силовых трансформаторах большой мощности обычно напряжение регулируют на стороне ВН. Это позволяет упростить конструкцию переключателя ответвлений, так как токи в обмотке ВН меньше, чем в обмотке НН. Кроме того, число витков обмотки ВН больше, чем обмотки НН, вследствие чего изменение числа витков на 1,25 — 2,5 % можно осуществлять с большей точностью. В трансформаторах, предназначенных для вентильных преобразователей, часто напряжение регулируют на стороне НН; при этом переключающую аппаратуру выполняют на большие токи, что сильно усложняет ее конструкцию.

При регулировании напряжения отключают часть витков только одной (первичной или вторичной) обмотки, что нарушает равномерность распределения МДС по высоте обмотки. Это приводит к искажению магнитного поля рассеяния и возникновению поперечной составляющей потока рассеяния, которая, взаимодействуя с током обмоток, создает электромагнитные силы, действующие на обмотку в осевом направлении (см. § 2.19). При аварийных режимах (короткое замыкание) эти силы могут достигать больших значений и вызывать разрушение обмотки. Поэтому стремятся равномерно распределить отключаемые витки обмотки по высоте или расположить их по возможности в середине высоты обмотки симметрично относительно обоих ярм. В трехфазных трансформаторах сравнительно небольшой мощности, где электромагнитные силы при коротких замыканиях невелики, для упрощения конструкции переключателя ответвлений целесообразно выполнять ответвления вблизи заземленной нулевой точки обмотки, так как при этом уменьшается напряжение, на которое должна быть рассчитана изоляция переключателя. Если ответвления располагать в средней части обмотки (в мощных трансформаторах), то переключающую аппаратуру необходимо выполнять с усиленной изоляцией и с высокой степенью точности, так как несогласованность работы ее элементов при высоком напряжении может привести к серьезным авариям.

В трансформаторах с многослойной цилиндрической обмоткой отключаемые витки обычно размещают в конце обмотки во внешнем ее слое и располагают симметрично по высоте относительно обоих ярм. При переходе с одного ответвления $X1 - X5$ на другое (рис. 2.56, *а*) отключается равное число витков. В обмотках других конструкций ответвления $A2 - A7$ располагают в средней части обмотки (рис. 2.56, *б*). При номинальном напряжении обмотки ВН до 35 кВ часто применяют оборотную схему (рис. 2.56, *в*), которая позволяет расположить ответвления $X1 - X5$ около нулевой точки и в то же время в середине обмотки (по высоте). При оборотной схеме одна половина обмотки имеет правую, а другая — левую намотку.

В масляных трансформаторах переключение ответвлений осуществляют контактным переключателем, встроенным в трансформатор, рукоятка которого выведена из бака. В сухих трансформаторах ответвления выводят на контактную панель и переключение производят путем перестановки контактной пластины на различные выводные шпильки.

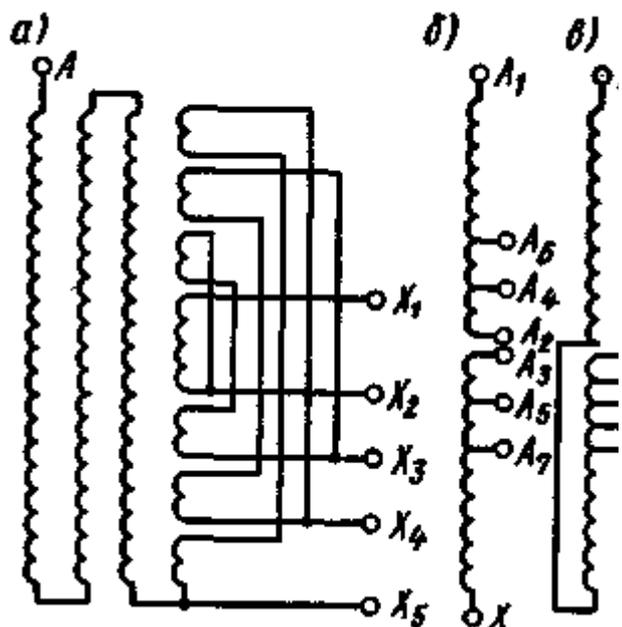
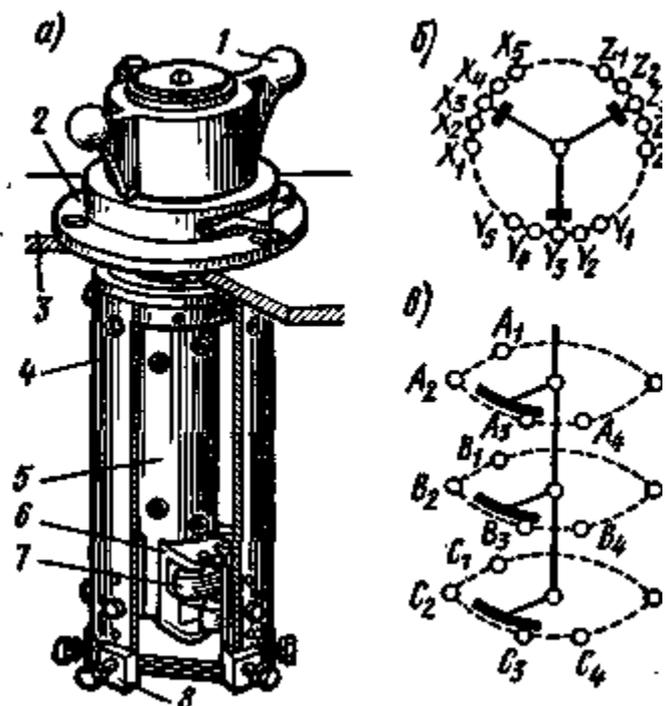


Рис. 2.56. Расположение регулировочных ответвлений в силовых трансформаторах: а — в многослойных цилиндрических обмотках; б — в средней части обмоток (прямая схема); в — в средней части обмотки (оборотная схема)

Рис. 2.57. Трехфазный переключатель ответвлений (а) и схемы расположения его контактных элементов (б, в): 1 — привод, 2 — фланец колпака; 3 — крышка бака трансформатора; 4 — бумажно-бакелитовый цилиндр; 5 — бумажнобакелитовая изоляция вала; б — коленчатый вал; 7 — подвижные контакты; 8 — неподвижные контакты



Контактный переключатель (рис. 2.57, а) имеет систему неподвижных контактов, соединенных с ответвлениями обмотки, и систему подвижных контактов, замыкающихся с неподвижными и обеспечивающих требуемую схему соединения между собой обмоток отдельных фаз. При выполнении ответвлений $X_1 — X_5$, $Y_1 — Y_5$ и $Z_1 — Z_5$ у нулевой точки можно применить общий переключатель для всех трех фаз (рис. 2.57, б), так как рабочее напряжение между отдельными частями переключателя не превышает 10% от линейного напряжения трансформатора. Если ответвления $A_1 — A_5$; $B_1 — B_5$; $C_1 — C_5$ расположены в середине обмотки (см. рис. 2.56, б), то каждая фаза должна иметь переключатель (рис. 2.57, в), так как между ответвлениями разных фаз действует напряжение, равное приблизительно $0,5U_{ном}$.

Переключение ответвлений под нагрузкой. Для повышения гибкости и удобства управления крупными электрическими сетями и системами большое значение имеет

возможность регулирования напряжения трансформаторов без перерыва нагрузки. Потребность в таких трансформаторах быстро возрастает. В соответствии с этим промышленность выпускает трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой для всех мощностей от 63 до 200000 кВ · А с пределами регулирования $\pm(10 \div 16)\%$.

При использовании этого способа регулирования необходимо:

- 1) обеспечить переход с одного ответвления на другое без разрыва тока, для чего в некоторый момент времени должны быть включены два соседних ответвления;
- 2) ограничить ток короткого замыкания (ток к. з.) в части обмотки трансформатора, расположенной между этими ответвлениями при одновременном их включении.

Для этого применяют переключающие устройства с дистанционным управлением и с токоограничивающими реакторами и резисторами, а в трансформаторах, предназначенных для вентильных преобразователей, — устройства с вентильным переходом.

На рис. 2.58 приведена схема переключающего устройства с токоограничивающим реактором в трех положениях его переключающих элементов. Устройство состоит из реактора P , двух контакторов $K1$ и $K2$, предназначенных для разрыва тока, проходящего по двум параллельным ветвям реактора, и двух переключателей $\Pi1$ и $\Pi2$, осуществляющих переключения этих ветвей при отсутствии тока.

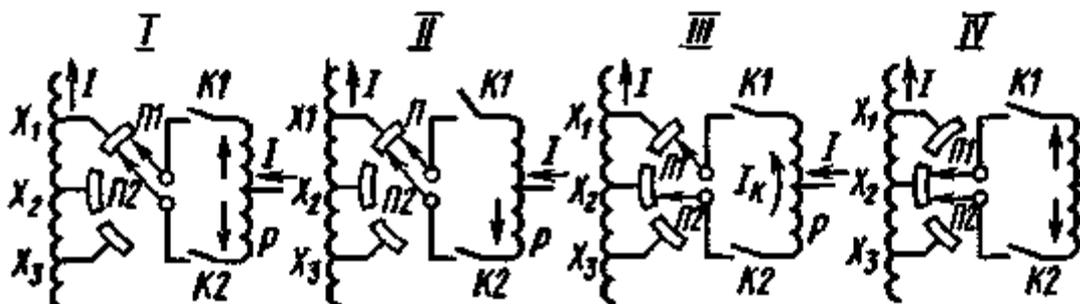


Рис. 2.58. Схемы переключающего устройства с токоограничивающим реактором

Переключающее устройство действует следующим образом. В *первом рабочем положении I*, когда переключающее устройство подключено к ответвлению $X1$, контакторы $K1$ и $K2$ замкнуты и ток проходит по параллельным ветвям реактора в разных направлениях, не намагничивая его. Поэтому индуктивное сопротивление реактора весьма мало. При переходе с ответвления $X1$ на ответвление $X2$ сначала отключается контактор $K1$, но цепь тока не прерывается, так как он продолжает проходить через контактор $K2$ (промежуточное положение II). Затем переключатель $\Pi2$ без тока переводится на ответвление $X2$, после чего вновь включается контактор $K1$ {промежуточное положение III}. В этом положении через обе половины реактора проходит ток одного направления, его индуктивное сопротивление резко возрастает и он эффективно ограничивает ток I_k в замкнутом контуре, образованном частью обмотки трансформатора, которая расположена между ответвлениями $X1$ и $X2$. После этого размыкается контактор $K2$, переключатель $\Pi1$ переводится без тока на ответвление $X2$ и снова замыкается контактор $K2$, т. е. на этом заканчивается переход во *второе рабочее положение IV*, при котором переключающее устройство подключено к ответвлению $X2$.

Реактор и переключатели помещают внутри масляного бака трансформатора, а контакторы — в специальном баке (рис. 2.59), расположенном на боковой стенке основного бака. Находящееся в нем масло, которое загрязняется при разрыве контакторами тока, не соединяется с маслом основного бака.

В переключающем устройстве с токоограничивающими резисторами (рис. 2.60, а) имеются три переключателя — $\Pi1$, $\Pi2$ и $\Pi3$. При работе трансформатора на ответвлении $X2$ переключатели $\Pi2$ и $\Pi3$ занимают показанное на рисунке 2.60 положение. Чтобы

перейти на соседнее ответвление $X1$, сначала на это ответвление следует провести без тока переключатель $П1$. Затем быстродействующий переключатель $П3$ быстро перебрасывается по часовой стрелке в положение, при котором он замыкает контакты 1 и 2 . Процесс размыкания контактов $3,4$ из замыкания контактов $1, 2$ происходит таким образом, что цепь тока не прерывается, а в промежуточном положении, когда переключатель $П3$ замыкает одновременно контакты 1 и 4 , ток в части обмотки трансформатора, расположенной между ответвлениями $X1$ и $X2$, ограничивается резисторами $R1$ и $R2$. Во избежание перегрева этих резисторов переключатель $П3$ переводится из одного рабочего положения в другое в течение сотых долей секунды.

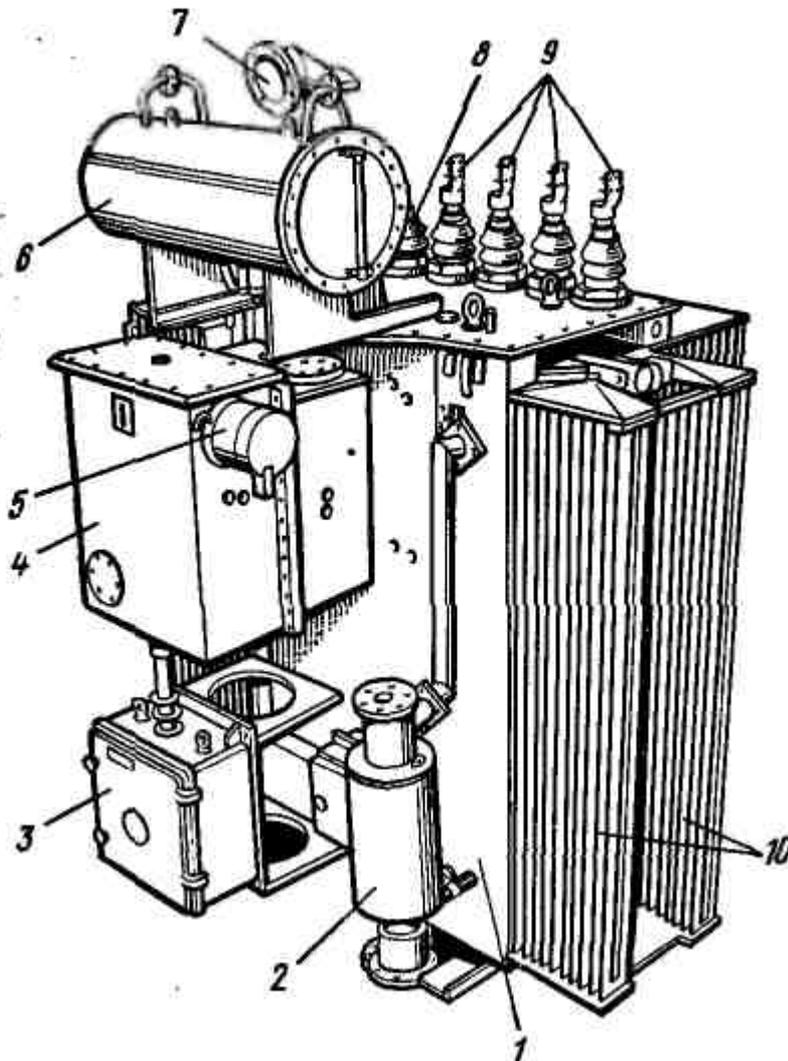
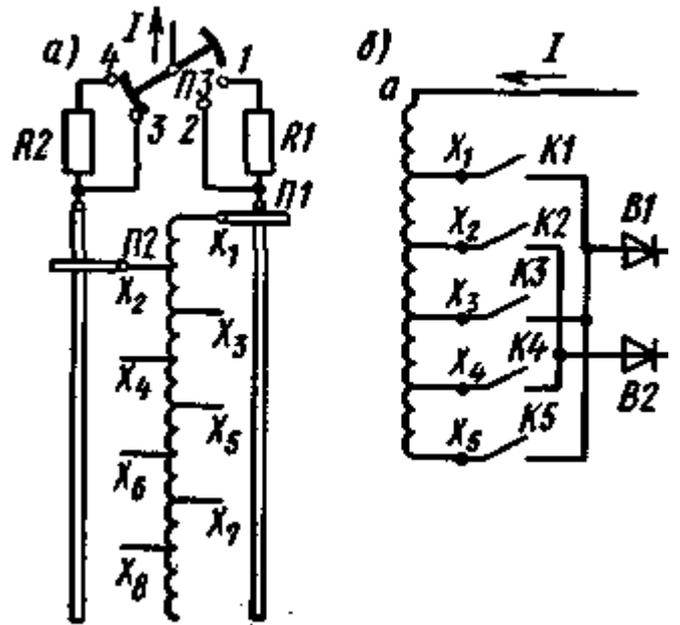


Рис. 2.59.
Трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой:
1 — бак; 2 — термосифонный фильтр; 3 — приводной механизм; 4 — бак с контакторами; 5 — муфта; 6 — расширитель; 7 — выхлопная труба; 8 — вводы НН; 9 — вводы ВН; 10 — радиаторы

Рис. 2.60. Схемы переключающего устройства с токоограничивающими активными сопротивлениями (а) и с вентильным переходом (б)



При питании от трансформатора преобразовательных устройств для переключения ответвлений на вторичной обмотке к которой подключаются вентили преобразователя, широко используют схему вентильного перехода (рис. 2.60, б). В этой схеме последовательно с нечетными контакторами $K1$ — $K5$ включен вентиль $B1$, а последовательно с четными контакторами $K2$ — $K4$ — вентиль $B2$. При переходе, например, с ответвления $X1$ на $X2$ они позволяют осуществлять замыкание контактора $K2$ до отключения $K1$, так как вентили $B1$ и $B2$ предотвращают возникновение тока к. з. в части обмотки между $X1$ и $X2$ при одновременном включении обоих контакторов. В дальнейшем контактор $K1$ может быть отключен, так как цепь тока будет замкнута через контактор $K2$.

2. Параллельная работа трансформаторов.

Параллельное соединение трансформаторов необходимо для обеспечения бесперебойного энергоснабжения при выключении трансформаторов для ремонта. Далее оно целесообразно в тех случаях, когда мощность нагрузки сильно изменяется в течение суток; тогда можно в зависимости от общей нагрузки оставлять в работе столько трансформаторов, чтобы потери в них были наименьшими. При расширении подстанций, а также на мощных подстанциях устанавливается несколько трансформаторов, которые включаются на параллельную работу. При такой работе обмотки трансформаторов с первичной и вторичной стороны присоединяются к общим шинам, как показано на рис. 2-56.

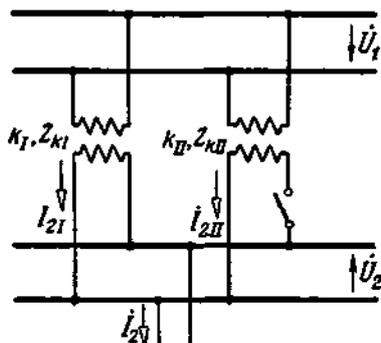


Рис. 2-56. Схема включения на параллельную работу трансформаторов. Здесь обмотки высшего напряжения служат в качестве первичных.

На параллельную работу трансформаторы могут быть включены только при соблюдении определенных условий. Эти условия практически сводятся к следующим:

1. равенство номинальных напряжений — первичных и вторичных (равенство коэффициентов трансформации);
2. трансформаторы должны принадлежать к одной и той же группе соединений;
3. равенство номинальных напряжений короткого замыкания.

При соблюдении первых двух условий напряжение между жазимами рубильника (рис. 2-56) до его замыкания равно нулю. В этом случае после включения рубильника никакого уравнивающего тока в обмотках трансформаторов не получится.

Можно допустить различие в коэффициентах трансформации трансформаторов, включаемых на параллельную работу, не больше 0,5% от их среднего значения.

Недопустимо включение на параллельную работу трансформаторов, принадлежащих к разным группам соединений, так как результирующая э.д.с. в контуре вторичных обмоток вызовет при этом большой ток, который быстро приведет к чрезмерному нагреванию обмоток трансформаторов.

Соблюдение третьего условия необходимо для того, чтобы общая нагрузка распределялась пропорционально номинальным мощностям параллельно работающим трансформаторов.

Пренебрегая токами холостого хода, можем написать следующие уравнения напряжений:

$$-\dot{U}_2 = k_I \dot{U}_1 - \dot{I}_{2I} Z_{кI}; \quad (2-132)$$

$$-\dot{U}_2 = k_{II} \dot{U}_1 - \dot{I}_{2II} Z_{кII}, \quad (2-133)$$

где $k_I = \frac{w_{2I}}{w_{1I}}$ и $k_{II} = \frac{w_{2II}}{w_{1II}}$ — коэффициенты трансформации;

$$Z_{кI} = (r'_{II} + r_{2I}) + j(x'_{II} + x_{2I}) \quad \text{и} \quad Z_{кII} = (r'_{III} + r_{2II}) + j(x'_{III} + x_{2II})$$

— сопротивления короткого замыкания со стороны вторичных обмоток.

Так как $I_2 = I_{2I} + I_{2II}$, то вместо (2-132) и (2-133) можно написать:

$$-\dot{U}_2 = k_{II} \dot{U}_1 - \dot{I}_2 Z_{кII} + \dot{I}_{2I} Z_{кII}; \quad (2-132a)$$

$$-\dot{U}_2 = k_I \dot{U}_1 - \dot{I}_2 Z_{кI} + \dot{I}_{2II} Z_{кI}, \quad (2-133a)$$

Решая (2-132) и (2-132a) в отношении I_{2I} , а (2-133) и (2-133a) в отношении I_{2II} , получим:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{2I} &= \frac{(k_I - k_{II}) \dot{U}_1}{Z_{кI} + Z_{кII}} + \dot{I}_2 \frac{Z_{кII}}{Z_{кI} + Z_{кII}}; \\ \dot{I}_{2II} &= -\frac{(k_I - k_{II}) \dot{U}_1}{Z_{кI} + Z_{кII}} + \dot{I}_2 \frac{Z_{кI}}{Z_{кI} + Z_{кII}}. \end{aligned} \quad (2-134)$$

Полученные равенства показывают, что ток каждого трансформатора состоит из уравнивающего тока, обусловленного различием коэффициентов трансформации, и тока нагрузки. Очевидно, что уравнивающий ток будет меть место и при отсутствии нагрузки (при $I_2 = 0$).

Из (2-134) также видно, что при $k_I = k_{II}$ токи распределяются обратно пропорционально сопротивлениям короткого замыкания. В этом случае мы можем написать в соответствии со схемой, представленной на рис. 2-57,

$$\frac{\dot{I}_I}{\dot{I}_{II}} = \frac{Z_{кII}}{Z_{кI}} = \frac{z_{кII} e^{j\varphi_{кII}}}{z_{кI} e^{j\varphi_{кI}}} = \frac{z_{кII}}{z_{кI}} e^{j(\varphi_{кII} - \varphi_{кI})}.$$

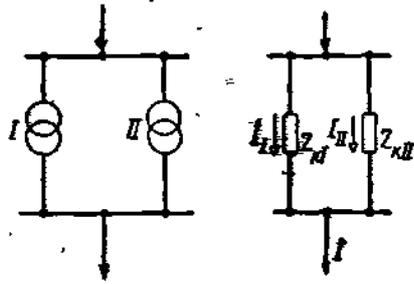


Рис. 2-57. Схема для определения токов параллельно работающих трансформаторов.

Значение разности углов ($\varphi_{кII} - \varphi_{кI}$) в обычных случаях (если мощности параллельно работающих трансформаторов не сильно отличаются одна от другой) близко к нулю.

Переходя от отношения комплексов к отношению их модулей, имеем:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{z_{кII}}{z_{кI}}$$

$$\frac{I_{IIн}}{I_{In}} \times \frac{U_n}{U_n} \quad \text{и левую часть, кроме того, на} \quad \frac{U_n}{U_n}$$

Если обе части равенства умножить на $\frac{I_{IIн}}{I_{In}} \times \frac{U_n}{U_n}$ и левую часть, кроме того, на $\frac{U_n}{U_n}$,

$$\frac{S_I}{S_{In}} : \frac{S_{II}}{S_{IIн}} = \frac{u_{кII}}{u_{кI}} = \frac{1}{u_{кI}} : \frac{1}{u_{кII}}$$

то получим:

Из полученного соотношения следует, что мощности параллельно работающих трансформаторов, выраженные в долях их номинальных мощностей, относятся друг к другу, как обратные значения номинальных напряжений короткого замыкания. Если $u_{кI} \neq u_{кII}$, то относительная нагрузка будет больше у того трансформатора, у которого $u_{кI}$ меньше. Практически допускается различие между номинальными напряжениями короткого замыкания трансформаторов, включаемых на параллельную работу, в $\pm 10\%$ от их среднего значения.

Приведенные выводы могут быть распространены на любое число параллельно работающих трансформаторов.

При включении на параллельную работу трехобмоточных трансформаторов необходимо соблюдение указанных условий для соответствующих пар обмоток обоих трансформаторов и, кроме того, необходимо, чтобы оба трансформатора имели одинаковое расположение вторичных обмоток относительно первичной. При включении двухобмоточного трансформатора на параллельную работу с трехобмоточным должны быть соблюдены те же условия для двухобмоточного трансформатора и соответствующих двух обмоток трехобмоточного трансформатора и, кроме того, последний должен иметь двустороннее расположение вторичных обмоток относительно первичной

1.9 Лекция №9 (2 часа).

Тема: «Переходные режимы трансформаторов»

1.9.1 Вопросы лекции:

1. Переходные процессы в трансформаторах.
2. Внезапное трёхфазное короткое замыкание на выводах вторичной обмотки.
3. Включение ненагруженного трансформатора в сеть.

1.9.2 Краткое содержание вопросов

1. Переходные процессы в трансформаторах.

Возникновение переходных процессов. При изменении режима работы трансформатора — преднамеренном или случайном — происходит переход от одного установившегося состояния к другому. Обычно этот переходной процесс длится

небольшое время (доли секунды), однако он может сопровождаться весьма опасными для трансформатора явлениями. Поэтому при проектировании и эксплуатации трансформаторов нужно учитывать их свойства в переходных режимах. Рассмотрим, как протекают наиболее типичные переходные процессы, имеющие место при коротком замыкании трансформатора и подключении его к сети. Короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки. Аварийный режим короткого замыкания возникает при повреждении электрической сети, неисправностях аппаратов и других устройств во вторичной цепи, ошибочных действиях обслуживающего персонала и пр.

Большие токи, возникающие в трансформаторе при коротком замыкании, могут вызвать механическое повреждение обмотки (а затем и пробой изоляции) или резкое повышение ее температуры, что угрожает целостности изоляции. Силу тока при коротком замыкании можно найти по упрощенной схеме замещения трансформатора (рис. 2.62, а). Положив для простоты, что напряжение сети не зависит от тока трансформатора, для указанной схемы получим уравнение

$$L_k di_k/dt + R_k i_k = U_1 m \sin(\omega t + \alpha_0), \quad (2.85)$$

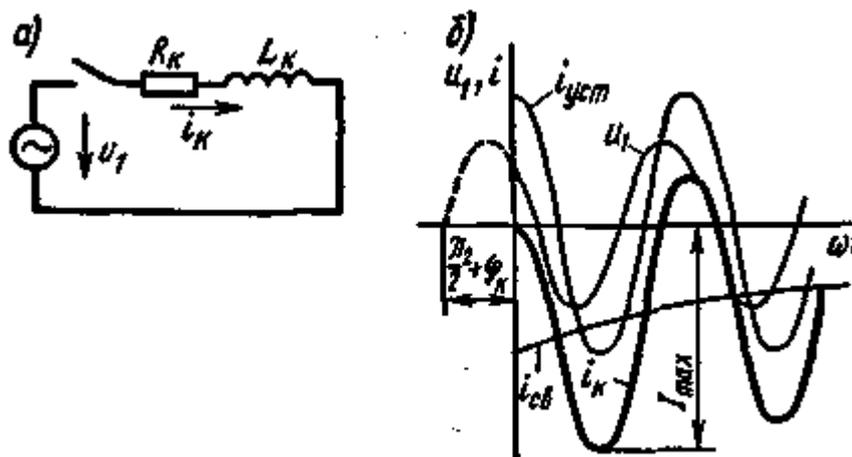


Рис. 2.62. Схема замещения трансформатора и кривые изменения тока и напряжения при коротком замыкании

где L_k — результирующая индуктивность обмоток трансформатора при коротком замыкании; $U_1 m \sin(\omega t + \alpha_0)$ — напряжение на зажимах первичной обмотки в момент короткого замыкания.

Представим ток короткого замыкания i_k , как это принято в электротехнике, в виде суммы двух токов — установившегося тока к. з. $i_{уст}$ и свободного тока $i_{св}$.

Установившийся ток к. з.

$$i_{уст} = (U_1 m / Z_k) \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_k) = \sqrt{2} I_{к.уст} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_k), \quad (2.86)$$

где $\varphi_k = \arctg(X_k / R_k)$.

Значение свободного тока $i_{св}$ определим из уравнения

$$L_k di_{св}/dt + R_k i_{св} = 0,$$

откуда

$$i_{св} = C e^{-(R_k / L_k)t}. \quad (2.87)$$

Постоянную интегрирования найдем, положив в момент $t = 0$ ток $i_k = 0$:

$$i_k = i_{уст} + i_{св} = \sqrt{2} I_{к.уст} \sin(\alpha_0 - \varphi_k) + C = 0,$$

откуда $C = -\sqrt{2} I_{к.уст} \sin(\alpha_0 - \varphi_k)$.

Таким образом, ток к. з.

$$i_k = \sqrt{2} I_{к.уст} [\sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_k) - \sin(\alpha_0 - \varphi_k) e^{-(R_k / L_k)t}]. \quad (2.88)$$

Из уравнения (2.88) следует, что при $\alpha_0 = \varphi_k$ свободный ток не возникает, и ток к. з. в начальный момент приобретает установившееся значение. Наибольший свободный ток при $\alpha_0 = \pi/2 + \varphi_k$. Этот режим является очень опасным для трансформатора (рис. 2.62, б), так как ток переходного процесса принимает здесь максимальное значение приблизительно через полпериода после момента короткого замыкания, т. е. при $\omega t = \pi$.

Подставив в (2.88) значение $\alpha_0 = \pi/2 + \varphi_k$ и $t = \pi/\omega$, получим

$$I_{k\max} = \frac{\sqrt{2}I_{k.\text{уст}}}{(R_k/X_k)\pi} (1 + e^{-\dots}) \quad (2.89)$$

Величину $I_{k\max}$ называют *ударным током короткого замыкания*. Отношение $k_{уд} = I_{k\max}/(\sqrt{2}I_{k.\text{уст}})$ называют *ударным коэффициентом*. В мощных трансформаторах отношение $R_k/X_k \approx (1/10 \div 1/15)$, вследствие чего $k_{уд} = 1,7 \div 1,8$. В трансформаторах средней мощности $k_{уд} = 1,2 \div 1,3$. В трансформаторах малой мощности активное сопротивление больше индуктивного и практически переходным режимом можно пренебречь, так как $e^{-(R_k/X_k)\pi} \approx 0$.

Установившийся ток к. з. при питании трансформатора от источника электрической энергии бесконечно большой мощности с напряжением $U_{\text{ном}}$ можно выразить через номинальный ток трансформатора:

$$I_{k.\text{уст}} = (U_{\text{ном}}/Z_k) (I_{\text{ном}}/I_{\text{ном}}) = I_{\text{ном}} U_{\text{ном}}/U_k = 100 I_{\text{ном}}/u_k \quad (2.90)$$

При реальных условиях работы трансформаторов, т. е. при питании от источника ограниченной мощности, ток $I_{k.\text{уст}}$ вычисляют по формуле, учитывающей реактивное сопротивление сети:

$$I_{k.\text{уст}} = \frac{100 I_{\text{ном}}}{\sqrt{u_k^2 (1 + 100 S_{\text{ном}}/(u_k S_k))}} \quad (2.91)$$

где $S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность трансформатора; S_k — мощность короткого замыкания электрической сети.

В трансформаторах средней и большой мощности напряжение u_k обычно составляет 5 — 15 %, поэтому *установившийся ток к. з. в 6—20 раз больше номинального тока*. Согласно ГОСТу силовые трансформаторы должны выдерживать без повреждения ток $I_{k.\text{уст}} = 25 I_{\text{ном}}$.

В автотрансформаторах сопротивление короткого замыкания Z_k и напряжение u_k меньше, чем в двухобмоточных трансформаторах той же номинальной мощности, вследствие чего установившийся и ударный токи короткого замыкания в автотрансформаторах обычно больше. Некоторые автотрансформаторы не могут выдерживать без повреждений токи к. з., и их следует ограничивать до безопасных значений путем включения реакторов.

В трансформаторах и автотрансформаторах малой мощности отношение $I_{k.\text{уст}}/I_{\text{ном}}$ значительно меньше, чем в мощных трансформаторах.

При коротких замыканиях обмотки трансформаторов сильно нагреваются и на них действуют значительные электромагнитные силы. В трансформаторах при аварийных процессах короткого замыкания температура обмоток θ_k не должна превышать значений, указанных в табл. 2.8.

Для выполнения этого условия необходимо, чтобы длительность короткого замыкания, т. е. время срабатывания защиты было меньше времени t_k , требуемого для достижения опасного нагрева.

При установлении времени t_k принимают, что из-за кратковременности работы трансформатора в режиме короткого замыкания процесс нагревания его обмоток происходит адиабатически, т. е. что выделяемая в них теплота не передается окружающей среде. Кроме того, пренебрегают свободной составляющей тока (она практически затухает через 0,03 — 0,6 с) и оценивают интенсивность нарастания температуры по установившемуся току короткого замыкания. При этих условиях время t_k (с), в течение которого медная обмотка достигает температуры 250 °С,

$$t_k \approx 2,5 (u_k/\Delta k)^2, \quad (2.92)$$

а алюминиевая обмотка достигает температуры 200 °С

$$t_k \approx 0,56 (u_k/\Delta k)^2, \quad (2.93)$$

где Δk — плотность тока при коротком замыкании и токе, подсчитанном по формуле (2.91).

Для масляных трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками длительность короткого замыкания не должна превышать 5 с. Обычно при внешних коротких замыканиях современная быстродействующая защита отключает трансформатор от сети значительно раньше, чем температура его обмоток достигает предельных значений. Однако *при внутренних коротких замыканиях в трансформаторе ток в замкнутых накоротко витках возрастает в еще большей степени, чем при коротком замыкании всей обмотки.*

Таблица 2.8

Тип трансформатора	Максимально допустимая температура при обмотках, оС	
	медных	алюминиевых
Масляные трансформаторы с изоляцией класса нагревостойкости А	250	200
Сухие трансформаторы с изоляцией класса нагревостойкости А	180	180
То же, с изоляцией класса нагревостойкости Е	250	200
То же, с изоляцией классов нагревостойкости В, F, H	350	200

Это объясняется тем, что при уменьшении числа замкнутых витков ЭДС, действующая в короткозамкнутом контуре, снижается пропорционально числу витков в первой степени, а сопротивление контура (оно определяется индуктивностью замкнутых витков) — пропорционально квадрату числа витков. Поэтому при внутренних коротких замыканиях проводники замкнутых витков частично расплавляются, и в трансформаторе могут возникнуть значительные повреждения.

Электромагнитные силы создаются в трансформаторах в результате взаимодействия тока в обмотке с магнитным полем рассеяния. Реально возникающее поле рассеяния (рис. 2.63, а) можно представить в виде суммы двух полей; продольного с индукцией B_d , магнитные линии которого направлены параллельно оси обмотки, и поперечного с индукцией B_q , линии которого расходятся радиально. Наличие поперечного поля обусловлено краевым эффектом, возникающим вследствие конечных значений высоты и ширины обмотки: чем выше обмотка, тем меньше поперечное поле. При взаимодействии этих полей с током обмотки возникают электромагнитные силы: радиальные F_q , стремящиеся сжать внутреннюю обмотку и растянуть внешнюю, и аксиальные F_d , стремящиеся сжать обмотку в продольном направлении.

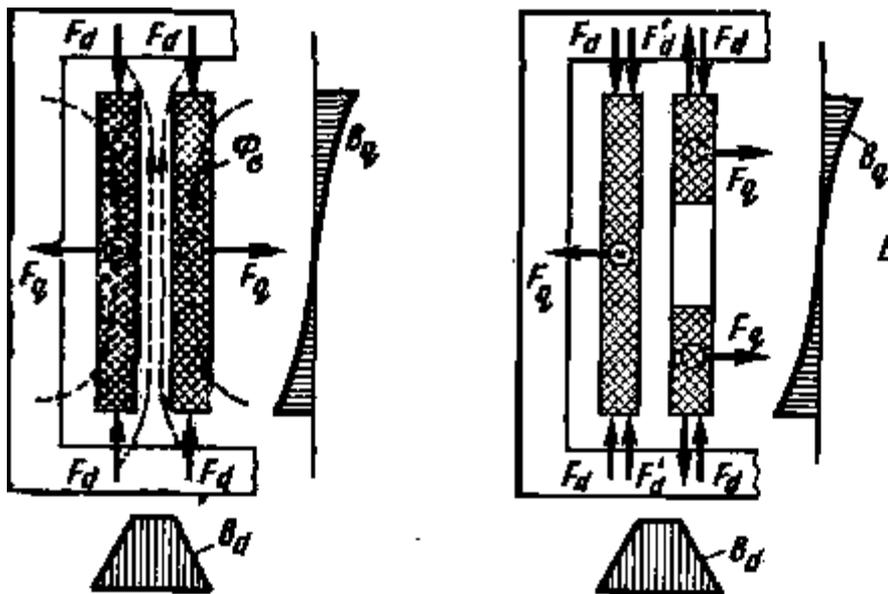


Рис. 2.63. Электромагнитные силы, действующие на обмотки трансформатора при коротком замыкании

При отключении в одной из обмоток части витков для регулирования напряжения характер распределения магнитного поля рассеяния изменяется и возникает дополнительное поперечное поле с индукцией $B'q$ (рис. 2.63,б). В результате появляются дополнительные аксиальные силы $F'd$, стремящиеся увеличить имеющуюся несимметрию в расположении витков обмоток. При симметричном расположении отключаемых витков по высоте силы $F'd$ имеют наименьшее значение. При отключении части витков, расположенных у верхнего или нижнего краев обмотки, они сильно возрастают, вследствие чего возникают силы, которые могут разрушить ярмовую изоляцию трансформатора и обмотки.

В трансформаторах большой мощности механические усилия, действующие на обмотки, при коротких замыканиях весьма велики и поэтому требуется принимать специальные меры, обеспечивающие механическую прочность обмоток. Поскольку электромагнитные силы пропорциональны квадрату тока, для маломощных трансформаторов опасность механического повреждения обмоток незначительна. Для этих трансформаторов более опасно чрезмерное нагревание обмоток.

Включение ненагруженного трансформатора в сеть. Рассмотрим случай включения однофазного трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке. Исходя из схемы замещения трансформатора при холостом ходе (рис. 2.64, а), можно составить уравнение

$$L_0 di_0/dt + R_0 i_0 = U_1 m \sin(\omega t + \alpha_0). \quad (2.94)$$

Это уравнение по структуре подобно уравнению (2.85) и отличается от него только коэффициентами L_0 и R_0 (вместо L_k и R_k). Однако пользоваться им нельзя, так как L_0 определяется потоком, замыкающимся по стали, и, следовательно, является переменной величиной.

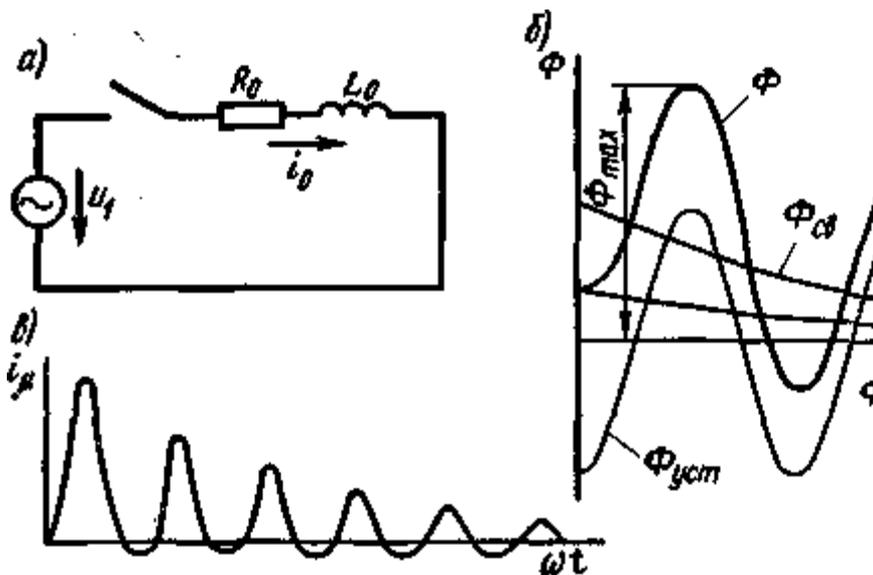


Рис. 2.64. Схема замещения и кривые изменения потока и намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора в сеть

В уравнении (2.94) вместо переменной i_0 целесообразно ввести переменную Φ , которую можно определить из уравнения $L_0 i_0 = w_1 \Phi$. При этом получим

$$w_1 d\Phi/dt + w_1(R_0/L_0)\Phi = U_1 m \sin(\omega t + \alpha_0). \quad (2.95)$$

Приближенное решение уравнения (2.95) можно получить, полагая $L_0 \approx \text{const}$; погрешность в данном случае небольшая, так как $R_0 \ll \omega L_0$. По аналогии с уравнением (2.85), имеющим ту же структуру, имеем

$$\Phi = \Phi_{уст} + \Phi_{св} = \Phi_m \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_0) + C e^{-(R_0/L_0)t}. \quad (2.96)$$

Так как $\omega L_0 \gg R_0$, то $\varphi_0 \approx \pi/2$ и, следовательно,

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha_0) + C e^{-(R_0/L_0)t}. \quad (2.97)$$

Постоянную интегрирования найдем из начальных условий: при $t = 0$ поток $\Phi = \pm \Phi_{ост}$, где $\Phi_{ост}$ — остаточный магнитный поток, достигающий иногда в трансформаторе значения $0,5\Phi_m$. При этом постоянная интегрирования $C = \Phi_m \cos \alpha_0 \pm \Phi_{ост}$, а выражение (2.97) принимает вид

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha_0) + (\Phi_m \cos \alpha_0 \pm \Phi_{ост}) e^{-(R_0/L_0)t}. \quad (2.98)$$

Наиболее благоприятные условия включения при $\alpha_0 = \pi/2$ и $\Phi_{ост} = 0$. В этом случае

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (2.99)$$

т. е. с первого же момента в трансформаторе устанавливается номинальный магнитный поток.

Наиболее неблагоприятно включение трансформатора при $\alpha_0 = 0$ и противоположном по знаку потоку $\Phi_{ост}$. Тогда

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + (\Phi_m + \Phi_{ост}) e^{-(R_0/L_0)t}. \quad (2.100)$$

В этом случае через полпериода после включения поток достигает максимума (рис. 2.64,6):

$$\Phi_{max} \approx 2\Phi_m + \Phi_{ост} \approx (2 \div 2,5) \Phi_m. \quad (2.101)$$

Двукратной амплитуде потока соответствует намагничивающий ток $I_{\mu max}$, в десятки и сотни раз (рис. 2.64, в) превышающий амплитуду установившегося тока холостого хода, что объясняется насыщением стали. Это следует учитывать при регулировании защитных устройств, чтобы не получалось ложных срабатываний защиты при включении трансформатора.

2. Внезапное трёхфазное короткое замыкание на выводах вторичной обмотки.

По данным опыта короткого замыкания определяются потери короткого замыкания P_k , которые могут быть приняты равными электрическим потерям в обмотках, и

параметры трансформатора, к которым приходится обращаться при решении многих практических задач.

Под коротким замыканием трансформатора здесь понимается такой режим его работы, при котором вторичная обмотка замкнута накоротко, а к первичной обмотке подведено напряжение. Этому режиму работы соответствует схема замещения (рис. 2-17) при $Z' = 0$.

Так как сопротивления z_1 и z_2' в сотни раз меньше сопротивления z_{12} , то при коротком замыкании трансформатора можно пренебречь током в этом сопротивлении, т. е. принять $z_{12} = \infty$. В этом случае получаем схему замещения, представленную на рис. 2-20.

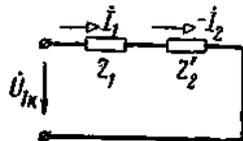


Рис. 2-20. Схема замещения короткозамкнутого трансформатора.

Векторная диаграмма короткозамкнутого трансформатора приведена на рис. 2-21.

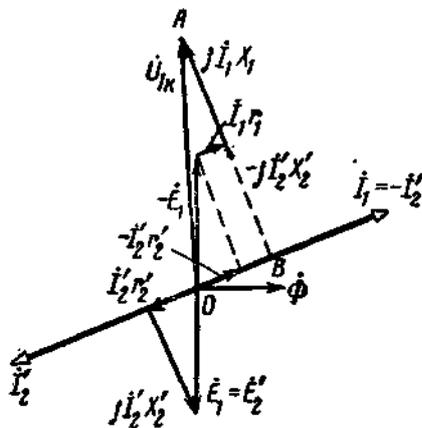


Рис. 2-21. Векторная диаграмма короткозамкнутого трансформатора.

От этой диаграммы мы можем перейти к диаграмме, представленной на рис. 2-22.

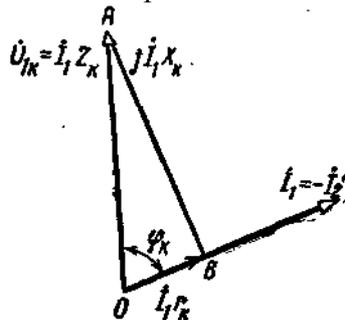


Рис. 2-22. Треугольник короткого замыкания.

Прямоугольный треугольник OAB называется треугольником короткого замыкания трансформатора. Один его катет $\overline{OB} = I_1 r_k$, другой катет $\overline{BA} = I_1 x_k$ и гипотенуза $\overline{OA} = U_{1k} = I_k z_k$.

Сопротивления

$$r_k = r_1 + r_2'; \quad x_k = x_1 + x_2';$$

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$$

называются соответственно активным, индуктивным и полным сопротивлениями короткого замыкания трансформатора. Параметры короткого замыкания z_k , r_k и x_k

определяются по данным опыта короткого замыкания. При этом опыте собирается одна из схем, приведенных на рис. 2-18 и 2-19, но вторичные зажимы замыкаются накоротко. Измеряют $U_{1к}$, I_1, P_k . Напряжение $U_{1к}$ устанавливают такое, чтобы ток I_1 был приблизительно равен номинальному току $I_{1н}$. Оно для нормальных трансформаторов мощностью от 20 до 10000 кВА составляет от 5 до 10% номинального напряжения $U_{1н}$. В соответствии с указанными значениями $U_{1н}$ и I_1 подбирают при опыте короткого замыкания измерительные приборы.

Так как при этом опыте E_1 а следовательно, и поток Φ ($E_1 \approx 0,5 U_{1к}$, рис. 2-21) составляют всего несколько процентов от их значений при номинальном напряжении (а потери в стали приблизительно пропорциональны Φ^2), то магнитными потерями можно пренебречь и считать, что мощность P_k , потребляемая трансформатором при коротком замыкании, идет на покрытие электрических потерь в обмотках трансформатора:

$$P_k = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2' = I_1^2 (r_1 + r_2') = I_1^2 r_k. \quad (2-45)$$

Отсюда находим:

$$r_k = \frac{P_k}{I_1^2}. \quad (2-46)$$

Согласно ГОСТ активные сопротивления обмоток трансформаторов, по которым определяются электрические потери и активные падения напряжения, должны быть приведены к температуре 75°C . Это приведение делаем согласно соотношению

$$r_{к75} = r_k \frac{235 + 75}{235 + \vartheta}, \quad (2-47)$$

где ϑ — температура обмоток, $^\circ \text{C}$, при опыте короткого замыкания.

Далее определяем:

$$z_k = \frac{U_{1к}}{I_1}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

(можно принять, что x_k от температуры не зависит) и

$$z_{к75} = \sqrt{r_{к75}^2 + x_k^2}.$$

После этого определяем номинальное напряжение короткого замыкания $U_k = I_{1н} z_{к75}$. Оно, очевидно, равно напряжению, которое, будучи приложено к одной обмотке трансформатора при замкнутой накоротко его другой обмотке, создаст в обеих обмотках номинальные токи.

Напряжение $U_k = I_{1н} z_{к75}$ выражается в процентах номинального напряжения той обмотки, со стороны которой производились измерения при опыте короткого замыкания:

$$u_k = \frac{I_{1н} z_{к75}}{U_{1н}} \times 100\%. \quad (2-48)$$

Процентное значение номинального напряжения короткого замыкания указывается на щитке трансформатора. Оно для нормальных трансформаторов лежит в пределах 5 — 10%. Также выражаются в процентах номинального напряжения реактивная и активная составляющие напряжения короткого замыкания:

$$u_p = \frac{I_{1н} x_{к75}}{U_{1н}} \times 100\%, \quad (2-49)$$

$$u_a = \frac{I_{1н} r_{к75}}{U_{1н}} \times 100\%. \quad (2-50)$$

Если числитель и знаменатель правой части равенства (2-50) умножить на $I_{1н}$ и число фаз m , то получим:

$$u_a = \frac{mI_{1н}^2 r_{к75}}{mU_{1н}I_{1н}} \times 100\% = \frac{P_{к.н}}{S_n} \times 100\%, \quad (2-51)$$

т. е. u_a в то же время дает процентное значение электрических потерь в обмотках трансформатора или потерь короткого замыкания при номинальных токах.

Значения r_1 и r_2 могут быть измерены при постоянном токе, например при помощи амперметра и вольтметра. Полученные при этом сопротивления будут несколько меньше активных сопротивлений обмоток. Активные сопротивления больше сопротивлений, измеренных при постоянном токе, в 1,03 — 1,07 раза вследствие наличия вихревых токов в проводниках обмоток и в других металлических частях трансформатора, вызванных полями рассеяния.

Определить отдельно значения x_1 и x_2 довольно трудно. Практически достаточно найти только x_k

3. Включение ненагруженного трансформатора в сеть.

В обычных условиях эксплуатации трехфазной сети нагрузку удается распределить достаточно равномерно на все три фазы. Однако бывают случаи, когда нагрузки фаз сильно отличаются одна от другой, например при питании мощных однофазных печей. При этом системы токов и напряжений получаются несимметричными. Резко несимметричную систему токов получим, очевидно, при несимметричных коротких замыканиях: двухфазном и однофазном.

При исследовании работы трансформаторов, имеющих несимметричную нагрузку, применяется метод симметричных составляющих. Он также широко применяется при исследовании несимметричных режимов работы трехфазных генераторов и двигателей и позволяет наиболее просто и достаточно точно разрешить многие из возникающих при этом вопросов.

а) Метод симметричных составляющих.

Мы здесь сообщим краткие сведения о методе симметричных составляющих. Сущность этого метода состоит в том, что каждый фазный ток (или фазное напряжение) заменяется тремя его составляющими:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a3}; \quad (2-135)$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b3}; \quad (2-136)$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c3}. \quad (2-137)$$

Величины $\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{b0}, \dot{I}_{c0}$ принимаются равными друг другу и равными одной трети суммы фазных токов:

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c). \quad (2-138)$$

Эти величины называются составляющими нулевой последовательности, так как они образуют три равных временных вектора с нулевым сдвигом между ними.

Если из каждого тока данной несимметричной системы вычесть его нулевую составляющую, то получим новую систему токов, сумма которых согласно (2-138) равна нулю:

$$(\dot{I}_a - \dot{I}_{a0}) + (\dot{I}_b - \dot{I}_{b0}) + (\dot{I}_c - \dot{I}_{c0}) = 0. \quad (2-139)$$

Учитывая теперь (2-135) — (2-137), можем написать:

$$(\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{c1}) + (\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{c2}) = 0. \quad (2-140)$$

Здесь системы токов, стоящих в скобках, будем считать трехфазными симметричными системами. Однако, если принять, что порядки чередования фаз той и другой систем одинаковы, то их сумма даст симметричную систему, что в общем случае не будет соответствовать системе токов уравнения (2-139). Следовательно, мы должны считать, что одна из систем токов (2-140) имеет порядок чередования фаз, обратный по отношению к порядку чередования фаз другой. В соответствии с этим система токов $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{c1}$ называется системой прямой последовательности [порядок чередования этих токов обычно такой же, как и токов уравнения (2-139)], а система токов $\dot{I}_{a2}, \dot{I}_{b2}, \dot{I}_{c2}$ — системой обратной последовательности.

Для удобства вычислений вводится комплексный коэффициент

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (2-141)$$

Умножение вектора на этот коэффициент не изменяет его абсолютного значения, но изменяет его аргумент на $\frac{2\pi}{3}$, т. е. поворачивает вектор на угол $\frac{2\pi}{3}$ в сторону вращения векторов. Очевидно, что умножение на a^2 дает поворот вектора на угол $\frac{4\pi}{3}$ в ту же сторону. Также очевидно, что

$$a^3 = 1; 1 + a + a^2 = 0; a^4 = a^3 \cdot a = a. \quad (2-142)$$

Уравнения (2-135) — (2-137) после введения в них коэффициентов a и a^2 и с учетом (2-138) перепишем в следующем виде

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a3}; \quad (2-143)$$

$$\dot{I}_b = a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \quad (2-144)$$

$$\dot{I}_c = a \dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}. \quad (2-145)$$

Написанные уравнения позволяют при заданных токах найти их симметричные составляющие. Составляющие нулевой последовательности $\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0}$ определяются по (2-138). Составляющие прямой и обратной последовательностей определяются следующим образом.

Умножим (2-144) на a и (2-145) на a^2 . Сложив полученные уравнения с (2-143) и учитывая (2-142), будем иметь:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a \dot{I}_b + a^2 \dot{I}_c). \quad (2-146)$$

Если умножить (2-144) на a^2 и (2-145) на a , то, сложив три уравнения, получим:

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2 \dot{I}_b + a \dot{I}_c). \quad (2-147)$$

Таким образом, по (2-138), (2-146) и (2-147) при заданных токах $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ могут быть определены их симметричные составляющие (на рис 2-58 показаны токи $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ и их симметричные составляющие).

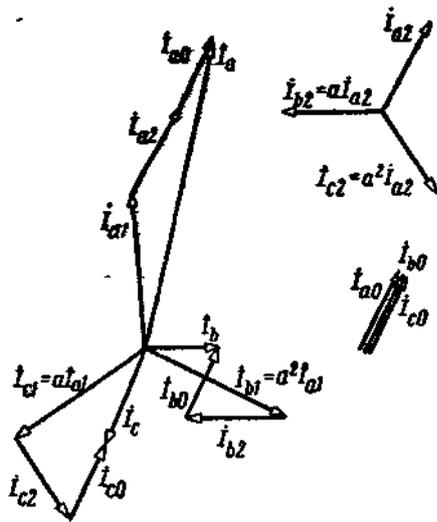


Рис. 2-58. Несимметричная система токов $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ и их симметричные составляющие.

Аналогичные уравнения получаются для симметричных составляющих заданной системы напряжений $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$. Фазные токи или напряжения в общем случае имеют составляющие всех трех последовательностей: линейные токи (при соединении треугольником) и напряжения могут иметь только составляющие прямой и обратной последовательностей.

В обычных случаях системы симметричных составляющих токов или напряжений можно рассматривать независимо одна от другой и при исследовании несимметричной нагрузки исходить из принципа наложения. Если, например, трехфазная система сопротивлений симметрична, то можно считать, что токи любой последовательности вызовут падения напряжения — активные и реактивные — только той же самой последовательности. В применении к трехфазным трансформаторам мы должны считать $Z_{12} = \text{const}$, т. е. пренебречь изменением насыщения, или считать $Z_{12} = \infty$, т. е. пренебречь током холостого хода.

б) *Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении его обмоток Y/Y₀.*

Будем пренебрегать током холостого хода при всех случаях несимметричной нагрузки трансформатора и при всех соединениях его обмоток и будем считать, что нам заданы линейные первичные напряжения и вторичные токи.

В трансформаторах сопротивления Z_1, Z_2 и Z_k для токов прямой последовательности равны тем же сопротивлениям для токов обратной последовательности. Это следует из того, что сопротивления трансформатора не изменятся, если мы при его симметричной нагрузке поменяем местами два провода на его первичной стороне.

Рассматриваемому здесь случаю соответствует схема, показанная на рис 2-59.



Рис. 2-59. Несимметричная нагрузка трансформатора при соединении его обмоток Y/Y₀.

Согласно этой схеме напишем уравнения токов:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0; \quad (2-148)$$

$$\dot{i}_a + \dot{i}_b + \dot{i}_c + \dot{i}_0 = 0 \quad (2-149)$$

Система вторичных токов согласно (2-138) имеет составляющие нулевой последовательности

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0} = -\frac{1}{3}\dot{i}_0. \quad (2-150)$$

Соотношения между первичными и вторичными токами определяются следующим образом.

Обратимся к рис. 2-60, где схематически изображен трансформатор с условными положительными направлениями токов в его обмотках.

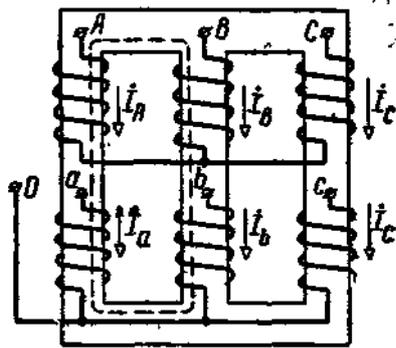


Рис. 2-60. К определению соотношений между первичными и вторичными токами.

Так как мы пренебрегаем током холостого хода, то согласно закону полного тока полный ток сквозь любой магнитный контур по сердечнику (например, показанный пунктиром на рис. 2-60) равен нулю. Поэтому, считая $w_1 = w_2$, мы можем написать для контуров, образованных стержнями $A - B$ и $A - C$ и соответствующими ярами, уравнения:

$$\dot{I}_A + \dot{i}_a - \dot{i}_b - \dot{I}_B = 0; \quad (2-151)$$

$$\dot{I}_A + \dot{i}_a - \dot{i}_c - \dot{I}_C = 0. \quad (2-152)$$

Из этих уравнений и уравнений (2-148) и (2-149) получаем:

$$\dot{I}_A = -\dot{i}_a - \frac{1}{3}\dot{i}_0;$$

$$\dot{I}_B = -\dot{i}_b - \frac{1}{3}\dot{i}_0; \quad (2-153)$$

$$\dot{I}_C = -\dot{i}_c - \frac{1}{3}\dot{i}_0.$$

Заменяя токи их симметричными составляющими и учитывая (2-150), будем иметь:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = -\dot{i}_{a1} - \dot{i}_{a2};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} = -\dot{i}_{b1} - \dot{i}_{b2}; \quad (2-154)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} = -\dot{i}_{c1} - \dot{i}_{c2}.$$

Из (2-154) следует, что в трансформаторе при данном соединении его обмоток трансформируются только токи прямой и обратной последовательностей, токи же нулевой последовательности будут иметь место только во вторичной обмотке. Поэтому в магнитном контуре, проходящем по любому из стержней сердечника и вне его, н.с. обмоток не будут уравновешены. Здесь возникает магнитное поле, созданное н.с. I_{a0} . На рис. 2-61 показана приближенная картина этого поля масляного трансформатора.

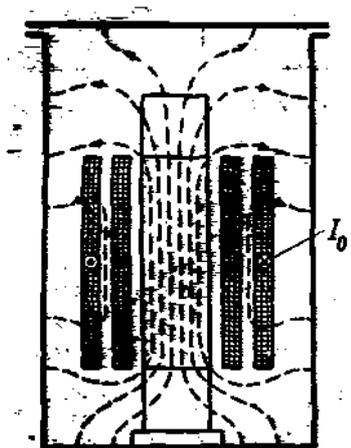


Рис. 2-61. Приближенная картина поля, созданной токами нулевой последовательности.

Мы можем считать, что в стержнях трансформатора имеют место потоки нулевой последовательности $\dot{\Phi}_0$, созданные токами нулевой последовательности и накладывающиеся на потоки в стержнях $\dot{\Phi}_A, \dot{\Phi}_B, \dot{\Phi}_C$, соответствующие напряжениям прямой и обратной последовательностей, приложенным с первичной стороны. Очевидно, что $\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0$, так же как и наведенные ими э.д.с. $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$. (2-155)

На рис. 2-62 представлена диаграмма э.д.с., наведенных в фазах обмоток указанными потоками.

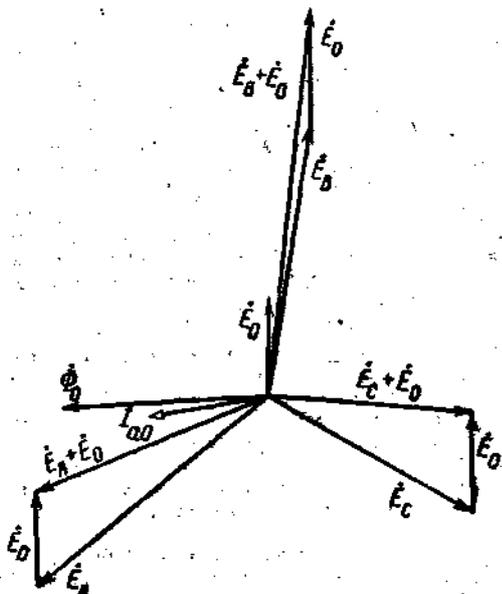


Рис. 2-62. Векторная диаграмма э.д.с. в обмотках трансформатора при несимметричной нагрузке.

Теперь уравнения напряжений для первичной обмотки напишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= -\dot{E}_A - \dot{E}_0 + \dot{I}_A Z_1; \\ \dot{U}_B &= -\dot{E}_B - \dot{E}_0 + \dot{I}_B Z_1; \\ \dot{U}_C &= -\dot{E}_C - \dot{E}_0 + \dot{I}_C Z_1. \end{aligned} \quad (2-156)$$

Заменим

$$\dot{E}_0 = -\dot{I}_{a0} Z_0, \quad (2-157)$$

где $Z_0 = r_0 + jx_0$ — полное сопротивление нулевой последовательности (x_0 обусловлено полем тока I_{a0} , а r_0 — магнитными потерями от этого поля).

Сложив уравнения (2-156) и, учитывая при этом (2-155), (2-148) и (2-157), получим:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 3\dot{E}_0 = 3\dot{I}_{a0}Z_0. \quad (2-158)$$

Для линейных (междуфазных) напряжений можем написать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C; \end{aligned} \quad (2-159)$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Отсюда с учетом (2-158) получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \frac{\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{CA}}{3} + \dot{I}_{a0}Z_0 = \dot{U}'_A + \dot{I}_{a0}Z_0; \\ \dot{U}_B &= \frac{\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{AB}}{3} + \dot{I}_{a0}Z_0 = \dot{U}'_B + \dot{I}_{a0}Z_0; \\ \dot{U}_C &= \frac{\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{BC}}{3} + \dot{I}_{a0}Z_0 = \dot{U}'_C + \dot{I}_{a0}Z_0. \end{aligned} \quad (2-160)$$

В соответствии с (2-160) на рис. 2-63 построена векторная диаграмма первичных напряжений.

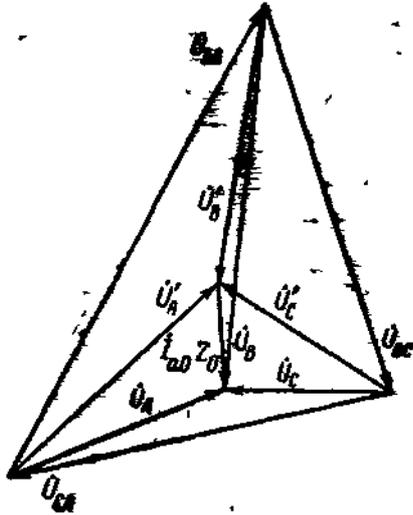


Рис. 2-63. Векторная диаграмма первичных напряжений.

Из нее мы видим, что вследствие наличия токов нулевой последовательности потенциал нулевой точки первичной обмотки сместился на величину $\dot{I}_{a0}Z_0$ из центра тяжести треугольника линейных напряжений.

Учитывая (2-160) в (2-154) напишем уравнения напряжений для вторичной обмотки:

$$\dot{U}'_A - \dot{I}_{A1}Z_1 - \dot{I}_{A2}Z_1 + \dot{I}_{a1}Z_2 + \dot{I}_{a2}Z_2 + \dot{I}_{a0}Z_2 + \dot{I}_{a0}Z_0 = -\dot{U}_a$$

или, так как $\dot{I}_{A1} = -\dot{I}_{a1}$ и $\dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{a2}$, а $Z_1 + Z_2 = Z_k$,

$$\dot{U}'_A - \dot{I}_{A1}Z_k - \dot{I}_{A2}Z_k + \dot{I}_{a0}Z_n = -\dot{U}_a, \quad (2-161)$$

где

$$Z_n = Z_2 + Z_0 \quad (2-162)$$

Для двух других фаз уравнения напряжений напишутся аналогично:

$$\dot{U}'_B - \dot{I}_{B1}Z_k - \dot{I}_{B2}Z_k + \dot{I}_{a0}Z_n = -\dot{U}_b; \quad (2-163)$$

$$\dot{U}'_C - \dot{I}_{C1}Z_k - \dot{I}_{C2}Z_k + \dot{I}_{a0}Z_n = -\dot{U}_c. \quad (2-164)$$

Уравнения (2-161), (2-163) и (2-164) показывают, что смещение потенциала нулевой точки вторичной обмотки, вызванное токами нулевой последовательности, равно

$\dot{i}_{a0}Z_H$. Оно несколько больше, чем для первичной обмотки, где это смещение равняется $\dot{i}_{a0}Z_0$. Оба сопротивления Z_0 и Z_H называются сопротивлениями нулевой последовательности; они практически мало отличаются одно от другого. Для трехфазных стержневых трансформаторов с масляным охлаждением

$$z_{H\%} = \frac{I_{1H}Z_H}{U_{1H}} \times 100\% = 30 \div 100\%. \quad (2-165)$$

Если первичные линейные напряжения образуют симметричную систему, то, очевидно, и фазные напряжения $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$ образуют симметричную систему. Из уравнении: (2-161), (2-163) и (2-164) следует, что в этом случае симметрия линейных вторичных напряжений ($\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$) будет нарушаться только из-за наличия токов обратной последовательности: в системе линейных вторичных напряжений мы будем иметь наряду с составляющими прямой последовательности составляющие обратной последовательности, модуль которых равен $\sqrt{3}I_{a2}z_k$.

В системе фазных вторичных напряжений мы будем иметь, как это следует из (2-161), (2-163) и (2-164), все три симметричные составляющие:

$$-\dot{U}_{a1} = \dot{U}'_A - \dot{I}_{A1}Z_k; \quad -\dot{U}_{a2} = -\dot{I}_{A2}Z_k; \quad -\dot{U}_{a0} = \dot{I}_{a0}Z_H.$$

$$\frac{I_{a0}z_H}{U_H} \leq 0,05,$$

Если поставить условием, чтобы было $\frac{I_{a0}z_H}{U_H} \leq 0,05$ то необходимо иметь ток I_0 в

$$\frac{I_H z_H}{U_H} = 0,6$$

нулевом проводе при $\frac{I_H z_H}{U_H}$ [см (2-165)] не больше $0,25I_H$, что вытекает из следующих соотношений:

$$\frac{I_{a0}z_H}{U_H} \times \frac{I_H}{I_H} = \frac{I_0}{3I_H} \times \frac{I_H z_H}{U_H} \leq 0,05;$$

$$\frac{I_0}{I_H} \leq \frac{0,05 \times 3}{0,6} = 0,25.$$

Для расчета сопротивления нулевой последовательности z_H мы не имеем надежных методов, однако опытным путем величина z_H определяется достаточно точно. Для этого нужно собрать схему, показанную на рис. 2-64. Вторичная обмотка должна быть присоединена к источнику однофазного тока. Ток в ее фазах будет соответствовать току нулевой последовательности. Следовательно, измерив ток I , напряжение U и мощность P

при разомкнутой первичной обмотке (рубильник разомкнут), найдем $\frac{U}{3I}$, а также r_H и x_H . Справа на рис. 2-64 показана соответствующая схема замещения [см. (2-162)].

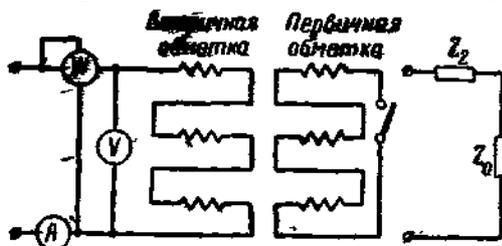


Рис. 2-64. Схема для опытного определения сопротивления нулевой последовательности.

В трехфазной группе, состоящей из трех однофазных трансформаторов, мы не имеем магнитной связи между фазами. В трехфазном бронеовом трансформаторе эта связь выражена очень слабо. Поэтому при соединении обмоток Y/Y_0 в таких трансформаторах

мы имели бы незначительное магнитное сопротивление для потока Φ_0 , который здесь полностью проходил бы по стальному сердечнику, и сопротивление z_H было бы очень велико: $z_H = z_{12}$. Следовательно, даже при малом значении I_{a0} мы получили бы значительные смещения потенциалов нулевых точек вторичной и первичной обмоток. Поэтому ни трехфазная группа, ни трехфазный броневого трансформатор с соединением обмоток Y/Y_0 на практике не применяются.

Рассмотрим крайний случай несимметричной нагрузки — однофазное короткое замыкание (рис. 2-65).

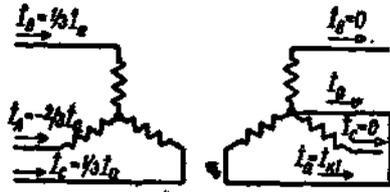


Рис. 2-65. Однофазное короткое замыкание.

Здесь имеем $\dot{I}_b = 0$; $\dot{I}_c = 0$; $\dot{I}_a = \dot{I}_{k1} = -\dot{I}_0$, следовательно, согласно (2-138), (2-146) в (2-147) получим:

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3} \dot{I}_a = \frac{1}{3} \dot{I}_{k1} = -\frac{1}{3} \dot{I}_0. \quad (2-166)$$

Подставив в (2-161)

$$\dot{U}_a = 0; \quad \dot{I}_{A1} = -\dot{I}_{a1} = -\frac{1}{3} \dot{I}_a; \quad \dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{a2} = -\frac{1}{3} \dot{I}_a,$$

получим формулу для тока однофазного короткого замыкания:

$$\dot{I}_{k1} = \dot{I}_a = -\frac{3\dot{U}'_A}{2Z_k + Z_H}. \quad (2-167)$$

Токи в первичной обмотке согласно (2-153) с учетом (2-166):

$$\dot{I}_A = -\frac{2}{3} \dot{I}_a; \quad \dot{I}_B = -\frac{1}{3} \dot{I}_a; \quad \dot{I}_C = -\frac{1}{3} \dot{I}_a. \quad (2-168)$$

в) *Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении обмоток Δ/Y_0 .*

Рассматриваемому случаю соответствует схема, представленная на рис. 2-66.

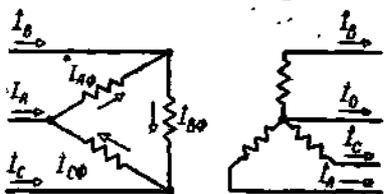


Рис. 2-66. Несимметричная нагрузка трансформатора при соединении его обмоток Δ/Y_0 .

На вторичной стороне мы имеем такие же токи, как в предыдущем случае (рис. 2-59). Для них действительно уравнение (2-149), т. е. в общем случае система вторичных токов имеет все три симметричные составляющие.

В первичной обмотке, соединенной треугольником, фазные токи также будут иметь наряду с составляющими прямой и обратной последовательностей составляющие нулевой последовательности. Последние возникнут потому, что э.д.с. \dot{E}_0 (э.д.с. нулевой последовательности) в фазах, соединенных треугольником, направлены все в одну сторону в любой момент времени. В магнитном отношении они должны уравновесить токи нулевой последовательности вторичной обмотки. Следовательно, н.с. обмоток на каждом стержне будут взаимно уравновешиваться, первичная и вторичная обмотки

каждой фазы могут рассматриваться как обмотки отдельного однофазного трансформатора.

Первичные фазные токи равны:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A\phi} &= \dot{I}_{A\phi 1} + \dot{I}_{A\phi 2} + \dot{I}_{A\phi 0}; \\ \dot{I}_{A\phi 1} &= -\dot{I}_{a1}; \quad \dot{I}_{A\phi 2} = -\dot{I}_{a2}; \quad \dot{I}_{A\phi 0} = -\dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_{B\phi} &= \dot{I}_{B\phi 1} + \dot{I}_{B\phi 2} + \dot{I}_{B\phi 0}; \\ \dot{I}_{B\phi 1} &= -\dot{I}_{b1}; \quad \dot{I}_{B\phi 2} = -\dot{I}_{b2}; \quad \dot{I}_{B\phi 0} = -\dot{I}_{b0}; \\ \dot{I}_{C\phi} &= \dot{I}_{C\phi 1} + \dot{I}_{C\phi 2} + \dot{I}_{C\phi 0}; \\ \dot{I}_{C\phi 1} &= -\dot{I}_{c1}; \quad \dot{I}_{C\phi 2} = -\dot{I}_{c2}; \quad \dot{I}_{C\phi 0} = -\dot{I}_{c0}. \end{aligned}$$

Линейные токи, конечно, не будут иметь составляющих нулевой последовательности:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A\phi} - \dot{I}_{C\phi}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{B\phi} + \dot{I}_{B\phi 2} - \dot{I}_{A\phi}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{C\phi} - \dot{I}_{B\phi}.$$

Связь между вторичными и первичными напряжениями устанавливается уравнениями (2-161), (2-163) и (2-164). Здесь $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$ — напряжения, приложенные к фазам первичной обмотки: сопротивление Z_H при соединении обмоток Y/Y_0 значительно меньше, чем при Y/Y_0 , так как оно в основном определяется полем рассеяния, таким же, как и поле рассеяния, созданное токами прямой или обратной последовательности. Значение z_H при соединении обмоток Δ/Y_0 может быть найдено опытным путем. Используется та же схема, что и на рис. 2-64, но рубильник на вторичной стороне при

этом должен быть замкнут. Здесь также $z_H = \frac{U}{3I}$.

Схема замещения для z_H при соединении обмоток Δ/Y_0 , приведена на рис. 2-67.

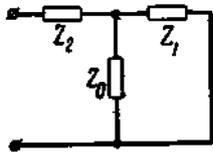


Рис. 2-67. Схема замещения для Z_H трансформатора при соединении его обмоток Δ/Y_0 .

Согласно схеме имеем:

$$Z_H = Z_2 + \frac{Z_0 Z_1}{Z_0 + Z_1} = Z_2 + \frac{Z_1}{1 + \frac{Z_1}{Z_0}} \approx Z_2 + Z_2 = Z_K,$$

так как Z_0 во много раз больше Z_1 .

Смещение потенциала нулевой точки вторичной обмотки ($I_{a0} z_H$) будет значительно меньше, поэтому, если ожидается большой ток нулевой последовательности, следует соединению обмоток Y/Y_0 предпочесть соединение Δ/Y_0 .

г) Несимметричная нагрузка трансформатора при соединении обмоток $Y/\Delta/Y_0$.

Соответствующая схема представлена на рис. 2-68.

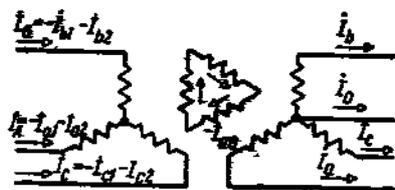


Рис. 2-68. Несимметричная нагрузка трехобмоточного трансформатора при соединении обмоток $Y/\Delta/Y_0$.

Мы здесь рассмотрим случай, когда со вторичной стороны нагружена только одна вторичная обмотка, соединенная звездой с выведенной нулевой точкой. Как и в предыдущем случае, в обмотке, соединенной треугольником, мы будем иметь токи нулевой последовательности, в первичной обмотке будут токи прямой и обратной последовательностей. Следовательно, н.с. обмоток каждой фазы взаимно уравновешиваются и потоки нулевой последовательности практически равны нулю.

Если третья обмотка, соединенная треугольником, используется только как компенсационная для компенсации третьей гармоники в кривой потока, то она должна быть рассчитана на наибольший ток нулевой последовательности с учетом длительности его протекания. Поэтому применение третьей обмотки только как компенсационной в большинстве случаев невыгодно.

д) *Несимметричная нагрузка трансформаторов при соединении обмоток* Y/Y , Y/Δ , Δ/Y .

Здесь мы не будем иметь во вторичной и в первичной обмотках токи нулевой последовательности, следовательно, не будем иметь для обмотки, соединенной звездой, смещения потенциала нулевой точки относительно центра тяжести треугольника линейных напряжений. При данных соединениях обмоток мы можем рассматривать первичную и вторичную, обмотки каждой фазы как независимый однофазный трансформатор. Уравнения напряжений (2-161), (2-163) и (2-164), если в них взять $I_{a0} = 0$, могут быть использованы при определении вторичных напряжений для заданных первичных напряжений, вторичных токов (при известных параметрах трансформатора $Z_k = r_k + jx_k$). При помощи тех же уравнений могут быть определены фазные и линейные токи при двухфазных коротких замыканиях.

1.10 Лекция №10 (2 часа).

Тема: «Устройство и принцип действия асинхронных машин»

1.10.1 Вопросы лекции:

1. Назначение и принцип действия.
2. Устройство асинхронных двигателей.
3. Серии асинхронных двигателей.

1.10.2 Краткое содержание вопросов

1. Назначение и принцип действия.

Асинхронные машины применяются на практике главным образом как двигатели. Наибольшее распространение имеют трехфазные асинхронные двигатели. Они находят себе самое широкое применение на заводах, фабриках, в сельском хозяйстве, на строительных работах, для вспомогательных механизмов электрических станций. Особенно много требуется трехфазных двигателей мощностью от 0,4 до 100 кВт. Такие двигатели массового применения электромашиностроительными заводами СССР выпускаются ежегодно на миллионы киловатт. Большое количество двигателей выпускается также на мощности свыше 100 кВт.

Однофазные асинхронные двигатели в настоящее время выполняются, как правило, в виде малых машин обычно на мощности не свыше 0,5 кВт.

Обмотки статора и ротора асинхронных машин между собой электрически не связаны; между ними существует только магнитная (трансформаторная) связь, называемая также индуктивной, что дало повод назвать асинхронные машины индукционными. Однако это название в Советском Союзе почти не применяется.

Обмотка статора обычно является первичной обмоткой при работе машины двигателем, так как к ней в этом случае подводится электрическая энергия. Токи обмотки статора совместно с токами обмотки ротора создают в двигателе вращающееся магнитное поле. Обмотка ротора при этом служит в качестве вторичной. Токи, наведенные в ней

вращающимся полем, взаимодействуя с ним, создают электромагнитные силы, заставляющие ротор вращаться.

Асинхронные двигатели выполняются или с короткозамкнутой обмоткой на роторе, или с обмоткой на роторе (обычно трехфазной), соединенной с контактными кольцами. В соответствии с этим различают короткозамкнутые двигатели и двигатели с контактными кольцами. Последние условие называются также двигателями с фазным ротором.

На щитке асинхронного двигателя указываются следующие номинальные величины его:

1. мощность (на валу), кВт или Вт;
2. линейное напряжение обмотки статора, В;
3. линейный ток, А;
4. частота тока, Гц;
5. частота вращения ротора (число оборотов в минуту);
6. коэффициент полезного действия;
7. коэффициент мощности (косинус угла сдвига фаз между напряжением и током фазы обмотки статора);
8. напряжение на контактных кольцах (при неподвижном роторе) и ток обмотки ротора (при номинальном режиме) для двигателя с контактными кольцами.

Кроме того, на щитке указываются схема соединений обмотки статора, режим работы (продолжительный, кратковременный или повторно-кратковременный), для которого предназначен двигатель, и полный вес его в килограммах.

2. Устройство асинхронных двигателей.

Основными частями машины являются статор и ротор. Их сердечники собираются из листов электротехнической стали (рис. 3-1), которые до сборки обычно покрываются с обеих сторон специальным лаком.

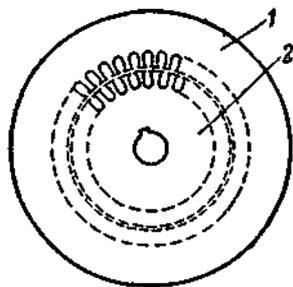


Рис. 3-1. Листы сердечников статора (1) и ротора (2).

Тем самым предотвращается образование больших вихревых токов в стали сердечников. Иногда для небольших двигателей их сердечники собирают из листов без покрытия последних лаком, так как окалина на внешних поверхностях листов создает достаточную изоляцию между ними.

На рис. 3-1 показаны листы, из которых собираются статор и ротор машин небольшой и средней мощностей. Они обычно штампуются при помощи штампа, позволяющего одним ударом получить необходимую форму листа со всеми отверстиями. Отверстия на внутренней окружности листов статора и на внешней окружности листов ротора после сборки их образуют пазы статора и ротора, в которые закладываются проводники обмоток.

На рис. 3-2 и 3-3 показаны в разобранном виде двигателя — короткозамкнутый и с контактными кольцами.

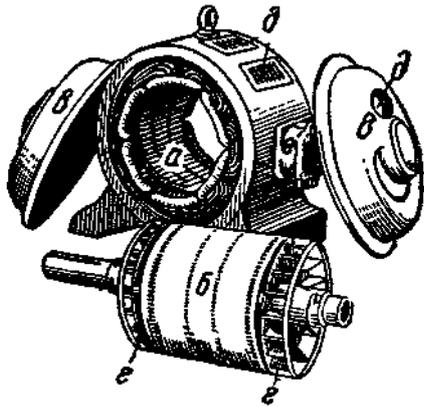


Рис. 3-2. Асинхронный двигатель короткозамкнутым ротором в разобранном виде. *a* — статор; *б* — ротор; *в* — подшипниковые щиты; *г* — вентилятор; *д* — отверстия для входа и выхода охлаждающего воздуха; *е* — коробка, прикрывающая зажимы.

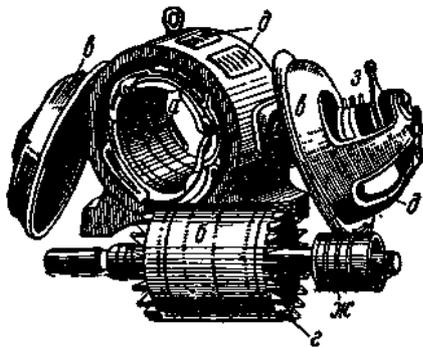


Рис. 3-3. Асинхронный двигатель с контактными кольцами в разобранном виде. *a* — статор; *б* — ротор; *в* — подшипниковые щиты; *г* — вентилятор; *д* — отверстия для входа и выхода охлаждающего воздуха; *е* — коробка, прикрывающая зажимы; *ж* — контактные кольца, *з* — щеткодержатели и щетки.

Сердечник статора помещается в корпусе, который служит его внешней частью. Сердечник ротора укрепляется непосредственно на валу двигателя или на втулке (в форме крестовины), надетой на вал двигателя.

Вал вращается в подшипниках, укрепленных в боковых щитах, называемых подшипниковыми щитами. Машины мощностью до 500—600 кВт (иногда и выше) снабжаются подшипниками качения (шариковыми и роликовыми), при большей мощности — подшипниками скольжения. При внешнем диаметре сердечника статора свыше 1 м обычно применяют стояковые подшипники (рис. 3-4).

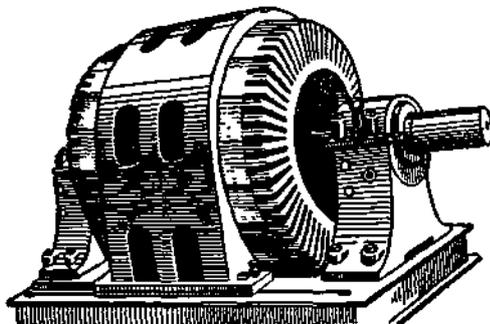


Рис. 3-4. Асинхронный двигатель большой мощности со стояковыми подшипниками.

Подшипниковые щиты прикрепляются к корпусу статора при помощи болтов или шпилек. Щиты и корпус статора обычно выполняются литыми из чугуна. Для малых машин их часто выполняют литыми из сплава с большим содержанием алюминия, что уменьшает вес машины.

3. Серии асинхронных двигателей.

В двигателях серий А, АО, А2, АО2 и А3 буква А означает брызгозащищенное исполнение, АО — закрытое обдуваемое, первая цифра после букв — номер серии. Число после первого дефиса характеризует типоразмер; первая цифра в нем указывает габарит (условный номер наружного диаметра сердечника статора), вторая — условный номер длины. Цифра после второго дефиса соответствует числу полюсов. Например, АО2-62-4 — асинхронный трехфазный электродвигатель в закрытом обдуваемом исполнении, второй единой серии, шестого габарита, второй длины, четырехполюсный. Электродвигатели 1—5-го габаритов во второй серии выпускают только в закрытом обдуваемом исполнении, что повышает их надежность: срок службы закрытой машины малой мощности увеличивается в 1,5—2 раза по сравнению с защищенной.

Двигатели единых серий А, АО и А2, АО2 основного исполнения имеют короткозамкнутый ротор с литой алюминиевой обмоткой. На их базе был создан ряд модификаций двигателей. При обозначении модификаций к буквенной части добавляется буква для электродвигателей: с повышенным пусковым моментом — П (например, АОП2-62-4); с повышенным скольжением — С, для текстильной промышленности — Т, с фазным ротором — К.

Асинхронные двигатели с повышенным пусковым моментом предназначены для привода механизмов с большими нагрузками в период пуска. Двигатели с повышенным скольжением применяются для механизмов с неравномерным ударным характером нагрузки и механизмов с большой частотой пусков и реверсов.

Для двигателей общего назначения с алюминиевой обмоткой статора в конце обозначения добавляется буква А (например, АО2-42-4А). В двигателях на несколько частот вращения в цифры, характеризующие числа полюсов, вносят все их значения, разделенные косыми линиями: например АО-94-12/8/6/4 — трехфазный асинхронный двигатель серии АО 9 габарита, 4-й длины на 12, 8, 6 и 4 полюсов.

Буква Л (например, АОЛ2-21-6) обозначает, что корпус и щиты отлиты из алюминиевого сплава.

Обозначение типоразмера двигателя серии 4А, например 4АН280М2УЗ, расшифровывается следующим образом: 4 — порядковый номер серии, А — вид двигателя (асинхронный), Н — защищенный (отсутствие данного знака означает закрытое обдуваемое исполнение), 280 — высота оси вращения (три или две цифры), мм, S, М или L — установочный размер по длине станины, 2 (или 4, 6, 8, 10, 12) — число полюсов, УЗ — климатическое исполнение (У) и кате размещения (З).

После первой буквы А может стоять вторая А (например, 4АА63), которая означает, что станина и щиты выполнены из алюминиевого сплава, или Х — станина алюминиевая, щиты чугунные; отсутствие этих знаков свидетельствует о том, что станина и щиты чугунные или стальные.

В обозначении двигателей с фазным ротором ставится буква К, например 4АНК.

При одних и тех же размерах станины сердечник статора может иметь разные длины. В этом случае в обозначении типоразмера после букв S, М, JL и непосредственно после высоты вращения, если эти буквы отсутствуют, ставятся знаки А (меньшая длина сердечника) или В (большая длина), например 4А90LА8, 4А90LВ8, 4А71А6, 4А71В6.

Климатические исполнения двигателей обозначаются следующими буквами: У — для умеренного климата, ХЛ — для холодного климата, ТВ — для влажного тропического климата, ТС — для тропического сухого климата, Т — для тропического как сухого, так и влажного климата, О — для всех районов на суше (общеклиматическое исполнение), М — для морского умеренного холодного климата, ТМ — для тропического морского климата, . ОМ — для неограниченного района плавания, В — для всех районов на суше и море.

Категории размещения обозначаются цифрами: 1 — для работы на открытом воздухе, 2 — для помещений со сравнительно свободным доступом воздуха, 3 — для закрытых помещений, где колебания температуры, влажности, а также воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе, 4 — для помещений с искусственно регулируемые климатическими условиями (например, закрытые отапливаемые и вентилируемые производственные помещения), 5 — для работы в помещениях с повышенной влажностью (например, невентилируемые и неотапливаемые подземные помещения, помещения, в которых возможно длительное наличие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке).

ГОСТ 17494—72 на электрические машины устанавливают степени защиты персонала от соприкосновения с токопроводящими или движущимися частями, находящимися внутри машины и, кроме того, от попадания твердых посторонних тел и воды.

Электродвигатели общего применения в основном изготавливают двух степеней защиты: IP23 (или IP22 для двигателей постоянного тока) и IP44: первая из них характеризует машины в защищенном исполнении, вторая — в закрытом.

Буквенно-цифровое обозначение степени защиты состоит из латинских букв IP и двух цифр. Первая из этих цифр характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токопроводящими и вращающимися частями, находящимися внутри машины, а также степень защиты самой машины от попадания в нее твердых посторонних тел; вторая цифра — от проникновения воды внутрь машины.

В обозначении IP23 первая цифра 2 указывает, что в машине обеспечена защита от возможного соприкосновения пальцев человека с токопроводящими и движущимися частями и попадания внутрь твердых посторонних тел диаметром не менее 12,5 мм. Цифра 3 указывает на обеспечение защиты от дождя, падающего на машину под углом не более 60° к вертикали, а в обозначении IP22 вторая цифра — от капель воды, падающих под углом не более 15° к вертикали.

В обозначении IP44 первая цифра 4 указывает на обеспечение защиты от соприкосновения инструмента, проволоки и других подобных предметов толщиной более 1 мм с токопроводящими частями внутри машины, а также от попадания внутрь предметов размерами не менее 1 мм. Вторая цифра 4 обозначает защиту от водяных брызг любого направления.

1.11 Лекция №11 (2 часа).

Тема: «Рабочий процесс, схема замещения, круговая диаграмма и характеристики АД»

1.11.1 Вопросы лекции:

1. Работа асинхронного двигателя при неподвижном роторе.
2. Работа асинхронного двигателя при вращающемся роторе.
3. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

1.11.2 Краткое содержание вопросов

1. Работа асинхронного двигателя при неподвижном роторе.

Холостой ход. Режимы работы асинхронной машины при заторможенном роторе наиболее просты для исследования, так как при этом обмотки статора и ротора пересекаются магнитным потоком с одной и той же скоростью, т. е. частоты ЭДС статора f_1 и ротора f_2 равны. Если считать, что вращающееся магнитное поле близко к круговому и, кроме того, высшие гармонические ЭДС подавляются из-за распределения обмоток в нескольких пазах и укорочения шага, то при анализе можно учитывать только первые гармонические ЭДС статора и ротора соответственно

(4.2)

$$E1 = 4,44f1 w1 ko61 \Phi m ;$$

(4.3)

$$E2 = 4,44f1 w2 ko62 \Phi m .$$

Отношение

(4.4)

$$E1 / E2 = w1 ko61 / (w2 ko62) = kE$$

называют коэффициентом трансформации ЭДС. Для основных гармонических обмоточные коэффициенты обычно равны 0,96—0,90 и поэтому в первом приближении можно считать

(4.5)

$$kE = w1 / w2$$

аналогично тому, как это наблюдается в трансформаторе. Если обмотка ротора разомкнута, то по ней ток не проходит, а следовательно, она не влияет на электромагнитные процессы в статоре. Этот режим называют режимом холостого хода. При холостом ходе для каждой фазы обмотки статора можно составить уравнение, полностью тождественное уравнению для первичной обмотки трансформатора при холостом ходе:

(4.6)

$$\dot{U}1 + \dot{E}1 + \dot{E}\sigma1 = \dot{I}0R1$$

где $E1$ — ЭДС, индуцируемая вращающимся магнитным потоком Φ , охватывающим обмотки ротора и статора; $E\sigma1 = 4,44f1 ko61 w1 \Phi\sigma1m$ — ЭДС, вызываемая потоком рассеяния обмотки статора; $I0R1$ — падение напряжения в обмотке статора, называемое током холостого хода. В соответствии с (4.6) можно построить векторную диаграмму асинхронной машины при холостом ходе (рис. 4.7, а). При этом вектор $E\sigma1$ заменяют противоположно направленным ему вектором $jI0X1$ индуктивного падения напряжения в обмотке

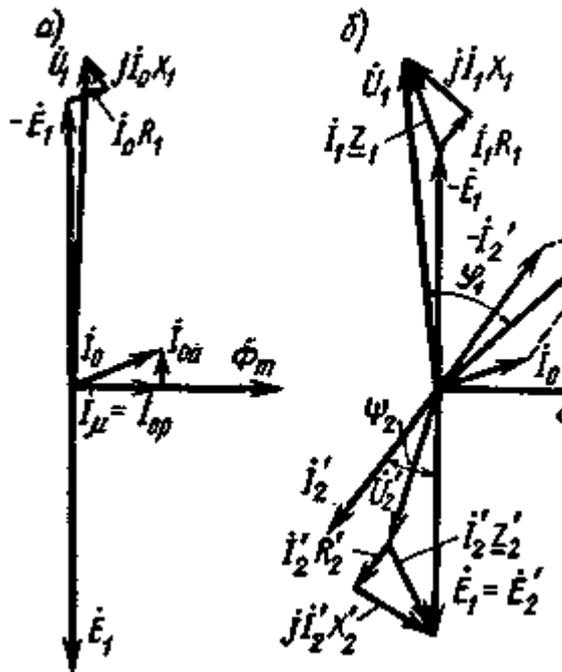


Рис. 4.7. Векторные диаграммы асинхронной машины при затормо женном

роторе

статора. В принципе указанная диаграмма аналогична векторной диаграмме трансформатора при холостом ходе, так как в этих машинах при заторможенном роторе протекают одинаковые электромагнитные процессы (обмотка статора аналогична первичной обмотке трансформатора, а обмотка ротора - вторичной обмотке). Однако ток холостого хода I_0 в асинхронном двигателе из-за наличия воздушного зазора между ротором и статором значительно больше, чем в трансформаторе (20 - 40% от номинального тока по сравнению с 0,5 - 3% у трансформатора), вследствие чего здесь нельзя пренебрегать падениями напряжения $\dot{I}R_1$ и $j\dot{I}X_1$ и пользоваться приближенным уравнением $\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = 0$, как это делают в некоторых случаях при построении векторной диаграммы трансформатора.

Относительно большой ток холостого хода в асинхронных машинах является одним из главных недостатков, так как вызывает увеличение потерь в обмотке статора (особенно в небольших машинах) и уменьшение коэффициента мощности машины. Для снижения тока холостого хода заводы - изготовители стремятся выполнять в асинхронных машинах минимально возможные с точки зрения конструкции и технологии зазоры. Так, например, у двигателей мощностью 5 кВт и менее зазоры между статором и ротором равны 0,1—0,3 мм.

При построении векторных диаграмм асинхронной машины принимают, что потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, создаваемые обмотками статора и ротора, совпадают по фазе с токами, проходящими по соответствующим обмоткам, и пропорциональны этим токам аналогично тому, как это принято в теории трансформатора. Это допущение является вполне обоснованным, так как указанные магнитные потоки замыкаются главным образом по воздуху (поперек соответствующих пазов, через коронки зубцов и вокруг лобовых соединений). Поэтому в асинхронной машине, так же как и в трансформаторе, можно считать, что при режимах, близких к номинальному, индуктивные сопротивления $X_1 = E_{\sigma 1} / I_1$ и $X_2 = E_{\sigma 2} / I_2$ не зависят от тока в соответствующих обмотках.

Работа машины под нагрузкой. Асинхронную машину с заторможенным ротором можно использовать в качестве трансформатора, если в цепь обмотки ротора (вторичной обмотки) включить сопротивление нагрузки Z_n .

Векторная диаграмма асинхронной машины с заторможенным ротором (рис. 4.7,6) аналогична диаграмме трансформатора и определяется формально теми же основными уравнениями:

(4.7)

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 &= \dot{I}R_1 + \\ j\dot{I}X_1 &; \\ \dot{U}_2 + \dot{E}_2 &= \dot{I}R_2 + \\ j\dot{I}X_2 &; \\ \dot{I} &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \end{aligned}$$

Однако наличие в асинхронной машине вращающегося потока обуславливает некоторые специфические особенности при взаимодействии токов в первичной и вторичной обмотках. Поскольку фазы обмотки ротора сдвинуты в пространстве, а токи в них имеют временной сдвиг, они создают бегущую волну МДС ротора F_2 , частота вращения которой

(4.8)

$$nF_2 = 60f_2 / p_2,$$

где f_2 и p_2 — частота тока и число пар полюсов ротора.

Так как при неподвижном роторе ЭДС в обмотках статора и ротора имеют одинаковую частоту, т. е. $f_2 = f_1$, то

$$nF_2 = 60f_1 / p_2 .$$

Асинхронная машина может работать только при равенстве частот вращения бегущих волн МДС статора F_1 и ротора F_2 . Следовательно, статор и ротор должны иметь одинаковое число полюсов, т. е. $p_1 = p_2 = p$. При этом условии бегущие волны МДС ротора и статора неподвижны одна относительно другой и взаимодействуют между собой, обеспечивая передачу мощности из статора в ротор так же, как и в трансформаторе. В результате ток ротора I_2 создает компенсирующую его составляющую тока статора I'_2 и результирующий магнитный поток остается примерно таким же, как и при режиме холостого хода. Таким образом, для асинхронной машины, как и для трансформатора, справедливо условие $\Phi \approx \text{const}$, т. е. магнитный поток при изменении режима работы изменяется мало. *Требование равенства частот вращения бегущих волн МДС ротора и статора жестко определяет лишь равенство числа полюсов.* Число фаз обмоток статора и ротора может быть любым.

Если выбор числа фаз m_1 обмотки статора определен питанием ее от трехфазной (в двигателях общепромышленного применения) или двухфазной (в микродвигателях) сети переменного тока, то число фаз m_2 обмотки ротора выбирают при проектировании машины, исходя из удобств конструкции и технологии изготовления ротора, т. е. можно выполнить ее многофазной в виде беличьей клетки, у которой m_2 равно числу стержней z_2 клетки. В такой обмотке отдельные «фазы» сдвинуты одна относительно другой на угол $\alpha = 2\pi/Z_2$, а число пар полюсов p_2 всегда равно числу пар полюсов p_1 вращающегося магнитного поля.

Схема замещения (рис. 4.8). Эта схема аналогична схеме замещения трансформатора, но ее параметры определяются другими коэффициентами приведения. Полагая $E'_2 = E_1 = kEE_2$, из условия равенства мощностей реального и приведенного роторов $m_2 E_2 I_2 = m_1 E'_2 I'_2$ находим

(4.9)

$$I'_2 = (m_2 / m_1) \cdot (E_2 / E'_2) \cdot I_2 = m_2 w_2 k_{об2} I_2 / (m_1 w_1 k_{об1}) = I_2 / k_i .$$

Величину $k_i = m_1 w_1 k_{об1} / (m_2 w_2 k_{об2})$ называют коэффициентом приведения (трансформации) токов. Из равенства электрических потерь $m_2 I_2^2 R_2 = m_1 I'^2 R'_2$ получаем

(4.10)

$$R'_2 = (m_2 / m_1) (I_2 / I'_2)^2 R_2 = k_i k_E R_2 .$$

Из равенства относительных индуктивных падений напряжений $I_2 X_2 / E_2 = I'_2 X'_2 / E'_2$ находим

(4.10а)

$$X'_2 = (E'_2 / E_2) (I_2 / I'_2) X_2 = k_i k_E X_2 .$$

Величину $k_E k_i$ называют коэффициентом приведения сопротивлений. При определении коэффициентов k_E и k_i для короткозамкнутой обмотки типа беличья клетка принимают $w_2 = 0,5$; $m_2 = z_2$ и $k_{об2} = 1$. Таким образом, теория работы асинхронной машины с заторможенным ротором в основном подобна теории работы трансформатора. Однако использование асинхронной машины

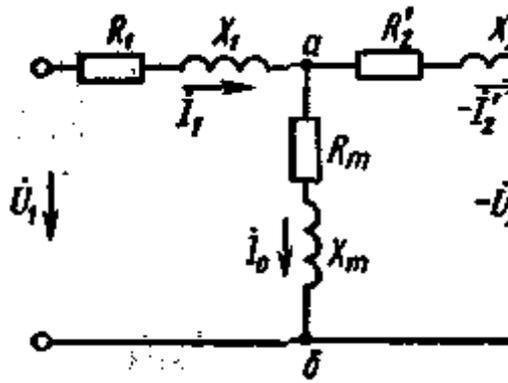


Рис. 4.8. Схема замещения асинхронной машины при заторможенном роторе

в качестве трансформатора обычно нецелесообразно, так как она значительно дороже трансформатора и имеет худшие эксплуатационные характеристики (большой ток холостого хода, меньший КПД и пр.). Только в некоторых специальных устройствах асинхронную машину используют в режиме работы трансформатора, т. е. при заторможенном роторе. Области применения асинхронной машины с заторможенным ротором. Рассмотренный режим работы используют в фазорегуляторах и индукционных регуляторах. Фазорегулятор. Если ротор трехфазной асинхронной машины установлен в положении (рис. 4.9, а), при котором оси одноименных фаз ротора и статора совпадают, то вращающийся магнитный поток пересекает обмотки статора и ротора одновременно. Следовательно, ЭДС E_1 и E_2 имеют одинаковую фазу. Если повернуть ротор навстречу магнитному потоку на угол α (рис. 4.9,б), то магнитный поток будет сначала набегать на фазу ax ротора, а потом на фазу $A-X$ статора. Вследствие этого ЭДС E_2 будет опережать E_1 по фазе на угол α . Поворачивая ротор в одну или другую сторону, можно получить требуемую фазу ЭДС:

$$e_2 = E_2 m \sin(\omega t \pm \alpha).$$

Асинхронные фазорегуляторы (рис.4.9,в) используют главным образом в схемах автоматики для компенсации фазовой погрешности, в управляемых выпрямителях, устройствах для испытаний электроизмерительных приборов и пр.

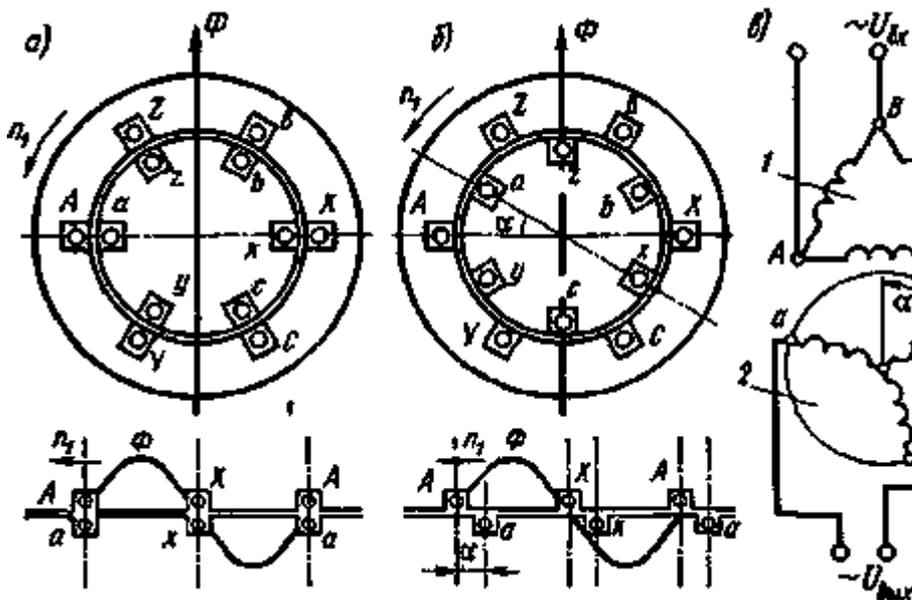


Рис.4.9. Схематический разрез (а, б) и схема (в) фазорегулятора: 1 - обмотка статора; 2 - обмотка ротора

Промышленность выпускает миниатюрные фазорегуляторы с одной обмоткой на роторе. Поворот ротора осуществляют с помощью червячного редуктора с самоторможением.

Индукционный регулятор. Этот регулятор выполняют в виде трехфазного поворотного автотрансформатора. Его применяют для регулирования трехфазного переменного напряжения, подаваемого на какие-либо устройства.

В качестве первичной обмотки регулятора обычно используют обмотку ротора I (рис. 4.10, a), вторичной служит обмотка статора 2 . Входное напряжение $U_{вх}$ подводят к началам a , b и c первичной, а также к началам A , B и C вторичной обмоток; выходное напряжение $U_{вых}$ снимают с концов X , Y и Z вторичной обмотки.

При подключении индукционного регулятора к сети трехфазного тока в каждой фазе его обмотки ротора и статора индуцируются ЭДС E_1 и E_2 . При холостом ходе для каждой фазы этой машины

$$\dot{U}_{вых} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 \approx \dot{U}_{вх} + \dot{E}_2.$$

Из уравнения (4.11) следует, что векторы $\dot{U}_{вх}$ и \dot{E}_2 складываются геометрически и поэтому действующее значение выходного напряжения $\dot{U}_{вых}$ зависит от угла сдвига фаз α между векторами $\dot{U}_{вх}$ и \dot{E}_2 . Этот угол можно изменять, поворачивая ротор, и получать таким образом различные величины выходного напряжения $\dot{U}_{вых}$ (рис. 4.10, b).

Достоинством индукционного регулятора является возможность плавного изменения выходного напряжения под нагрузкой без разрыва

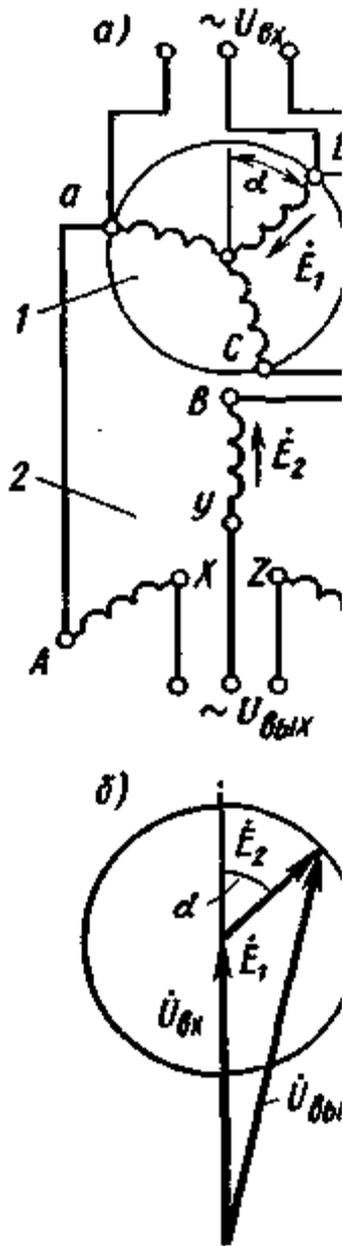


Рис. 4.10. Схема и векторная диаграмма напряжений трехфазного индукционного регулятора

цепи тока. При этом ток ротора, взаимодействуя с магнитным полем, создает электромагнитный момент, стремящийся повернуть ротор, поэтому необходимо принять меры для торможения ротора. В индукционных регуляторах малой мощности с червячной передачей от штурвала происходит самоторможение ротора из-за наличия этой передачи.

В рассмотренном индукционном регуляторе одновременно с изменением величины выходного напряжения изменяется и его фаза. В случае, если такое изменение нежелательно, применяют сдвоенный регулятор, у которого оба ротора расположены на общем валу. Обмотки ротора обоих регуляторов соединены между собой параллельно, а обмотки статора — последовательно (рис. 4.11, а), причем фазы этих обмоток подключены к сети с входным напряжением $U_{вх}$ так, чтобы направление вращения магнитного поля в обоих регуляторах было противоположным. При этом суммарный

вращающий момент на валу двойного регулятора равен нулю и он не требует специального тормозного устройства. При повороте двойного ротора в каком-либо направлении ротор одного из регуляторов поворачивается по направлению вращения поля, а ротор другого — в обратном направлении. Поэтому векторы вторичных ЭДС E_{21} и E_{22} поворачиваются в противоположных направлениях и при холостом ходе;

(4.11a)

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U}_{\text{вх}} + \dot{E}_{21} + \dot{E}_{22}.$$

При этом фаза напряжения $\dot{U}_{\text{вых}}$, как видно из векторной диаграммы (рис. 4.11,б), остается неизменной. Индукционные регуляторы выполняют мощностью до 500 кВт.

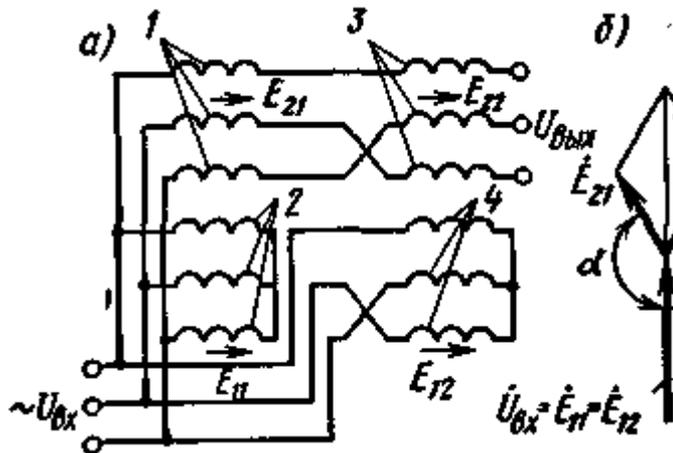


Рис. 4.11. Схема и векторная диаграмма напряжений двойного трехфазного индукционного регулятора: 1, 3 — обмотки статора; 2, 4 — обмотки ротора

2. Работа асинхронного двигателя при вращающемся роторе.

ЭДС и ток в обмотке ротора. Рассмотрим общий случай индуцирования ЭДС в обмотке ротора, увлекаемого вращающимся магнитным полем. Так как эта обмотка пересекается магнитным потоком с частотой $ns = n1 - n2$, частота индуцируемой в ней ЭДС

(4.12)

$$f2 = pns / 60 = p(n1 - n2) / 60.$$

Учитывая, что $p n1 / 60 = f1$ и $(n1 - n2) / n1 = s$, представим (4.12) в ином виде:

(4.12a)

$$f2 = f1s.$$

При вращении ротора ЭДС в его обмотке

(4.13)

$$E2s = 4,44f2 w2 kоб2 \Phi m = 4,44f1 sw2 kоб2 \Phi m.$$

Учитывая, что ЭДС при заторможенном роторе $E2 = 4,44f1 w2 kоб2 \Phi m$, получаем

(4.13a)

$$E2S = E2S.$$

Если обмотка ротора замкнута, по ней проходит ток с частотой $f2$, который создает бегущую волну МДС $F2$; вращающуюся относительно ротора с частотой

$$nF2 = 60f2 / p = 60f1 s / p = n1s = n1 - n2.$$

Направление вращения МДС ротора определяется порядком чередования максимумов тока в фазах, т. е. МДС ротора вращается в ту же сторону, что и магнитное поле статора (см. § 3.4). Легко заметить, что частота вращения МДС ротора относительно статора равна сумме частот $n2 + nF2 = n1$.

Следовательно, при вращении ротора МДС статора $F1$ и МДС ротора $F2$ вращаются в пространстве с одинаковой частотой, т. е. относительно друг друга они неподвижны. Таким образом, полученные выше для заторможенного ротора выводы о

взаимодействии токов в первичной и вторичной обмотках применимы и для вращающегося ротора.

Из изложенного следует, что в асинхронной машине магнитное поле, вращающееся с частотой $n1$, возникает в результате совместного действия бегущих волн МДС ротора и статора. Оно служит связующим звеном между статором и ротором, обеспечивая обмен энергией между ними, точно так же, как переменное магнитное поле в трансформаторе осуществляет передачу энергии из первичной обмотки во вторичную.

Энергетическая диаграмма. При работе асинхронной машины в двигательном режиме (рис. 4.12) к статору из сети подводится мощность

$$(4.14) \quad P_1 = m I U_1 I_1 \cos \phi_1 .$$

Часть этой мощности затрачивается на покрытие электрических потерь $\Delta P_{эл1}$ в активном сопротивлении обмотки статора и магнитных потерь $\Delta P_{м1}$ в статоре. В ротор посредством вращающегося магнитного поля передается электромагнитная мощность

$$(4.15) \quad P_{эм} = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{м1} .$$

Часть электромагнитной мощности, полученной ротором, тратится на покрытие электрических потерь $\Delta P_{эл2}$ в его обмотке. В машинах с фазным ротором возникают также потери в щеточных контактах на кольцах, которые обычно включают в потери $\Delta P_{эл2}$. Оставшаяся часть мощности $P_{эм}$ превращается в механическую мощность

$$(4.16) \quad P_{мех} = P_{эм} - \Delta P_{эл2} .$$

Магнитные потери $\Delta P_{м2}$ в стали ротора из-за малой частоты перемагничивания практически отсутствуют. Механическая мощность, за исключением небольших потерь на трение, является выходной полезной мощностью двигателя:

$$(4.17) \quad P_2 = P_{мех} - \Delta P_{тр} - \Delta P_{доб} ,$$

где $\Delta P_{тр}$ и $\Delta P_{доб}$ — соответственно потери на трение (механические) и добавочные потери.

Выразим электромагнитную и механическую мощности через электромагнитный вращающий момент M :

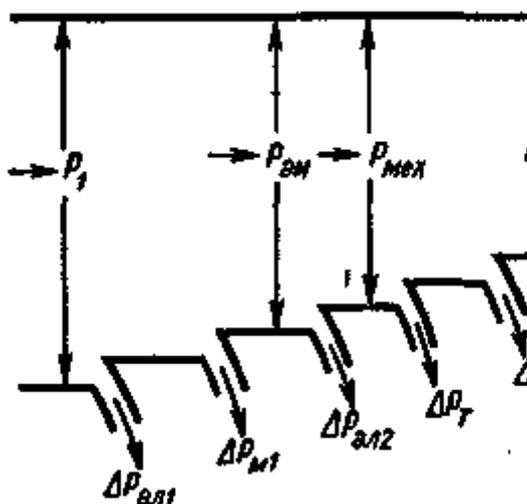


Рис. 4.12. Энергетическая диаграмма асинхронной машины

$$(4.18) \quad P_{эм} = M \omega_1 ; P_{мех} = M \omega_2 ,$$

где $\omega_1 = 2\pi n_1 / 60$ и $\omega_2 = 2\pi n_2 / 60$ — угловые скорости магнитного поля и ротора.

Из энергетической диаграммы (рис. 4.12) следует, что

(4.19)

$$\Delta P_{эл2} = P_{эм} - P_{мех}$$

или

(4.20)

$$\Delta P_{эл2} = M\omega_1 - M\omega_2 =$$

$$= M\omega_1 (\omega_1 - \omega_2) / \omega_1 = M\omega_1 s.$$

Из формулы (4.20) имеем

(4.21)

$$M = \Delta P_{эл2} / (\omega_1 s);$$

(4.22)

$$s = \Delta P_{эл2} / (M\omega_1) = \Delta P_{эл2} / P_{эм}.$$

Формулы (4.21) и (4.22) позволяют произвести анализ важнейших свойств асинхронного двигателя, а именно - установить связь между скольжением и КПД, а также зависимость электромагнитного момента от параметров машины и режима ее работы.

Связь между скольжением и КПД. Представим КПД асинхронного двигателя в виде

(4.23)

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_{эм} / P_1)(P_2 / P_{эм}) = \eta_1 \eta_2,$$

где η_1 и η_2 — КПД статора и ротора.

Поскольку

(4.24)

$$\eta_2 = P_2 / P_{эм} = (P_{эм} - \Delta P_{эл2} - \Delta P_{т} - \Delta P_{доб}) / P_{эм},$$

справедливо неравенство

(4.25)

$$\eta_2 < (P_{эм} - \Delta P_{эл2}) / P_{эм} < (1 - \Delta P_{эл2} / P_{эм}) < (1 - s).$$

Следовательно, $\eta < \eta_2 < (1 - s)$.

Таким образом, для работы асинхронного двигателя в номинальном режиме с высоким КПД необходимо, чтобы в этом режиме он имел небольшое скольжение. Обычно $s_{ном} = 0,01 \div 0,06$, при этом обмотку ротора выполняют с небольшим активным сопротивлением.

Номинальную частоту вращения ротора

(4.26)

$$n_{2ном} = n_1 (1 - s_{ном})$$

можно принять равной приблизительно $0,97n_1$.

Значения частоты вращения n_1 и приближенные значения n_2 для асинхронных двигателей общепромышленного применения при $f_1 = 50$ Гц в зависимости от числа полюсов $2p$ приведены ниже:

Число полюсов . . .				
.				
.	n_1 , об/мин			
		000	500	000 50
.			
.	n_2 , об/мин			
		910	450	70 30

Незначительное отклонение частоты вращения ротора от синхронной частоты вращения магнитного поля позволяет в технических документах указывать не величину $n_{2ном}$, а величину n_1 или число полюсов.

Электромагнитный момент. Формулу (4.21), полученную из энергетической диаграммы, преобразуем к более удобному для анализа виду, подставив в нее значения

$$(4.27)$$

$$\omega l = 2\pi n l / 60 = 2\pi f l / p;$$

$$(4.28)$$

$$\Delta P_{эл2} = m I_2 E_2 s \cos \psi_2,$$

где ψ_2 — угол сдвига фаз между ЭДС и током ротора.

При этом с учетом (4.13) получаем

$$(4.29)$$

$$M = (pm^2 k_{об2} / \sqrt{2}) \Phi_m I_2 \cos \psi_2 = cM \Phi_m I_2 \cos \psi_2,$$

где $cM = pm^2 k_{об2} / \sqrt{2}$ - постоянная.

Формула (4.29) справедлива не только для асинхронных машин, но и для электрических машин всех типов. Во всех этих машинах электромагнитный момент пропорционален произведению магнитного потока на активную составляющую тока ротора.

Поясним физический смысл этой формулы на примере асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. На рис. 4.13 изображена развертка ротора, где кружками показаны поперечные сечения стержней. Вращающийся магнитный поток (кривая индукции в воздушном зазоре $B\delta$), пересекая проводники обмотки ротора, индуцирует в них переменную синусоидальную ЭДС, мгновенное значение которой $e = B\delta l v$. Следовательно, кривая распределения индукции $B\delta$ вдоль окружности ротора представляет собой кривую распределения мгновенных значений ЭДС в стержнях, выраженную в другом масштабе. Направление этих ЭДС, определенное по правилу правой руки, показано крестиками и точками ниже сечений стержней. Мгновенное значение тока i в стержнях также изображается синусоидой (кривая i), сдвинутой относительно кривой ЭДС на угол ψ_2 . Направление тока в них отмечено крестиками и точками, проставленными внутри стержней.

Ток ротора, взаимодействуя с магнитным потоком, вызывает появление электромагнитных сил. При этом на каждый проводник действует усилие $f = B\delta li$. Распределение усилий по стержням представлено кривой f . Таким образом, к проводникам, лежащим на дуге $\pi - \psi_2$, приложены силы, увлекающие ротор за вращающимся магнитным потоком,

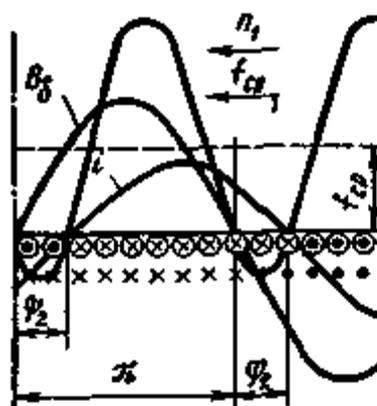


Рис. 4.13.

Кривые распределения индукции, тока и электромагнитных сил, действующих на проводники асинхронной машины

а на дуге ψ_2 — тормозящие силы. Поэтому при неизменной силе тока I_2 результирующее усилие $F_{рез}$, а следовательно, и вращающий момент M тем меньше, чем больше угол ψ_2 . В пределе при $\psi_2 = \pi/2$ момент $M = 0$, так как на половину проводников действует усилие, направленное в одну сторону, а на другую половину - такое же усилие, направленное в противоположную сторону.

Формула (4.29) позволяет установить связь между значением момента и физическими явлениями, происходящими в двигателе. Ею удобно пользоваться при

качественном анализе поведения двигателя в различных режимах. Недостаток формулы (4.29) заключается в том, что входящие в нее величины (Φ_m , I_2 и $\cos\psi_2$) не связаны непосредственно с напряжением сети и режимом работы машины, а их экспериментальное определение довольно сложно. Поэтому ниже выведена другая формула для электромагнитного вращающего момента, позволяющая более просто определять его значение и влияние на него различных параметров машины в эксплуатационных режимах.

3. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

Все преобразования энергии и потери, которые происходят в асинхронном двигателе, можно иллюстрировать при посредстве так называемой "энергетической" диаграммы.

На фиг. 88 показана такая диаграмма в форме "потока энергии", который течет слева направо. Как видно из фиг. 88, этот "поток" состоит из ряда "рукавов". Притекающая к статору асинхронного двигателя из сети электрическая энергия P_1 изображена на фиг. 88 в виде потока наибольшей ширины. По мере течения направо главное "русло" этого потока делается все уже и уже.

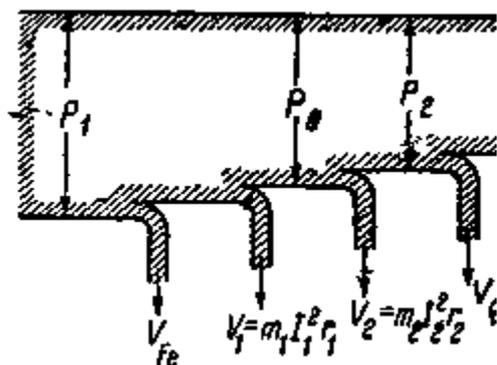
"Рукав" потока V_{Fe} изображает потери железа в двигателе (токи Фуко и гистерезис).

Рукав потока $V_1 = m_1 I_1^2 r_1$ изображает потери меди в статоре.

Потери меди в роторе $m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2$ изображены рукавом потока V_2 и, наконец, рукав потока V_p изображает механические потери.

Таким образом притекающая к статору мощность P_1 оказывается больше тормозной мощности двигателя P_2 на величину суммарных потерь фиг. 88.

На диаграмме фиг. 88, кроме того, очень наглядно представлены весьма характерные в теории асинхронных двигателей величины мощности P_2 и P_s .



Фиг. 88. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

а) Мощность P_2 есть мощность ротора; эта мощность меньше мощности, подведенной к статору, на величину суммы потерь $V_{Fe} + V_1 + V_2$; если из мощности ротора P_2 вычесть мощность, соответствующую механическим потерям V_p , то получится мощность на валу двигателя W_2 .

б) Мощность P_s носит обычно название мощности вращающегося потока; P_s равно сетевой мощности P_1 за вычетом суммарных потерь в статоре $V_{Fe} + V_1$.

Мощность P_s является, как будет видно ниже, весьма характерной величиной в теории асинхронных двигателей.

1.12 Лекция №12 (2 часа).

Тема: «Пуск АД и регулирование частоты вращения»

1.12.1 Вопросы лекции:

1. Пуск в ход трёхфазных асинхронных двигателей.
2. Короткозамкнутые асинхронные двигатели с повышенным пусковым моментом.
3. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.

1.12.2 Краткое содержание вопросов

1. Пуск в ход трёхфазных асинхронных двигателей.

Выше было показано, что условия работы асинхронного двигателя в режиме пуска значительно отличаются от условий его работы в нормальном режиме. В режиме пуска в обмотках ротора и статора проходят токи, значительно превышающие токи, протекающие в этих обмотках в номинальном режиме. Длительный ток приводит к перегреву обмоток двигателя и может вызвать сгорание обмоток и аварию двигателя.

Для того чтобы исключить такие явления, необходимо, с одной стороны, обеспечить ограничение пускового тока двигателя, а с другой стороны, по возможности уменьшить время его разгона. Время разгона двигателя от момента его включения до момента, когда ротор достигает номинальной частоты вращения, определяется ускорением ротора во время пуска

(49)

$$a_{\text{пуск}} = \frac{\omega_n}{c_p}$$

где ω_n — номинальная угловая скорость двигателя, с-1; $a_{\text{ср}}$ — среднее угловое ускорение во время пуска, с-2.

В свою очередь ускорение зависит от разности вращающего момента двигателя и момента сопротивления на его валу при постоянстве момента инерции:

(50)

$$J a = M_{\text{вр}} - M_{\text{с}}$$

где $M_{\text{вр}}$ — вращающий момент двигателя, Н·м; $M_{\text{с}}$ — статический момент сопротивления на валу двигателя, Н·м; J — момент инерции всех вращающихся частей, кг·м²; a — угловое ускорение ротора, с-2.

Пуск может быть успешно проведен, если в течение всего времени разгона $M_{\text{вр}} > M_{\text{с}}$.

Из выражения (50) следует также, что при заданной величине момента сопротивления ускорение будет тем больше, чем больше величина вращающего момента двигателя. Соответственно при увеличении вращающего момента двигателя в режиме пуска сократится время его разгона. Таким образом, второе требование, которое должно выполняться во время пуска асинхронного двигателя, заключается в создании достаточно большого вращающего момента в этом режиме.

Необходимо, кроме того, иметь в виду, что в тяжелых условиях пуска при недостаточно большом вращающем моменте разгон двигателя вообще невозможно осуществить. Это произойдет в том случае, если момент сопротивления на валу окажется большим, чем вращающий момент двигателя.

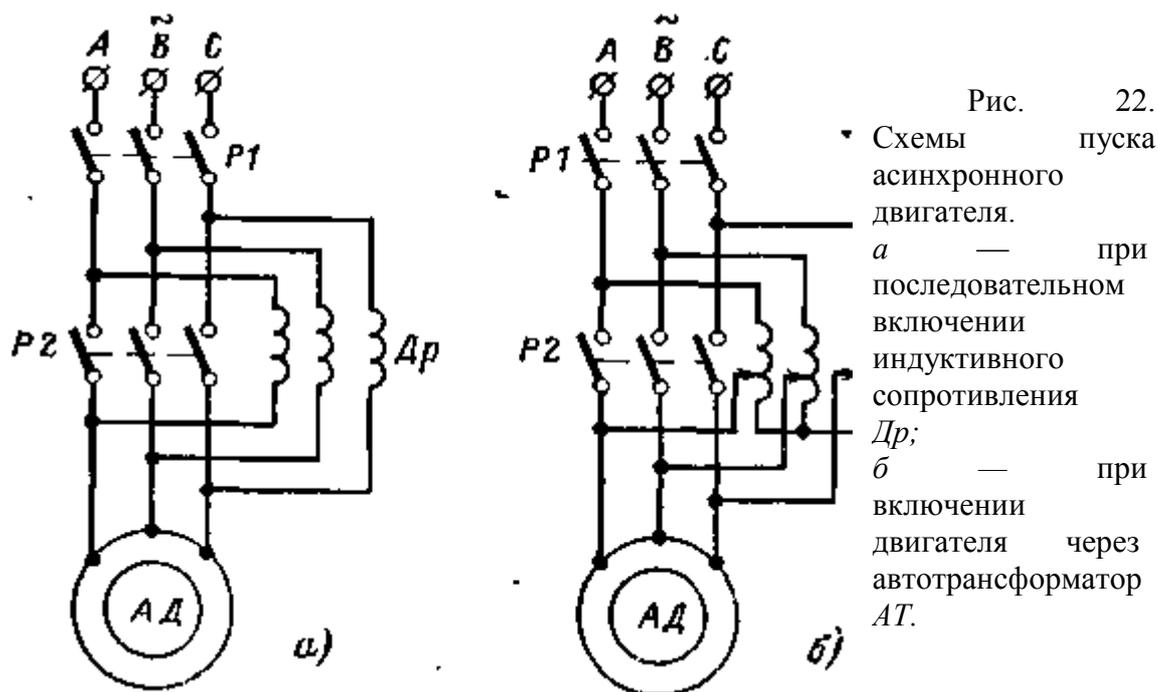
Рассмотрим теперь, каким образом выполняются эти два основных требования, предъявляемых к пусковому режиму асинхронного двигателя. Прежде всего отметим, что характеристики асинхронных двигателей в режиме пуска в большой степени зависят от его конструкции. В двигателях с фазным ротором имеются хорошие возможности для регулирования величины пускового тока и пускового момента введением сопротивлений в цепь ротора двигателя. Однако они являются более дорогими и сложными в эксплуатации. Более дешевые и надежные двигатели с короткозамкнутым ротором не позволяют осуществлять такого регулирования и их пусковые характеристики значительно хуже.

Наиболее часто применяются следующие способы пуска асинхронных двигателей:

прямое включение двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора; включение двигателя с понижением напряжения, подаваемого на обмотку статора; пуск в ход с введением сопротивления в фазную обмотку ротора.

Прямое включение асинхронного двигателя в сеть является наиболее простым способом пуска двигателя. В то же время в этом случае обмотки статора и ротора двигателя обтекаются большим пусковым током (током короткого замыкания), равным 4—7-кратному значению номинального. Поэтому очень важно, чтобы время пуска двигателя было при этом как можно меньшим.

Из всех способов пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора при данном способе пуска создается наибольший вращающий момент. Пусковой вращающий момент двигателя определяется при этом по формуле (48). Поскольку он все же относительно невелик, данный способ пуска применяется для приводов со средними и легкими условиями пуска. Отметим, что в настоящее время все большее распространение получают двигатели



с глубоким пазом, которые имеют улучшенные пусковые характеристики. Обладая всеми преимуществами двигателей с короткозамкнутым ротором, они развивают больший пусковой момент при меньшем пусковом токе по сравнению с двигателями обычного исполнения. Это позволяет применять такие двигатели для приводов с более тяжелыми условиями пуска, т. е. со значительными статическими моментами при малых частотах вращения ротора. Необходимо также иметь в виду, что большой ток, потребляемый двигателем, проходит не только по его обмоткам, но и по проводам сети и трансформатору. Поэтому в питающей сети создается падение напряжения, которое в случае пуска мощного двигателя может оказаться весьма значительным. В результате напряжение, подводимое к двигателю в этом режиме, сильно понизится и это вызовет дополнительное снижение вращающего момента двигателя. Поэтому прямое включение при пуске мощных двигателей допустимо при наличии достаточно мощной сети, выдерживающей прохождение больших токов без значительного падения напряжения. В современных мощных системах производится прямое включение на сеть двигателей с номинальной мощностью в несколько сотен киловатт.

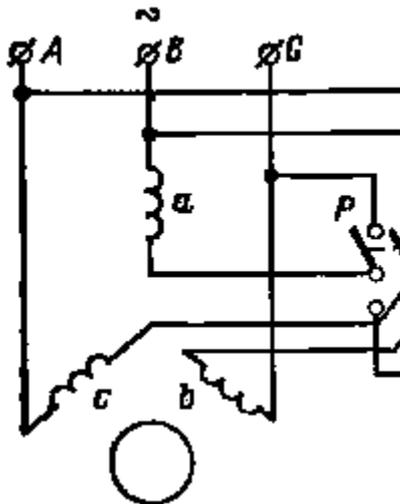


Рис. 23. Схема пуска двигателя с переключением обмоток со звезды на треугольник.

Включение двигателя при пониженном напряжении питающей сети позволяет уменьшить пусковой ток, потребляемый двигателем. Однако в этом случае снижается и развиваемый двигателем при пуске, причем это уменьшение происходит пропорционально квадрату подводимого к двигателю напряжения. Такой способ применяется для приводов с легкими условиями пуска.

Практически понижение напряжения достигается включением индуктивного сопротивления последовательно с обмоткой статора двигателя (рис. 22,а) или включением двигателя через автотрансформатор (рис. 22,б). При пуске по схеме на рис. 22,а вначале замыкают рубильник *P1*, а затем, когда ротор достигает достаточной частоты вращения, замыкают рубильник *P2*, включая двигатель на полное напряжение сети. При пуске с помощью автотрансформатора (рис. 22,б) вначале замыкается рубильник *P1*, а затем рубильник *P2*. Применение автотрансформатора позволяет ограничивать пусковой ток в питающей сети при меньшем снижении напряжения питающего двигатель, чем в случае включения индуктивного сопротивления. Следовательно, при этом в меньшей степени понижается пусковой момент двигателя.

К способам пуска с понижением напряжения можно отнести также пуск с переключением обмоток статора со звезды на треугольник (рис. 23). В режиме пуска переключатель *P* находится в положении 1, причем обмотка статора включена по схеме звезды. После того как ротор достигает установившейся частоты вращения, переключатель необходимо перевести в положение 2 и обмотки статора будут включены по схеме треугольника.

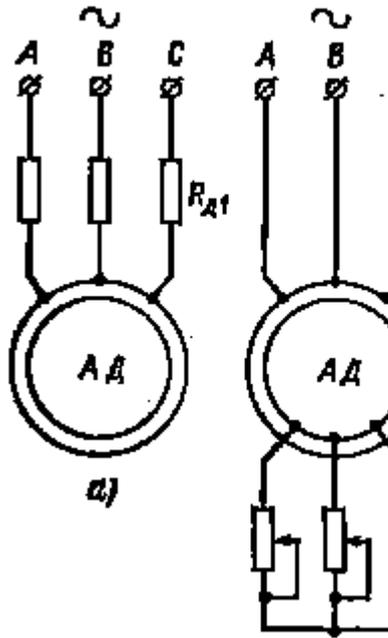


Рис. 24. Схемы асинхронных двигателей с введением сопротивлений-резисторов в цепь статора (а) и в цепь ротора (б).

При данном способе пуска фактически понижается величина напряжения, подводимого к каждой фазе двигателя, поскольку при одинаковом напряжении в линии напряжение на фазу в схеме звезды в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем в схеме треугольника. Пусковой ток в сети при соединении обмотки статора звездой понижается в 3 раза по сравнению с соединением статора треугольником. Однако в 3 раза понижается также пусковой момент.

Для приводов с наиболее тяжелыми условиями пуска следует использовать двигатели с фазной обмоткой ротора. *Введение сопротивления в цепь ротора* позволяет, с одной стороны, ограничить пусковой ток двигателя, а с другой стороны — повысить пусковой момент. Схема включения сопротивлений (резисторов) в цепь ротора двигателя изображена на рис. 24,б.

Подставляя $s_{\max} = 1$ в формулу (45), можно найти величину дополнительного сопротивления в цепи ротора, при котором пусковой момент для данной характеристики оказывается равным максимальному моменту,

$$(51) \quad r'_{\text{д}} = x_1^2 - r'^2 + x'^2.$$

Последовательно изменяя по мере увеличения частоты вращения двигателя сопротивление в цепи ротора, можно добиться того, чтобы весь процесс пуска проходил при вращающем моменте, близком к максимальному. Это позволяет получить возможно меньшее время пуска двигателя.

2. Короткозамкнутые асинхронные двигатели с повышенным пусковым моментом.

Типы двигателей. Стремление повысить пусковой момент короткозамкнутых асинхронных двигателей без увеличения активного сопротивления обмотки ротора (а следовательно, и потерь энергии в нем) привело к появлению специальных конструкций двигателей, называемых двигателями с повышенным пусковым моментом. К ним относятся двигатели с двойной беличьей клеткой и с ротором, имеющим глубокие пазы (глубокопазные двигатели).

Двигатель с двойной беличьей клеткой (рис. 4.32, а). Ротор этого двигателя имеет две короткозамкнутые обмотки. Наружная клетка является пусковой; она выполнена из стержней малого поперечного сечения и поэтому обладает повышенным активным сопротивлением $R_{2п}$. Внутренняя клетка является основной рабочей обмоткой двигателя; она выполнена из стержней сравнительно большого поперечного сечения и обладает малым активным сопротивлением $R_{2р}$.

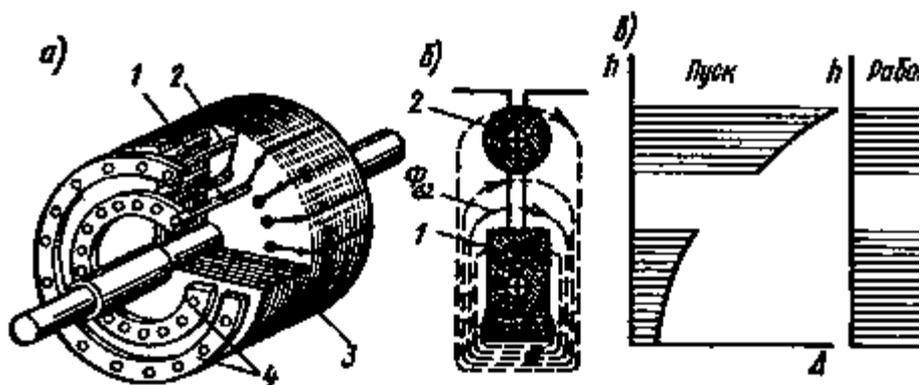


Рис. 4.32. Общий вид (а), разрез паза (б) ротора двигателя с двойной беличьей клеткой и распределение плотности тока Δ по высоте A в клетках при пуске и работе двигателя (в): 1 - рабочая клетка; 2 - пусковая клетка; 3 - сердечник ротора; 4 - короткозамыкающие кольца

Индуктивные сопротивления клеток определяются значениями потоков рассеяния $\Phi\sigma_2$, сцепленных с их стержнями. Так как пусковая клетка расположена близко к поверхности ротора, то сцепленные с ее стержнями потоки рассеяния $\Phi\sigma_2$ (рис. 4.32,б) сравнительно невелики, и она обладает малым реактивным сопротивлением $X_{2п}$. Рабочая клетка, наоборот, удалена от поверхности ротора, поэтому она имеет большое реактивное сопротивление $X_{2р}$. Увеличение реактивного сопротивления рабочей клетки обеспечивается благодаря соответствующему выбору ширины и высоты паза ротора, а также выбору щели между стержнями обеих клеток. Для повышения активного сопротивления пусковой клетки стержни обычно изготавливают из марганцовистой латуни или бронзы. Стержни рабочей клетки выполняют из меди. Торцовые короткозамыкающие кольца делают медными. В некоторых случаях обе обмотки объединяют и выполняют литыми из алюминия. В электрическом отношении обе клетки включены параллельно, вследствие чего ток ротора распределяется между ними обратно пропорционально их полным сопротивлениям $z_{2п}$ и $z_{2р}$:

$$(4.60)$$

$$I_{2п} / I_{2р} = Z_{2р} / Z_{2п} = \sqrt{R_{22р} + X_{22р}} / \sqrt{R_{22п} + X_{22п}}.$$

В начальный момент пуска, когда $s = 1$ и частота тока в роторе f_2 максимальна, индуктивные сопротивления клеток во много раз больше их активных сопротивлений, поэтому

$$(4.61a)$$

$$I_{2п} / I_{2р} \approx X_{2р} / X_{2п},$$

т. е. ток ротора проходит в основном через пусковую клетку (рис. 4.32, в), у которой $X_{2п} < X_{2р}$. В то же время эта клетка обладает сравнительно большим активным сопротивлением, а следовательно, создает повышенный пусковой момент.

По мере разгона ротора уменьшается скольжение s и частота f_2 , а поэтому изменяются индуктивные сопротивления $X_{2р}$ и $X_{2п}$ и распределение тока между клетками. Из (4.60) следует, что ток начинает постепенно переходить из пусковой клетки в рабочую. По окончании процесса разгона величина s становится малой и роль реактивных сопротивлений в токораспределении оказывается незначительной. В этом случае распределение токов определяется отношением

$$(4.61б)$$

$$I_{2п} / I_{2р} \approx R_{2р} / R_{2п},$$

т. е. ток начинает проходить в основном по рабочей клетке, где $R_{2р} < R_{2п}$. Таким образом, в рассматриваемом двигателе ток в начальный момент пуска вытесняется в наружную

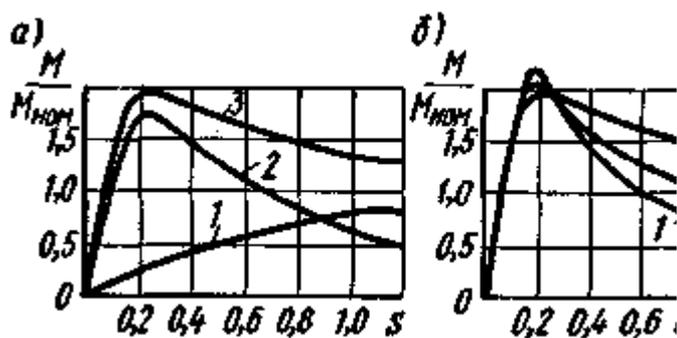


Рис. 4.33. Зависимости $M=f(s)$ асинхронных двигателей с различными конструктивными исполнениями ротора

пусковую клетку, создающую большой пусковой момент, а по окончании процесса пуска проходит по рабочей клетке с малым активным сопротивлением, вследствие чего двигатель работает с высоким КПД. Поэтому двигатели с повышенным пусковым моментом часто называют двигателями с вытеснением тока.

Зависимость $M = f(s)$ для двигателей с двойной беличьей клеткой можно построить, рассматривая действие пусковой и рабочей обмоток отдельно. Поскольку пусковая обмотка имеет повышенное сопротивление, максимум образуемого ею момента смещен в область больших скольжений (рис. 4.33, а, кривая 1). Характеристика $M = f(s)$, создаваемая рабочей обмоткой (кривая 2), имеет такую же форму, как и характеристика короткозамкнутого двигателя нормального исполнения; у нее максимум момента соответствует скольжению $s_{кр} = 0,1 \div 0,2$. Результирующую характеристику двигателя (кривая 3) можно получить путем суммирования ординат кривых 1 и 2. У двигателя с двойной беличьей клеткой пусковой момент значительно больше, чем у короткозамкнутого двигателя нормального исполнения. Кратность пускового момента этого двигателя $M_{п} / M_{ном} = 1,3 \div 1,7$, а кратность пускового тока $I_{п} / I_{ном} = 4 \div 6$.

Глубокопазный двигатель. Принцип действия этого двигателя основан также на явлении вытеснения тока. Беличья клетка выполнена из узких медных или алюминиевых стержней (рис. 4.34, а), заложенных в глубокие пазы ротора, высота которых в 6—12 раз больше ширины. Такие стержни можно рассматривать как проводники, разделенные на большое число слоев. Из рис. 4.34, б видно, что «нижние» слои проводников сцеплены с большей частью потока рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$, чем «верхние», и имеют соответственно большую индуктивность. В начальный момент пуска при $s = 1$ частота изменения тока в роторе большая и распределение тока по параллельным слоям определяется в основном их индуктивным сопротивлением. Поэтому при пуске происходит вытеснение тока в

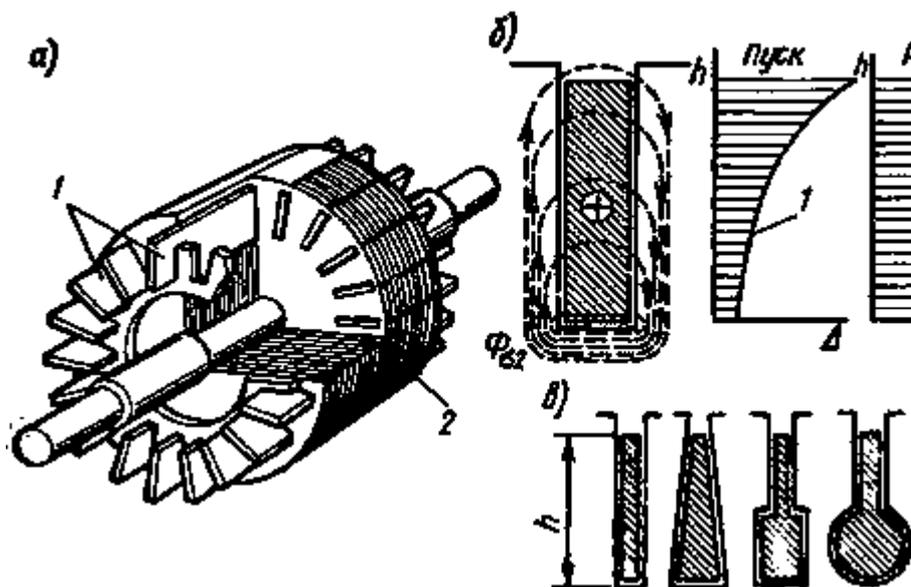


Рис. 4.34. Общий вид (а), разрез паза (б) ротора глубокопазного двигателя и разновидности пазов глубокопазных двигателей (в): 1 — стержни беличьей клетки; 2 — сердечник ротора

«верхние» слои (плотность тока Δ по высоте проводника распределяется согласно кривой 1, рис. 4.34,б), что равносильно увеличению активного сопротивления стержня. В результате происходит повышение пускового момента двигателя. При $s \approx s_{ном}$ частота тока в роторе мала (например, при $f = 50$ Гц и $s \approx 0,02$, частота $f_2 \approx 1$ Гц) и соответственно меньше его индуктивное сопротивление. Вытеснения тока в этом случае не происходит; распределение его происходит приблизительно равномерно по высоте стержня (рис. 4.34,б, кривая 2). При этом резко уменьшается активное сопротивление ротора и потери мощности $\Delta P_{эл2}$; одновременно увеличивается поток рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$, а следовательно, и сопротивление X_2' .

Изменение параметров R_2' и X_2' глубокопазного двигателя в зависимости от скольжения приводит к тому, что характеристика $M = f(s)$ (см. рис. 4.33,б, кривая 2) близка к соответствующей характеристике двигателя с двойной беличьей клеткой (кривая 3). Здесь для сравнения показана характеристика $M = f(s)$ для двигателя с короткозамкнутым ротором нормального исполнения (кривая 1). Существуют разновидности глубокопазных двигателей с трапецидальной, двухступенчатой и колбообразной формой стержней (рис. 4.34, в).

Магнитный поток рассеяния ротора двигателя с повышенным пусковым моментом по сравнению с магнитным потоком рассеяния ротора двигателя нормального исполнения увеличен, а поэтому он имеет несколько уменьшенный $\cos \phi_1$ при номинальном режиме и обладает пониженной перегрузочной способностью k_m .

Явление вытеснения тока при пуске и связанное с этим увеличение активного и уменьшение индуктивного сопротивлений встречается (в меньшей степени) и у двигателей с короткозамкнутым ротором нормального исполнения. Чтобы усилить эффект вытеснения тока в короткозамкнутых двигателях мощностью до 100 кВт, пазам ротора и стержням придают специальную, сильно вытянутую в радиальном направлении форму (см. рис. 4.4, з). В микродвигателях размеры пазов ротора обычно настолько малы, что использование эффекта вытеснения тока оказывается невозможным.

3. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.

Регулирование частоты вращения двигателей определяется в соответствии с требованиями технологических процессов и тех производственных механизмов, в которых они используются. Оно характеризуется следующими основными показателями:

Диапазон регулирования D (предел изменения частоты вращения). Под этой величиной понимается отношение максимальной частоты вращения двигателя n_{\max} к его минимальной частоте n_{\min} :

$$(52)$$

$$D = n_{\text{макс}} / n_{\text{мин.}}$$

Плавность регулирования, которая характеризуется минимальным скачком частоты вращения двигателя при переходе с одной механической характеристики на другую.

Направление возможного изменения частоты вращения двигателя (зона регулирования). При номинальных условиях работы (напряжении и частоте питающей сети) двигатель имеет естественную механическую характеристику. При регулировании частоты вращения соответствующие им характеристики будут отличаться от естественной. Эти характеристики носят название искусственных. Таким образом, асинхронный двигатель помимо естественной может иметь множество искусственных (регулируемых) характеристик. С помощью одних методов регулирования удастся получить искусственные характеристики, располагающиеся только ниже естественной. Другие методы обеспечивают регулирование частоты вращения выше и ниже естественной характеристики.

Экономичность регулирования определяется по дополнительным капитальным затратам, необходимым при создании регулировочных устройств, а также по потерям электроэнергии при регулировании.

Следует отметить, что в ряде случаев, например, для механизмов, работающих сравнительно малое время на искусственных характеристиках, потери электроэнергии даже при неэкономичных способах регулирования будут невелики (работа на низких доводочных скоростях лифтов, кранов и др.). При этом более рационально применение простых и дешевых способов регулирования частоты вращения двигателей, даже и неэкономичных с точки зрения потребления энергии.

Допустимая нагрузка двигателя при работе его на регулировочных характеристиках ограничивается величинами токов в статорной и роторных цепях. Эта нагрузка определяется допустимым нагревом двигателя и во многом определяется механическими характеристиками производственных механизмов, моментом сопротивления на валу, условиями нормального пуска двигателя и др.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей может производиться способом воздействия на него со стороны статора или со стороны ротора.

При воздействии со стороны статора существуют следующие основные способы регулирования частоты вращения:

введением и регулировкой сопротивления (резисторов) в цепи статора (реостатное регулирование);

изменением числа пар полюсов;

изменением частоты питающего напряжения.

При воздействии со стороны ротора регулирование частоты вращения производится:

введением и регулировкой активного сопротивления (резисторов) в цепи ротора (реостатное регулирование);

введением в цепь ротора добавочной э. д. с. с частотой, равной основной э. д. с. ротора.

Из указанных практическое применение нашли способы регулировки: реостатный, изменением полюсности обмотки статора и изменением частоты в питающей сети.

Реостатное регулирование частоты вращения асинхронных двигателей является одним из наиболее простых способов регулирования и может осуществляться введением добавочных активных сопротивлений (резисторов) в цепь статора $R_{д1}$ (рис. 24.а) или ротора $R_{д2}$ (рис. 24.б).

Однако первый способ не нашел широкого практического распространения из-за ряда существенных недостатков— снижения максимального (критического) момента и перегрузочной способности при увеличении сопротивления, малого диапазона регулирования частоты вращения и др. Данный способ регулирования применяется для ограничения пускового момента асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором,

используемых, например, в приводах металлорежущих станков. Это необходимо для предотвращения ударов в механических передачах станков.

Для регулирования в широких пределах частоты вращения асинхронных двигателей с контактными кольцами используется введение дополнительных активных сопротивлений (резисторов) в роторную цепь (рис. 24,б). Эти резисторы $R_{д2}$ подсоединяются к выводам щеток контактных колец. При этом ток в роторной цепи снижается по мере увеличения сопротивления, что вызывает уменьшение электромагнитного момента. При снижении момента до величины, меньшей чем статический момент сопротивления на валу, $M < M_c$ происходит уменьшение частоты вращения двигателя меньше первоначальной $n < n_E$, т. е. увеличение скольжения s . В свою очередь это вызовет увеличение э. д. с. ротора E_2 [см. уравнение (13)], а значит, возрастут ток ротора I_2 [см. формулу (25)] и электромагнитный момент двигателя M [см. формулу (43)]. Когда момент возрастет до $M = M_c$, изменение частоты вращения закончится и асинхронный двигатель станет работать в установившемся режиме с новой частотой $n_1 < n_E$.

При этом важно заметить, то изменение в широких пределах частоты вращения двигателя при данном способе регулирования не повлечет за собой изменения максимального (критического) момента M_{\max} (см. рис. 21). Таким образом, перегрузочная способность двигателя при регулировании не снижается.

Если двигатель работает с некоторым приводимым механизмом на валу с статическим моментом сопротивления M_c (см. рис. 21), то на естественной характеристике установившемуся режиму его работы будет соответствовать точка E . При введении добавочных сопротивлений—резисторов $R'_{д2}$, $R''_{д2}$, $R'''_{д2}$ — в цепь ротора произойдет соответствующий переход двигателя в новые режимы работы (точки 1, 2, 3) с меньшими величинами частот вращения $n_E > n_1 > n_2 > n_3$. Характеристики двигателя по мере увеличения сопротивления резисторов в цепи ротора $R_{д2}$ становятся более мягкими. Наиболее жесткой характеристикой в данном случае будет естественная характеристика.

Работа двигателя на естественной характеристике в данном случае будет наиболее стабильной и устойчивой. Это означает, что при изменении момента сопротивления M_c в процессе работы производственного механизма отклонения частоты вращения двигателя будут минимальными.

Технические показатели данного способа регулирования следующие.

Диапазон регулирования сравнительно небольшой — порядка 2:1 и ограничивается вероятностью нестабильности работы двигателя при больших значениях сопротивлений резисторов $R_{д2}$.

Плавность регулирования при реостатном регулировании небольшая и определяется числом ступеней регулирования. Переключение ступеней осуществляется, как правило, с помощью магнитных контроллеров, контакторов и реле.

Изменение частоты вращения при реостатном регулировании возможно лишь вниз от основной.

Данный способ регулирования не экономичен, однако прост и удобен в эксплуатации.

Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов в обмотке статора обеспечивается благодаря изменению частоты вращения магнитного поля статора.

Как следует из формулы (7), при неизменной частоте в питающей сети частота вращения магнитного поля и определяемая ею частота вращения ротора изменяются обратно пропорционально числу полюсов. Так как число полюсов, фиксированное ступенями, может быть равно 2, 4, 6, 8, 10 и т. д., что при частоте в питающей сети, равной 60 Гц, соответствует синхронной частоте вращения 3000, 1500, 1000, 750, 600 об/мин и т. д., то указанным способом может быть обеспечено только *ступенчатое* регулирование.

Изменение числа пар полюсов обычно достигается следующими способами:

1. На статоре двигателя укладываются две не связанные между собой обмотки, имеющие разное число пар полюсов, например p_1 и p_2 . При подключении одной из обмоток к сети переменного тока, например, с числом полюсов p_2 двигатель будет иметь синхронную частоту вращения, соответствующую данному числу полюсов (см. рис. 25, а):

$$n_2 = \frac{0f}{2}$$

Другая обмотка при этом обесточена. При необходимости получения другой частоты вращения n_1 обмотка с числом полюсов p_2 отключается и включается с числом полюсов p_1 . Такие асинхронные двигатели получили название *двухобмоточных*.

2. На статоре укладывается одна обмотка, допускающая переключение на разное число полюсов. Наиболее широко распространены две схемы переключения статорной обмотки двухскоростных двигателей: с треугольника на двойную звезду Δ/Y_Y и со звезды на двойную звезду Y/Y_Y (звезду с двумя параллельными ветвями).

Схемы соединения обмоток Δ/Y_Y применяются для получения примерно одинакового вращающего момента при обеих частотах вращения (рис. 25,а). Такие схемы применяются, например, у асинхронных двигателей привода компрессоров, металлорежущих станков и др. Схемы соединения обмоток Y/Y_Y используются для приводов вентиляторов (рис. 25,б).

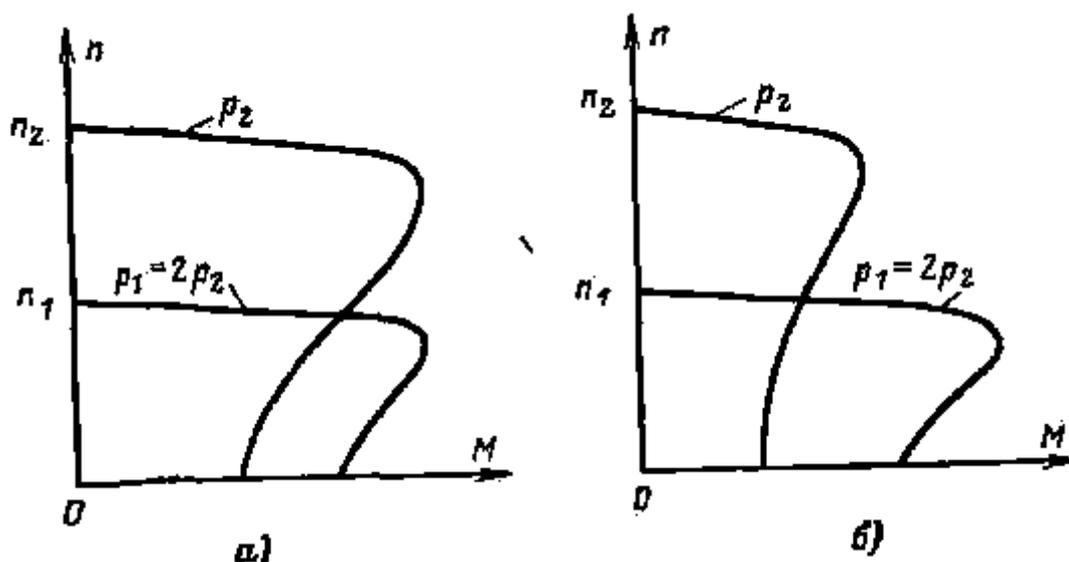


Рис. 25. Механические характеристики при регулировании частоты вращения асинхронных двигателей изменением числа пар полюсов при переключении статорной обмотки.

а — треугольник (число пар полюсов $2p = p_1$) — двойная звезда ($2p = p_2$); б — звезда ($2p = p_1$) — двойная звезда ($2p = p_2$).

Кроме рассмотренных вариантов двухскоростных асинхронных двигателей нашли применение трехскоростные и четырехскоростные двигатели. В трехскоростных двигателях размещаются одна переключаемая и одна неперключаемая обмотки, а в четырехскоростных две переключаемые обмотки, позволяющие получить четыре синхронные частоты вращения, например 3000/1500/1000/500 об/мин.

Двигатели с переключением числа пар полюсов, как правило, имеют короткозамкнутый ротор с обмоткой типа беличьей клетки. Такой ротор обеспечивает возможность работы без дополнительных пересоединений в его цепи. В случае фазного ротора в многоскоростных двигателях потребовалось бы производить переключения

одновременно на статоре и роторе, что усложнило бы конструкцию ротора и эксплуатацию таких машин.

Электродвигатели с короткозамкнутым ротором могут иметь ряд специфических ненормальностей из-за неправильного соотношения числа пазов статора Z_1 , ротора Z_2 и числа полюсов $2p$.

Ненормальности заключаются в том, что двигатель может «прилипнуть», т. е. не приходит во вращение при подключении к сети, или «застрять», т. е., начавши вращаться, останавливается на некоторой скорости, или при вращении сильно гудит.

Во избежание указанных явлений должны быть выдержаны следующие соотношения:

$$\begin{array}{l}
 Z_2 \neq Z_1 \\
 Z_2 \neq 0,5Z_1 \\
 Z_2 \neq 2Z_1 \\
 Z_2 \neq 6pk \\
 Z_2 \neq 6pk + 2p \\
 Z_2 \neq Z_1 \pm p,
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 Z_2 = Z_1 + 2p, \\
 Z_2 = 0,5Z_1 \pm p, \\
 Z_2 = 2Z_1 + 2p, \\
 Z_2 = 6pk \\
 Z_2 = 6pk \pm (2p \pm 1),
 \end{array} \right.$$

где k — любое целое число от одного до четырех. Здесь же следует заметить, что изменение числа полюсов может иметь место не только при регулировании частоты вращения способом изменения его полюсности, но и при ремонте, связанном с изменением номинальной частоты вращения.

К положительным показателям многоскоростных асинхронных двигателей следует отнести экономичность регулирования частоты вращения ротора. Недостатком данного способа регулирования является указанная выше невозможность плавного изменения частоты вращения.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением частоты в питающей сети является наиболее экономичным способом регулирования и позволяет получить хорошие механические характеристики электропривода (рис. 26). При изменении частоты питающей сети обеспечивается изменение частоты вращения магнитного поля асинхронного двигателя, что также следует из формулы (7).

Источник питания двигателя должен осуществлять преобразование напряжения стандартной частоты сети $f_n = 50$ Гц в напряжение с требуемой частотой. Одновременно с изменением частоты должна регулироваться по определенному закону и величина подводимого к двигателю напряжения $U_{рег}$, чтобы обеспечить высокую жесткость механической характеристики.

При регулировании частоты вращения асинхронных двигателей за счет изменения частоты в питающей сети возможны обеспечения различных режимов работы: с постоянным вращающим моментом $M = const$;

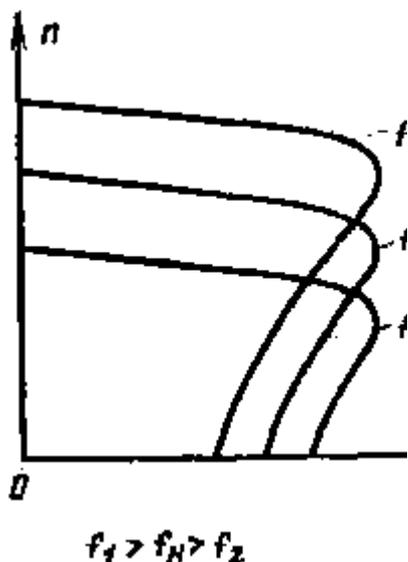


Рис. 26. Механические характеристики при регулировании частоты вращения асинхронных двигателей с помощью изменения частоты питающего напряжения (с учетом влияния активного сопротивления статора).

с постоянной мощностью на валу $P = \text{const}$;
с моментом, пропорциональным квадрату частоты,
 $M \sim f^2$.

Зависимости между регулируемым напряжением и частотой с учетом влияния активного сопротивления статора, изменения жесткости механических характеристик, насыщения стали, ухудшения теплоотдачи на низких частотах вращения ротора двигателя имеют довольно сложный характер.

В качестве источника питания могут применяться электромашинные вращающиеся преобразователи, использующие электрические машины, или статические преобразователи, постоянные с использованием полупроводниковых и магнитных приборов (более подробно см. [Л. 2,4]). Положительным свойством частотного регулирования является возможность плавного регулирования в широком диапазоне, в обе стороны от естественной характеристики (в том числе возможно вращение двигателя с частотой, большей номинальной). При регулировании обеспечиваются жесткость характеристик и высокая перегрузочная способность.

Недостатками данного способа регулирования можно считать большую сложность преобразовательного устройства, сравнительно высокую стоимость оборудования и др.

Однако в ряде случаев в приводах металлообрабатывающих и деревообрабатывающих станков, электроверетен, вентиляторов аэродинамических труб частотное регулирование является единственно возможным.

Кроме описанных существуют другие способы регулирования частоты вращения двигателей: каскадные схемы включения, несимметричное включение статорных и роторных обмоток, изменение питающего напряжения двигателя с помощью магнитных усилителей и тиристоров и другие, которые имеют меньшее распространение по сравнению с описанными выше.

1.13 Лекция №13 (2 часа).

Тема: «Специальные режимы асинхронных машин»

1.13.1 Вопросы лекции:

1. Устройство и принцип действия однофазного асинхронного двигателя.
2. Асинхронный конденсаторный двигатель.
3. Работа трёхфазного асинхронного двигателя от однофазной сети.
4. Специальные режимы работы асинхронных машин.

1.13.2 Краткое содержание вопросов

1. Устройство и принцип действия однофазного асинхронного двигателя.

Области применения. Асинхронные двигатели небольшой мощности (15 — 600 Вт) применяют в автоматических устройствах и электробытовых приборах для привода вентиляторов, насосов и другого оборудования, не требующего регулирования частоты вращения. В электробытовых приборах и автоматических устройствах обычно используют однофазные микродвигатели, так как эти приборы и устройства, как правило, получают питание от однофазной сети переменного тока.

Принцип действия и устройство однофазного двигателя. Обмотка статора однофазного двигателя (рис. 4.60, а) расположена в пазах, занимающих примерно две трети окружности статора, которая соответствует паре полюсов. В результате

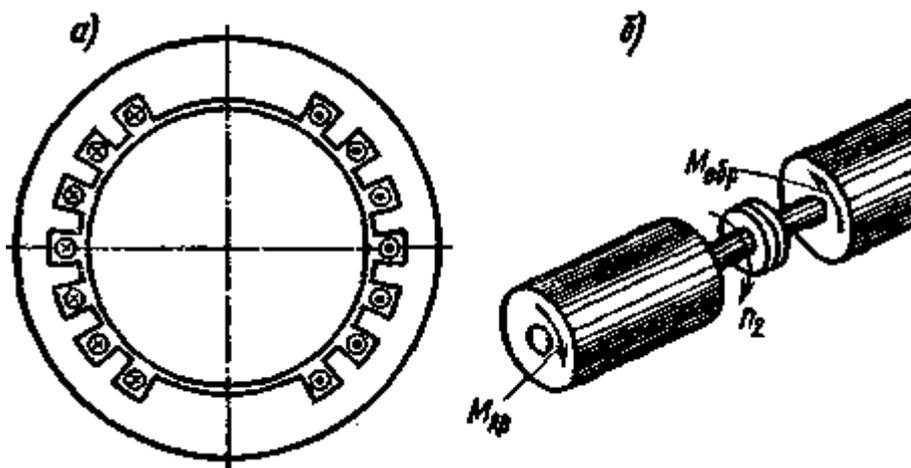


Рис. 4.60. Поперечный разрез статора однофазного асинхронного двигателя (а) и направление вращающих моментов, действующих на его ротор (б)

(см. гл. 3) распределение МДС и индукции в воздушном зазоре близко к синусоидальному. Поскольку по обмотке проходит переменный ток, МДС пульсирует во времени с частотой сети. Индукция в произвольной точке воздушного зазора

(4.99)

$$B_x = B_m \sin \omega t \cos (\pi x / \tau).$$

Таким образом, в однофазном двигателе обмотка статора создает неподвижный поток, изменяющийся во времени, а не круговой вращающийся поток, как в трехфазных двигателях при симметричном питании.

Для упрощения анализа свойств однофазного двигателя представим (4.99) в виде

(4.99а)

$$B_x = 0,5 B_m \sin (\omega t - \pi x / \tau) + 0,5 B_m \sin (\omega t + \pi x / \tau),$$

т. е. заменим неподвижный пульсирующий поток суммой идентичных круговых полей, вращающихся в противоположных направлениях и имеющих одинаковые частоты вращения: $n_1 \text{пр} = n_1 \text{обр} = n_1$. Поскольку свойства асинхронного двигателя при круговом вращающемся поле подробно рассмотрены в § 4.7 — 4.12, анализ свойств однофазного двигателя можно свести к рассмотрению совместного действия каждого из вращающихся полей. Иными словами, однофазный двигатель можно представить в виде двух одинаковых двигателей, роторы которых жестко связаны между собой (рис. 4.60, б), при встречном направлении вращения магнитных полей и создаваемых ими моментов $M_{\text{пр}}$ и

$M_{обр}$. Поле, направление вращения которого совпадает с направлением вращения ротора, называют прямым; поле обратного направления — *обратным или инверсным*.

Допустим, что направление вращения роторов совпадает с направлением одного из вращающихся полей, например с $n_{пр}$. Тогда скольжение ротора относительно потока $\Phi_{пр}$

(4.100)

$$s_{np} = (n1_{np} - n2) / n1_{np} = (n1 - n2) / n1 = 1 - n2 / n1 ..$$

Скольжение ротора относительно потока $\Phi_{обр}$

(4.101)

$$s_{obr} = (n1_{obr} + n2) / n1_{obr} = (n1 + n2) / n1 = 1 + n2 / n1 ..$$

Из (4.100) и (4.101) следует, что

(4.102)

$$s_{obr} = 1 + n2 / n1 = 2 - s_{np} ..$$

Электромагнитные моменты $M_{пр}$ и $M_{обр}$, образуемые прямым и обратным полями, направлены в противоположные стороны, а результирующий момент однофазного двигателя $M_{рез}$ равен разности моментов при одной и той же частоте вращения ротора.

На рис. 4.61 показана зависимость $M = f(s)$ для однофазного двигателя. Рассматривая рисунок, можно сделать следующие выводы:

а) однофазный двигатель не имеет пускового момента; он вращается в ту сторону, в которую приводится внешней силой; б) частота вращения однофазного двигателя при холостом ходе меньше, чем у трехфазного двигателя, из-за наличия тормозящего момента, образуемого обратным полем;

в) рабочие характеристики однофазного двигателя хуже, чем трехфазного; он имеет повышенное скольжение при номинальной нагрузке, меньший КПД, меньшую перегрузочную способность, что также объясняется наличием обратного поля;

г) мощность однофазного двигателя составляет примерно 2/3 от мощности трехфазного двигателя того же габарита, так как в однофазном двигателе рабочая обмотка занимает только 2/3 пазов статора. Заполнять все пазы статора

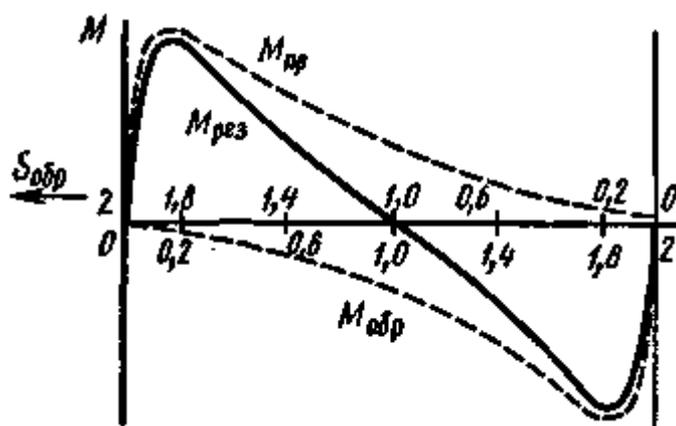


Рис. 4.61. Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя

так как при этом обмоточный коэффициент получается малым, расход меди возрастает примерно в 1,5 раза, в то время как мощность увеличивается только на 12%.

Пусковые устройства. Чтобы получить пусковой момент, однофазные двигатели имеют пусковую обмотку, сдвинутую на 90 электрических градусов относительно основной рабочей обмотки. На период пуска пусковую обмотку присоединяют к сети через фазосдвигающие элементы — емкость или активное сопротивление. После окончания разгона двигателя пусковую обмотку отключают, при этом двигатель

продолжает работать как однофазный. Поскольку пусковая обмотка работает лишь короткое время, ее изготавливают из провода меньшего сечения, чем рабочую, и укладывают в меньшее число пазов.

Подробно рассмотрим процесс пуска при использовании в качестве фазосдвигающего элемента емкости C (рис. 4.62, а). На пусковой обмотке $П$ напряжение $\dot{U}_{1П} = \dot{U}_1 - \dot{U}_C = \dot{U}_1 + j\dot{I}_{1П}XC$, т. е. оно сдвинуто по фазе относительно напряжения сети U_1 , приложенного к рабочей обмотке P . Следовательно, векторы токов в рабочей $I_{1р}$ и пусковой $I_{1п}$ обмотках сдвинуты по фазе на некоторый угол. Выбирая определенным образом емкость фазосдвигающего конденсатора, можно получить режим работы при пуске, близкий к симметричному (рис. 4.62, б), т. е. получить круговое вращающееся поле. На рис. 4.62, в показаны зависимости $M = f(s)$ для двигателя при включенной (кривая 1) и выключенной (кривая 2) пусковой обмотке. Пуск двигателя осуществляется на части ab характеристики 1; в точке b пусковая обмотка выключается, и в дальнейшем двигатель работает на части $сО$ характеристики 2.

Поскольку включение второй обмотки существенно улучшает механическую характеристику двигателя, в некоторых случаях применяют однофазные двигатели, в которых обмотки А и В

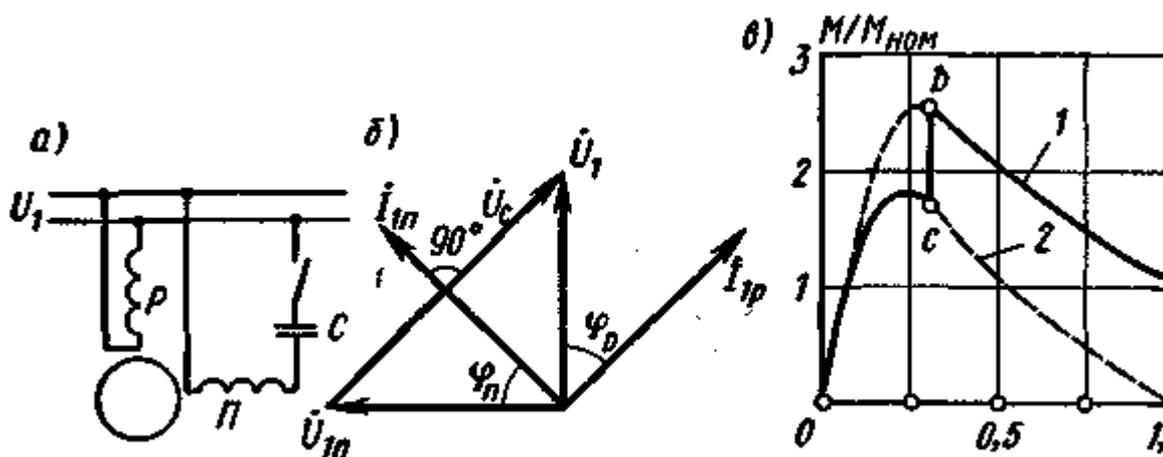


Рис. 4.62. Схема однофазного асинхронного двигателя с конденсаторным пуском (а), его векторная диаграмма (б) и механическая характеристика (в)

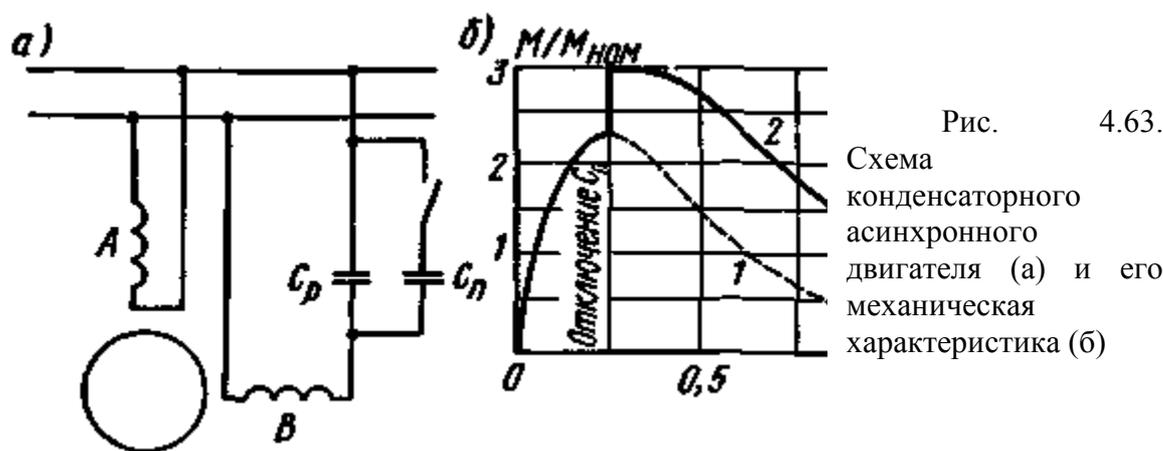


Рис. 4.63. Схема конденсаторного асинхронного двигателя (а) и его механическая характеристика (б)

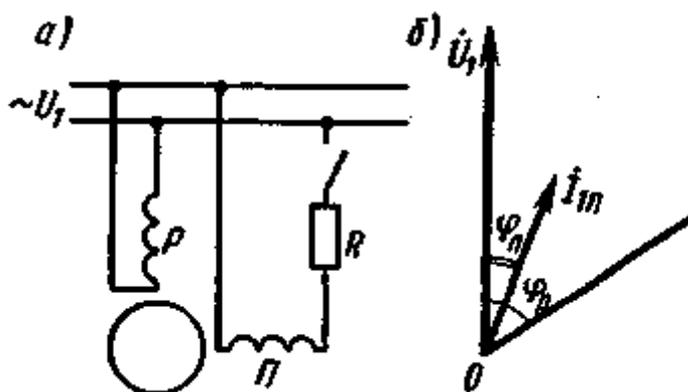
включены все время (рис. 4.63, а). Такие двигатели называют конденсаторными. Обе обмотки конденсаторных двигателей занимают, как правило, одинаковое число пазов и имеют одинаковую мощность. При пуске конденсаторного двигателя для увеличения пускового момента целесообразно иметь увеличенную емкость $C_p + C_n$.

После разгона двигателя по характеристике 2 (рис. 4.63,б) и уменьшения тока часть конденсаторов C_n отключают, чтобы при номинальном режиме (когда ток двигателя становится меньшим, чем при пуске) увеличить емкостное сопротивление и обеспечить работу двигателя в условиях, близких к работе при круговом вращающемся поле. При этом двигатель работает на характеристике 1.

Конденсаторный двигатель имеет высокий $\cos \varphi$. Недостатками его являются сравнительно большая масса и габариты конденсатора, а также возникновение несинусоидального тока при искажениях питающего напряжения, которое в ряде случаев приводит к вредному воздействию на линии связи.

При легких условиях пуска (небольшой нагрузочный момент в пусковой период) применяют двигатели с пусковым сопротивлением R (рис. 4.64, а). Наличие активного сопротивления в цепи пусковой обмотки обеспечивает меньший сдвиг фаз φ_p между напряжением и током в этой обмотке (рис. 4.64, б), чем сдвиг фаз φ_r в рабочей обмотке. В связи с этим токи в рабочей и пусковой обмотках оказываются сдвинутыми по фазе на угол $\varphi_r - \varphi_p$ и образуют несимметричное (эллиптическое) вращающееся поле, благодаря которому и возникает пусковой момент. Двигатели с пусковым сопротивлением надежны в эксплуатации и выпускаются серийно. Пусковое сопротивление встраивают в корпус двигателя и охлаждают тем же воздухом, который охлаждает весь двигатель.

Рис. 4.64. Схема однофазного асинхронного двигателя с пусковым сопротивлением (а) и его векторная диаграмма (б)



Однофазные микродвигатели с экранированными полюсами. В этих двигателях обмотку статора, подсоединяемую к сети, выполняют обычно сосредоточенной и укрепляют на явно-выраженных полюсах (рис. 4.65, а), листы которых штампуют совместно со статором. В каждом полюсе один из наконечников охватывается вспомогательной обмоткой, состоящей из одного или нескольких короткозамкнутых витков, которые экранируют от $1/5$ до $1/2$ полюсной дуги. Ротор двигателя — короткозамкнутый обычного типа.

Магнитный поток машины, создаваемый обмоткой статора (поток полюса), можно представить в виде суммы двух составляющих (рис. 4.65, б) $\Phi_p = \Phi_{p1} + \Phi_{p2}$, где Φ_{p1} — поток, проходящий через часть полюса, не охваченную короткозамкнутым витком; Φ_{p2} — поток, проходящий через часть полюса, экранированную короткозамкнутым витком.

Потоки Φ_{p1} и Φ_{p2} проходят через различные части полюсного наконечника, т. е. смещены в пространстве на угол β . Кроме того, они сдвинуты по фазе относительно МДС F_p обмотки статора на различные углы — γ_1 и γ_2 . Это объясняется тем, что каждый полюс описываемого двигателя можно рассматривать в первом приближении как трансформатор, первичной обмоткой которого является обмотка статора, а вторичной — короткозамкнутый виток. Поток обмотки статора индуцирует в короткозамкнутом витке ЭДС E_k (рис. 4.65, в), вследствие чего возникает ток I_k и МДС F_k , складывающаяся с МДС F_p обмотки статора. Реактивная составляющая тока I_k уменьшает поток Φ_{p2} , а активная — смещает его по фазе относительно МДС F_p . Так как поток Φ_{p1} не охватывает короткозамкнутый виток, угол γ_1 имеет сравнительно небольшое значение

($4-9^\circ$) — примерно такое же, как угол сдвига фаз между потоком трансформатора и МДС первичной обмотки в режиме холостого хода. Угол γ_2 значительно больше (около 45°),

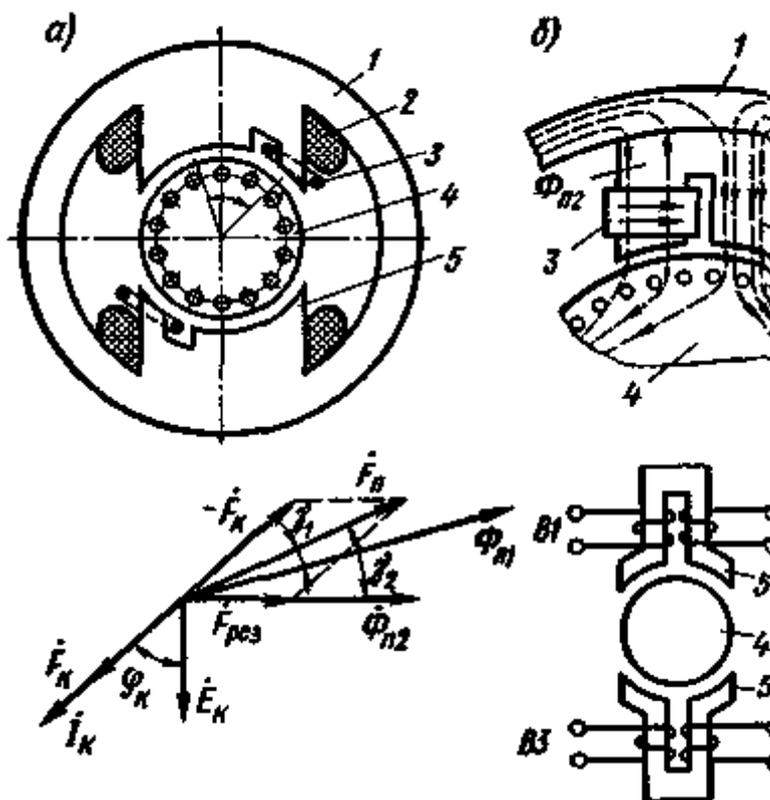


Рис. 4.65. Конструктивные схемы однофазного двигателя с экранированными полюсами и его векторная диаграмма: 1 — статор; 2 — обмотка статора; 3 — короткозамкнутый виток; 4 — ротор; 5 — полюс

т. е. такой, как в трансформаторе со вторичной обмоткой, замкнутой накоротко (например, в измерительном трансформаторе тока). Это объясняется тем, что потери мощности, от которых зависит угол γ_2 , определяются не только магнитными потерями мощности в стали, но и электрическими потерями в короткозамкнутом витке.

Потоки $\Phi_{п1}$ и $\Phi_{п2}$, смещенные в пространстве на угол β и сдвинутые по фазе во времени на угол $\gamma = \gamma_2 - \gamma_1$, образуют эллиптическое вращающееся магнитное поле (см. гл. 3), которое воздает вращающий момент, действующий на ротор двигателя в направлении от первого полюсного наконечника, не охватываемого короткозамкнутым витком, ко второму наконечнику (в соответствии с чередованием максимумов потоков «фаз»).

Для увеличения пускового момента рассматриваемого двигателя путем приближения его вращающегося поля к круговому применяют различные способы: устанавливают между полюсными наконечниками смежных полюсов магнитные шунты, которые усиливают магнитную связь между основной обмоткой и короткозамкнутым витком и улучшают форму магнитного поля в воздушном зазоре; увеличивают воздушный зазор под наконечником, не охватываемым короткозамкнутым витком; используют два и большее количество коротко-замкнутых витков на одном наконечнике с разными углами охвата. Имеются также двигатели без короткозамкнутых витков на полюсах, но с несимметричной магнитной системой: различной конфигурацией отдельных частей полюса и разными воздушными зазорами. Такие двигатели имеют меньший пусковой момент, чем двигатели с экранированными полюсами, но КПД их выше, так как у них отсутствуют потери мощности в короткозамкнутых витках.

Рассмотренные конструкции двигателей с экранированными полюсами являются нереверсивными. Для осуществления реверса в таких двигателях вместо короткозамкнутых витков применяют катушки $B1, B2, B3$ и $B4$ (рис. 4.65, в), каждая из которых охватывает половину полюса. Замыкая накоротко пару катушек $B1$ и $B4$ или $B2$ и

ВЗ, можно экранировать одну или другую половину полюса и изменять таким образом направление вращения магнитного поля и ротора.

Двигатель с экранированными полюсами имеет ряд существенных недостатков: сравнительно большие габаритные размеры и массу; низкий $\cos \varphi \approx 0,4 \div 0,6$; низкий КПД $\eta = 0,25 \div 0,4$ из-за больших потерь в короткозамкнутом витке; небольшой пусковой момент и др. Достоинствами двигателя являются простота конструкции и вследствие этого высокая надежность в эксплуатации. Благодаря отсутствию зубцов на статоре шум двигателя незначителен, поэтому он часто употребляется в устройствах по воспроизводству музыки и речи.

2. Асинхронный конденсаторный двигатель.

Конденсаторные двигатели — разновидность асинхронных двигателей, в обмотки которого включены конденсаторы для создания сдвига фазы тока.^[1] Подключаются в однофазную сеть посредством специальных схем. По количеству фаз статора делятся на двухфазные и трехфазные.

Существует разные схемы подключения, больше вариантов для трёхфазных двигателей, различающиеся способом соединения обмоток двигателя и составом дополнительных элементов, но минимальная работоспособная схема содержит один конденсатор, от чего и происходит название.

Как правило, одна из обмоток («фаза двигателя») запитывается напрямую от однофазной сети, а другие обмотки запитываются через электрический конденсатор, который сдвигает фазу подводимого тока почти на $+90^\circ$, или через катушку индуктивности, которая сдвигает фазу почти на -90° . Чтобы результирующее вращающееся магнитное поле не было эллиптическим, последовательно с конденсатором включается переменный проволочный резистор, с помощью которого добиваются кругового вращающегося магнитного поля.

Содержание

- 1 Применение
- 2 Преимущества
- 3 Недостатки
- 4 Марки конденсаторных электродвигателей
- 5 Примечания
- 6 См. также

Применение

Питание трёхфазного двигателя от однофазной электрической сети

Промышленные конденсаторные двигатели имеют в основе, как правило, двухфазный двигатель (проще производство и схема подключения). Трёхфазные двигатели переделываются под однофазную сеть обычно в частном порядке или мелкосерийном производстве в силу массовости таких типов двигателей и сетей, выбирая при этом между сложностью схемы и недоиспользованием мощности двигателя.

Такие двигатели используются в основном в бытовой технике малой мощности: советские стиральные машины, двигатели бобинных и стационарных кассетных магнитофонов, недорогих проигрывателях виниловых дисков и другой подобной технике.

Также такие двигатели применяются в циркуляционных насосах водопроводных и отопительных систем (напр. компании *Grundfos*), и в воздуходувках и дымососах отопительных и водонагревательных агрегатов (напр. *Buderus*).

Трёхфазные асинхронные двигатели в однофазную электрическую сеть включают через фазосдвигающий конденсатор.

Вывод одной обмотки электродвигателя подключается к «фазовому» проводу, вывод второй обмотки — к нейтральному проводу. Вывод третьей обмотки подключается через конденсатор, ёмкость которого подбирается по формулам, в зависимости от того, как соединены обмотки двигателя — «звездой» или «треугольником».

Если обмотки соединены «звездой», тогда ёмкость «рабочего» конденсатора должна быть

$$C_{\text{РАВ.ЗВЕЗДА}} = 2800 \frac{I}{U}.$$

Если обмотки соединены «треугольником», тогда ёмкость «рабочего» конденсатора должна быть

$$C_{\text{РАВ.ТРЕУГОЛЬНИК}} = 4800 \frac{I}{U}, \text{ где}$$

U — напряжение сети, вольт;

I — рабочий ток двигателя, ампер;

C — электрическая ёмкость, микрофарад.

При пуске двигателя кнопкой подключается пусковой конденсатор $C_{\text{ПУСК}}$, ёмкость которого должна быть в два раза больше ёмкости рабочего. Как только двигатель наберёт нужные обороты, кнопку «Пуск» отпускают.

Переключатель B_2 позволяет изменять направление вращения электродвигателя. Выключатель B_1 отключает электродвигатель.

Используя паспортные данные электродвигателя, можно определить его рабочий ток I по формуле:

$$I = \frac{P}{1,73 U \eta \cos \varphi}, \text{ где}$$

P — электрическая мощность двигателя, Ватт;

U — напряжение сети, вольт;

η — коэффициент полезного действия;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности.

Преимущества

Практически единственный способ реализации асинхронного двигателя в обычной бытовой однофазной сети.

Недостатки

Ёмкость конденсатора подобрана для случая оптимальной частоты вращения двигателя. В случае, если частота вращения ниже оптимальной (пуск или большая механическая нагрузка, особенно переменная) против-ЭДС в обмотке, подключенной через конденсатор, отклоняется от идеального значения, что разбалансирует всю схему и приводит к появлению эллиптического магнитного поля с сильным падением мощности.

Поэтому схема применима только для небольших или для практически постоянных нагрузок, как, например, в проигрывателе виниловых дисков или же отопительном циркуляционном насосе. В таком бытовом приборе, как пылесос, это невозможно, и потому там применяется коллекторный двигатель.

Кроме того, конденсаторный двигатель, как и любой асинхронный, предъявляет довольно высокие требования к качеству синусоиды и частоте питающего напряжения. Потому устройства, содержащие такие двигатели (например, большинство современных отопительных и водонагревательных агрегатов, да даже и обычный напольный вентилятор) нельзя подключать к дешевому «компьютерному» ИБП — в режиме работы от батарей такой ИБП дает часто не синус, а меандр, иногда с частотой куда выше 50 Гц. Такие устройства требуют online UPS, которые существенно дороже, сложнее и как правило имеют в себе шумящий вентилятор (аналогичный компьютерному).

3. Работа трёхфазного асинхронного двигателя от однофазной сети.

Трёхфазный асинхронный двигатель может работать от однофазной сети как однофазный с пусковым элементом или как однофазный конденсаторный с постоянно включенной рабочей емкостью. Применение двигателя в качестве конденсаторного предпочтительнее.

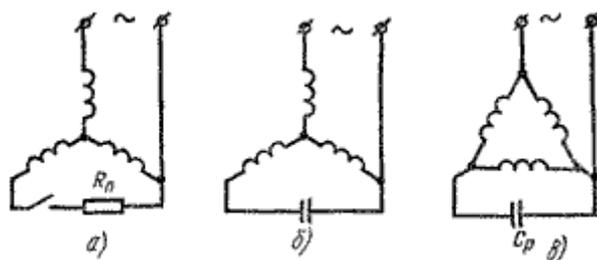


Рис. 1. Схемы включения в однофазную сеть трехфазных двигателей с тремя выводами:

а - схема с пусковым сопротивлением, б, в - схемы с рабочей емкостью

Если принять за 100 % мощность трехфазного двигателя, обозначенную на его щитке, то при однофазном включении двигатель может развить 50-70 % этой мощности, а при использовании в качестве конденсаторного - 70-85 % и более. Еще одно преимущество конденсаторного двигателя заключается в том, что отсутствует специальное пусковое устройство, которое необходимо при однофазной схеме для отключения пусковой обмотки после разгона двигателя.

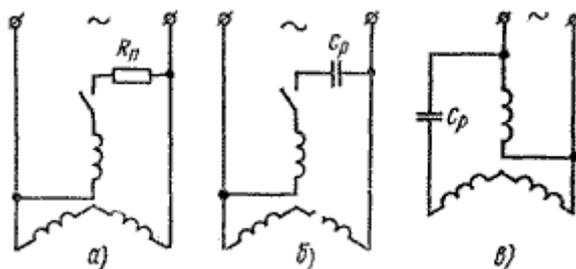


Рис. 2. Схемы включения в однофазную сеть трехфазных двигателей с шестью выводами:

а - схема с пусковым сопротивлением, б, в - схемы с рабочей емкостью

Схему включения на рисунках надо выбирать с учетом напряжения сети и номинального напряжения двигателя. Например, при трех выведенных концах обмотки статора (рис. 1) двигатель может быть использован в сети, напряжение которой равно номинальному напряжению двигателя.

При шести выводных концах обмотки двигатель имеет два номинальных напряжения: 127/220 В, 220/380 В. Если напряжение сети равно большему номинальному напряжению двигателя, т.е. $U_c = 220$ В при номинальном напряжении 127/220 В или $U_c = 380$ В при номинальном напряжении 220/380 В и т.д., то надо пользоваться схемами, приведенными на рис. 1, а, б. При напряжении сети, равном меньшему номинальному напряжению двигателя, следует применять схему, показанную на рис. 1, в. В этом случае при однофазном включении значительно уменьшается мощность двигателя, поэтому целесообразно применять схемы с рабочей емкостью.

Рабочая емкость C_p (мкФ) для каждой схемы должна иметь определенное значение и может быть подсчитана, исходя из напряжения однофазной сети U_c и номинального тока I_f в фазе трехфазного двигателя: $C_p = k I_f / U_c$ где k - коэффициент, зависящий от схемы включения. При частоте 50 Гц для схем по рис. 1, б и 2, б можно принять $k=2800$; для схемы по рис. 1, в - $k=4800$; для схемы по рис. 2, в - $k=1600$.

Напряжение на конденсаторе U_k также зависит от схемы включения и напряжения сети. Для схем по рис. 1, б, в оно может быть принято равным напряжению сети; для схемы по рис. 2, б - $U_k = 1,15 U_c$; для схемы по рис. 2, в - $U_k = 2 U_c$.

Номинальное напряжение конденсатора должно быть равно или несколько больше расчетного значения.

Необходимо помнить, что конденсаторы после отключения длительное время сохраняют напряжение на своих зажимах и создают при прикосновении к ним опасность поражения человека электрическим током. Опасность поражения тем выше, чем больше

емкость и выше напряжение на включенном в схему конденсаторе. При ремонте или отладке двигателя необходимо после каждого отключения конденсатор разрядить. Для защиты от случайного прикосновения в процессе эксплуатации двигателя конденсаторы должны быть жестко закреплены и ограждены.

Пусковое сопротивление R_n определяют опытным путем, используя регулируемое сопротивление (реостат).

Если необходимо получить увеличенный момент при пуске двигателя, то параллельно рабочему конденсатору включают пусковой. Его емкость обычно подсчитывают по формуле $C_p = (от\ 2,5\ до\ 3)C_r$, где C_r - емкость рабочего конденсатора. Пусковой момент при этом получается близким к номинальному моменту трехфазного двигателя.

4. Специальные режимы работы асинхронных машин.

Конструкции и характеристики асинхронных двигателей, выпускаемых заводами Советского Союза, вполне определяют современное состояние электромашиностроения в данной области.

Ранее отмечалось, что асинхронные двигатели являются наиболее распространенными электрическими машинами. В СССР годовой выпуск таких машин по мощности составляет около 15 млн. кВт и в 1965 г. должен составить около 35 млн. кВт. Поэтому их проектированию и изготовлению всегда уделялось и уделяется большое внимание. Массовое изготовление машин требует особенно тщательной разработки их конструкции и технологических методов производства. Большое значение при этом получают вопросы унификации и нормализации деталей и целых конструктивных узлов, их взаимозаменяемости. В связи с этим целесообразно создание серий машин, т. е. рядов машин возрастающей мощности, объединенных общностью конструкции и технологических методов производства и предназначенных для массового изготовления.

Задача проектирования и изготовления серий электрических машин может быть правильно разрешена только в условиях планового социалистического хозяйства. Только при таких условиях возможно создание единых серии электрических машин для всех отечественных заводов, изготовление которых дает большие экономические выгоды и вместе с тем обеспечивает их высокие эксплуатационные свойства.

Единые серии асинхронных двигателей, изготавливаемых на заводах Советского Союза, охватывают мощности от долей ватта до нескольких тысяч киловатт и различные частоты вращения. Они строятся на номинальные напряжения 127, 220, 380, 500, 660, 3000, 6000 и 10000 В.

Основной серией трехфазных асинхронных двигателей массового применения является серия А. (Выбор обозначения для серии маши (в данном случае А) совершенно произволен. Так, например, серии асинхронных машин небольшой мощности, выпускавшихся заводами Советского Союза примерно до 1950 г., имели обозначения АД, МА и др.) В нее входят двигатели мощностью от 0,6 до 125 кВт. На базе серии А разработаны различные модификации: двигатели с повышенным пусковым моментом, с повышенной способностью к перегрузке по моменту, с повышенным скольжением, с контактными кольцами и др. На рис. 3-123 представлен двигатель серии А.

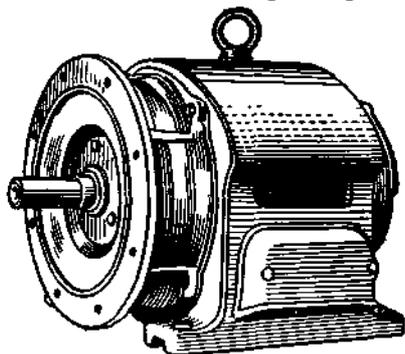


Рис. 3-123. Двигатель серии А с фланцем для крепления.

Все двигатели этой серии выполняются с короткозамкнутой алюминиевой клеткой на роторе. Общепринятой конструкцией для них является защищенная конструкция, при которой исключается попадание в машину капель воды, падающих сверху или под углом 45° к горизонтали. Двигатели серии А имеют корпус и подшипниковые щиты, выполненные из чугуна или при малых мощностях из алюминиевого сплава. В последнем случае они обозначаются как серия АЛ.

На рис. 3-124 представлен двигатель серии АО. Двигатели этой серии имеют закрытую конструкцию с обдувом внешней ребристой поверхности корпуса статора, который осуществляется при помощи вентилятора. Последний помещен на валу двигателя между внутренним щитом, закрывающим ротор двигателя, и внешним щитом с отверстиями для прохода воздуха. Малые двигатели закрытой конструкции с обдувом внешней поверхности корпуса статора делаются также с корпусом статора и щитами из алюминия. Они входят в серию АОЛ. Заводами выпускаются также двигатели серии АК — двигатели с контактными кольцами мощностью до 125 кВт (рис. 3-125).

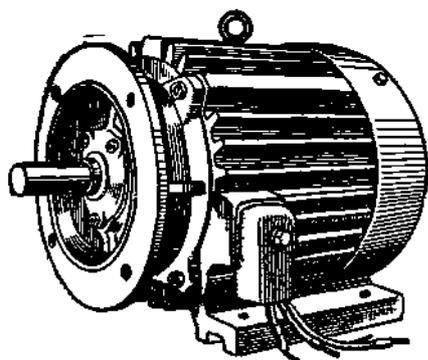


Рис. 3-124. Двигатель серии АО.

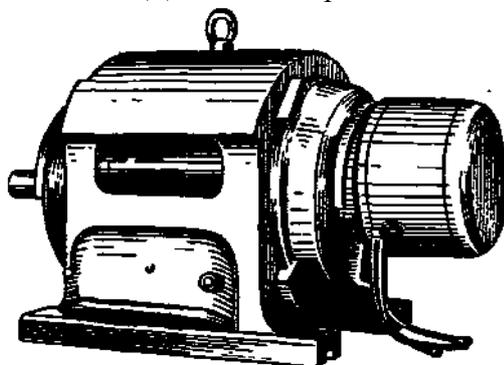


Рис. 3-125. Двигатель серии АК (справа виден кожух, закрывающий контактные кольца).

В настоящее время заводы Советского Союза начинают выпускать двигатели мощностью от 0,4 до 125 кВт новых серий, которые обозначены А2 и АО2. Эти двигатели по сравнению с двигателями серий А и АО легче по весу, имеют изоляцию статорных обмоток более высоких классов.

Двигатели большой мощности (от 140 до 1 250 кВт) с фазным ротором (с контактными кольцами) объединены в серию ФАМСО. Они изготавливаются для эксплуатации в угольной и нефтяной промышленности, для нужд электростанций и других областей народного хозяйства. Эти двигатели имеют защищенную конструкцию с самовентиляцией, как и большинство асинхронных двигателей. Подвод воздуха здесь осуществляется через отверстия, расположенные в нижних частях подшипниковых щитов, выход воздуха — через боковые закрытые жалюзи отверстия с обеих сторон корпуса статора.

На те же мощности строятся короткозамкнутые двигатели с двойной клеткой или бутылочными пазами на роторе, объединенные в серию ДАМСО (рис. 3-126), а также с

глубокими пазами на роторе серии ГАМ. Они находят себе применение в тех же случаях, что и двигатели ФАМСО. Двигатели предназначены для работы в тяжелых условиях: прямой пуск при полном напряжении, реверсирование, торможение (на рис. 3-127 представлен продольный разрез одного из современных двигателей с контактными кольцами).

В СССР разработаны также двигатели на мощности от 125 до 1000 кВт, которые объединены в новые серии А и АК. Многие типы этих двигателей уже выпускаются заводами взамен двигателей ДАМСО, ГАМ и ФАМСО.

Отечественными заводами выпускаются тихоходные двигатели большой мощности (на тысячи киловатт) для нужд угольной, металлургической и других отраслей промышленности, а также быстроходные двигатели при синхронной частоте вращения 3000, 1500 об/мин на мощности в несколько тысяч киловатт, которые предназначаются для мощных вентиляторов.

Большое количество асинхронных двигателей особой конструкции выпускается для текстильной, деревообрабатывающей и станкостроительной промышленности. Они часто имеют специальные характеристики: большой начальный пусковой момент, повышенную способность к перегрузке по моменту, повышенное скольжение.

В последние годы созданы отдельные типы небольших двигателей на очень большие частоты вращения. Такие двигатели получают питание от высокочастотных генераторов переменного тока. Статор их выполняется с обычной трехфазной обмоткой, ротор — в виде цельного стального цилиндра, причем для него берется сталь весьма высокого качества, так как даже при малом диаметре ротора его окружная скорость достигает 200 — 250 м/сек. Вращающий момент двигателя создается в результате взаимодействия вращающегося поля и токов, наведенных им в стали ротора. Эти токи вытесняются к внешней поверхности ротора и протекают в тонком поверхностном слое его, вследствие чего индуктивное сопротивление рассеяния контуров токов ротора имеет малое значение. Вытеснение токов обусловлено их большой частотой: например, при $f = 2000$ Гц и $s = 0,08$ получим: $f_2 = sf_1 = 160$ Гц. При $f_1 = 2000$ Гц и $s = 0,08$ двухполюсный двигатель будет вращаться с частотой 110 400 об/мин. Указанные двигатели применяются при тонкой шлифовке металлических изделий и для других целей.

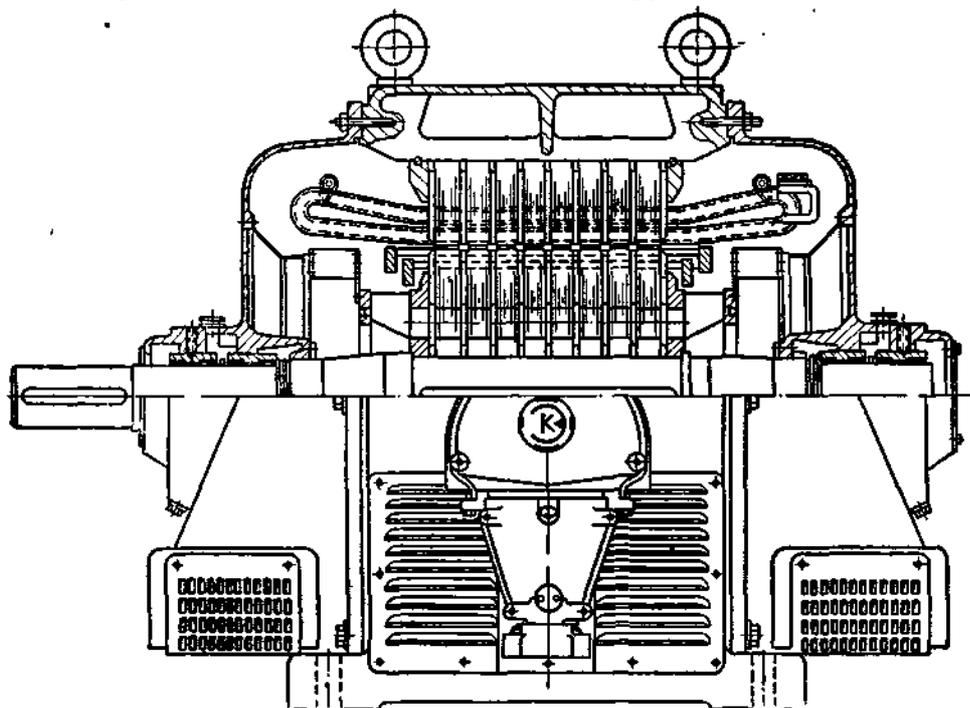


Рис. 3-126. Короткозамкнутый двигатель с двойной клеткой на роторе серии ДАМСО.

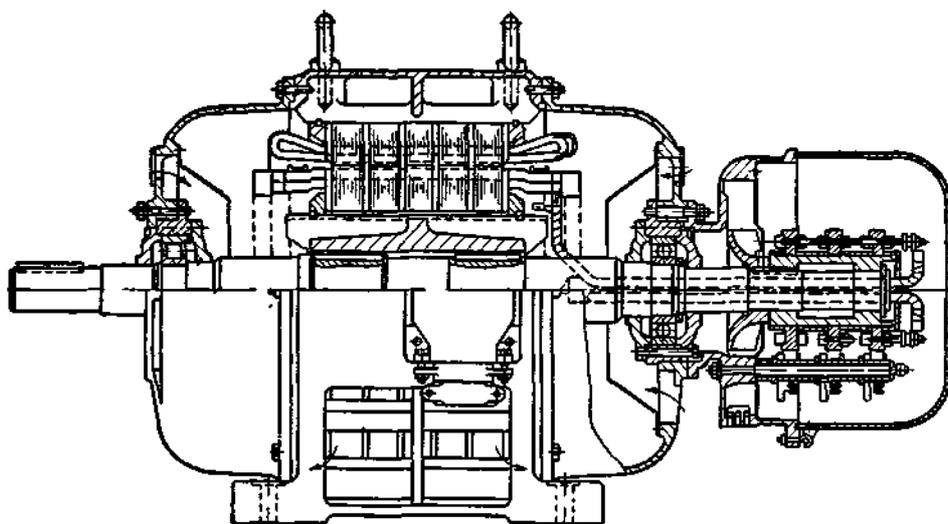


Рис. 3-127. Трехфазный асинхронный двигатель с контактными кольцами.

1.14 Лекция №14 (2 часа).

Тема: «Назначение, устройство и принцип действия синхронных машин»

1.14.1 Вопросы лекции:

1. Принцип действия, назначение и номинальные данные синхронных машин.
2. Устройство и конструктивное исполнение синхронных машин.
3. Системы возбуждения синхронных машин.

1.14.2 Краткое содержание вопросов

1. Принцип действия, назначение и номинальные данные синхронных машин.

Генераторы переменного тока, работающие на электрических станциях, в большинстве случаев являются синхронными машинами. Эти машины применяются также в качестве двигателей. Наибольшее распространение получили трехфазные генераторы и двигатели.

Синхронная машина в обычном исполнении состоит из неподвижной части — статора, в пазах которого помещается трехфазная обмотка, и вращающейся части — ротора с электромагнитами, к обмотке которых подводится постоянный ток при помощи контактных колец и наложенных на них щеток (рис. 4-1).

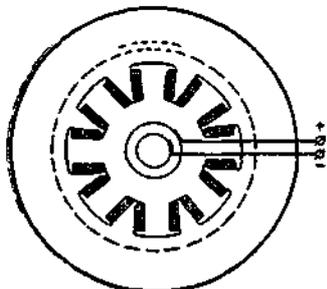


Рис. 4-1. Явнополюсная синхронная машина ($2p = 8$).

Статор синхронной машины ничем не отличается от статора асинхронной машины. Ротор её выполняется или явнополюсным (с выступающими полюсами, рис. 4-1), или неявнополюсным (цилиндрический ротор, рис. 4-2).

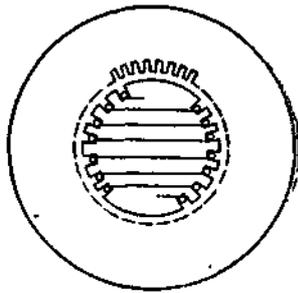


Рис. 4-2. Неявнополюсная синхронная машина ($2p = 2$).

В зависимости от рода первичного двигателя, которым приводится во вращение синхронный генератор, применяются названия: паротурбинный генератор или сокращенно турбогенератор (первичный двигатель — паровая турбина), гидротурбинный генератор или сокращенно гидрогенератор (первичный двигатель — гидравлическая турбина) и дизель-генератор (первичный двигатель — дизель).

Турбогенераторы — быстроходные неявнополюсные машины (рис. 4-2), выполняемые в настоящее время, как правило, с двумя полюсами. Турбогенератор вместе с паровой турбиной, с которой он механически соединяется называется турбоагрегатом (рис. 4-3).

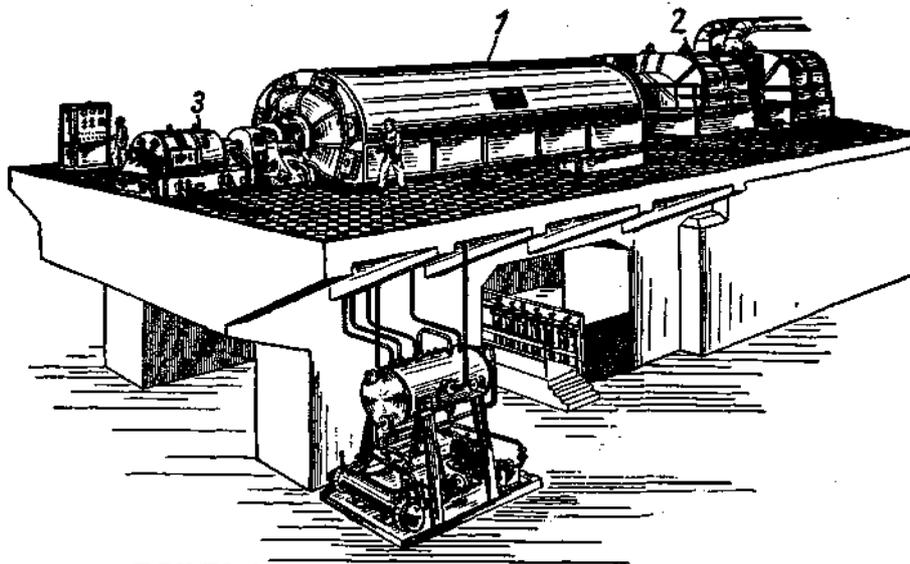


Рис. 4-3. Общий вид турбоагрегата. 1-турбогенератор; 2 — паровая турбина. 3 — возбудитель.

Гидрогенераторы — в обычных случаях тихоходные явнополюсные машины (рис. 4-1), выполняемые с большим числом полюсов и с вертикальным валом (рис. 4-4).

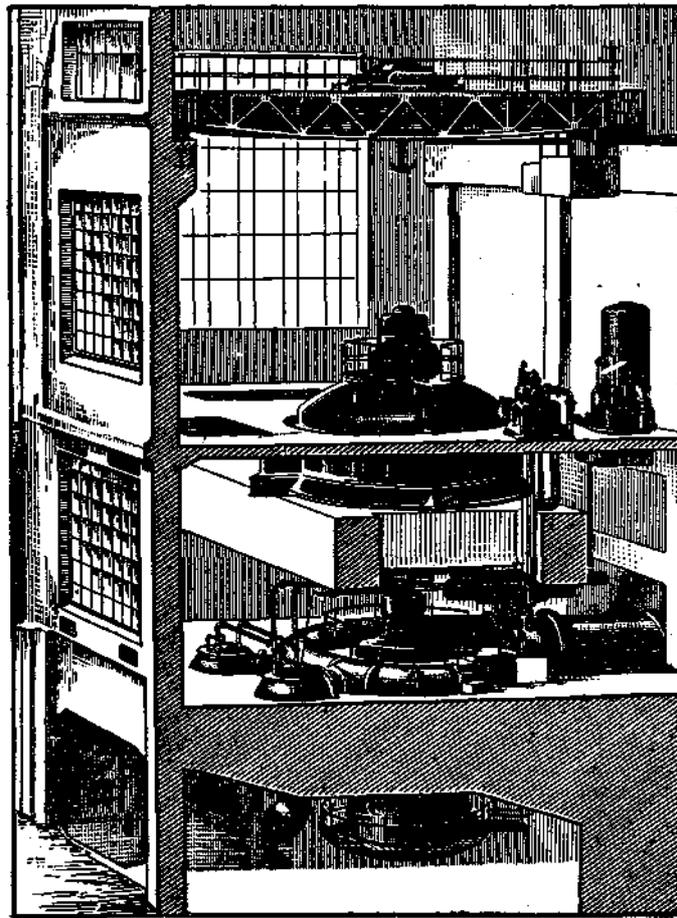


Рис. 4-4. Общий вид гидроагрегата.

Дизель-генераторы представляют собой в большинстве случаев машины с горизонтальным валом.

Синхронные машины небольшой мощности иногда выполняются с неподвижными электромагнитами, помещенными на статоре, и обмоткой переменного тока, заложенной в пазы ротора, изготовленного из листовой электротехнической стали; в этом случае обмотка переменного тока соединяется с внешней цепью через контактные кольца и щетки (рис. 4-5).

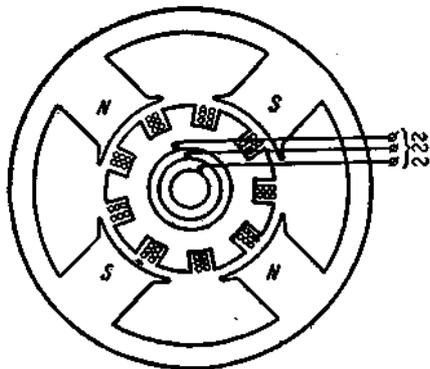


Рис. 4-5. Синхронная машина с неподвижными электромагнитами.

Ту часть синхронной машины, в обмотке которой наводится э.д.с., принято называть якорем. Электромагниты (полюсы) вместе с замыкающим их ярмом образуют полюсную систему; ее иногда называют индуктором.

В синхронных машинах обычной конструкции статор служит якорем, ротор — полюсной системой.

Основные преимущества конструкции с вращающимися полюсами заключаются в том, что здесь возможно осуществить более надежную изоляцию обмотки неподвижного якоря, более просто, без скользящих контактов соединить ее с сетью переменного тока. Указанные преимущества особенно существенны для синхронных машин на большие мощности и высокие напряжения.

Устройство скользящих контактов для подвода постоянного тока в обмотке электромагнитов, называемой обмоткой возбуждения, не представляет затруднений, так как мощность, подводимая к этой обмотке, составляет небольшую долю $[(0,3 \div 2)\%]$ номинальной мощности машины.

Кроме того, нужно отметить, что в современных мощных турбогенераторах, работающих с частотой вращения 3000 об/мин, окружная частота ротора достигает $180 \div 185$ м/сек; при такой частоте не представлялось бы возможным выполнить вращающийся якорь, собранный из тонких листов, механически достаточно прочным.

Ротор современного турбогенератора выполняется из цельной стальной поковки (рис. 4-6), причем берется сталь весьма высокого качества.

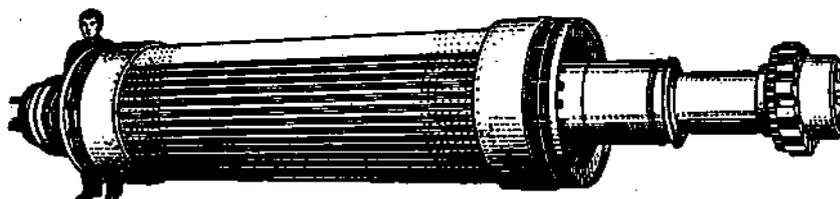


Рис. 4-6. Общий вид неявнополюсного ротора турбогенератора. По бокам ротора расположены вентиляторы.

Катушки обмотки возбуждения закладываются в пазы, выфрезерованные на внешней поверхности ротора, и закрепляются в пазах прочными металлическими клиньями. Лобовые части обмотки возбуждения закрываются кольцевыми бандажами, выполненными из особо прочной стали.

Ток для питания обмотки возбуждения синхронная машина получает обычно от небольшого генератора постоянного тока, помещенного на общем валу с ней или механически с ней соединенного. Такой генератор называется возбудителем. В случае мощного турбогенератора вал возбудителя с валом турбо генератора соединяется при помощи полуэластичной муфты.

Схема соединений возбудителя с обмоткой возбуждения синхронной машины показана на рис. 4-7.

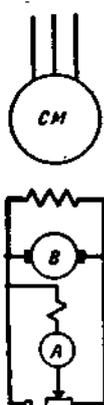


Рис. 4-7. Схема возбуждения синхронной машины.

В качестве возбудителя в большинстве случаев служит генератор постоянного тока с параллельным возбуждением (см. § 5-9, в). В последние годы для получения постоянного тока, необходимого для возбуждения синхронной машины, используются также различные выпрямители — ртутные, полупроводниковые и механические.

Частота тока, наведенного в обмотке якоря, определяется частотой вращения n ,

об/мин, и числом пар полюсов p ротора: $f = \frac{pn}{60}$ Гц. Таким образом, для получения стандартной частоты $f = 50$ Гц нужно, например, при $2p = 2$ иметь частоту вращения $n = 3000$ об/мин (с такой частотой работают почти все современные турбогенераторы), при $2p = 72$ $n = 83,3$ об/мин (с такой частотой работают днепровские гидрогенераторы).

Синхронные двигатели, как правило, выполняются в виде явнополюсных машин обычно на мощности от 100 кВт и выше и на самые различные частоты вращения. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с асинхронными двигателями, особенно при большой мощности и низкой частоте вращения, так как могут работать с $\cos \varphi = 1$ или с опережающим током, улучшая в последнем случае $\cos \varphi = 1$ всей электроустановки.

Наряду с синхронными генераторами и двигателями применяются также синхронные компенсаторы. Они представляют собой синхронные двигатели, работающие вхолостую (без нагрузки на валу) и позволяющие в широких пределах изменять потребляемый ими реактивный ток. Последнее достигается, как будет показано, путем изменения тока возбуждения синхронных компенсаторов, которые в большинстве случаев работают, потребляя опережающий реактивный ток, т. е. как конденсаторы. Они служат для компенсации сдвига фаз тока и напряжения (для улучшения $\cos \varphi$) или для регулирования напряжения, например в конце линии электропередачи.

Режим работы синхронной машины, для которого она предназначена, характеризуется указанными на ее щитке номинальными величинами. На щитке синхронной машины указываются: 1) для какого режима работы машина предназначена (генератор, двигатель или компенсатор); 2) мощность (для генератора — кажущаяся мощность в В·А или кВт·А, а также — активная мощность в Вт или кВт; для двигателя — мощность на валу в Вт или кВт; для компенсатора — реактивная мощность при опережающем токе в В·А или кВт·А); 3) линейный ток в А; 4) линейное напряжение в В или кВ; 5) $\cos \varphi$; 6) число фаз; 7) соединение обмотки статора (звезда или треугольник); 8) частота тока в Гц; 9) частота вращения ротора в об/мин; 10) напряжение возбуждения; 11) наибольший допустимый ток возбуждения в А (за номинальный ток возбуждения принимается ток, соответствующий номинальному режиму работы).

Следует отметить, что если для трансформатора допустимая нагрузка вполне определяется кажущейся мощностью в кВт·А, то для синхронного генератора отдаваемая им мощность в киловольт-амперах не вполне определяет его допустимую нагрузку. Необходимо указать также допустимый $\cos \varphi$ нагрузки генератора при отстающем токе. Последнее объясняется тем, что при работе генератора с отстающим током размагничивающее действие этого тока на основное поле будет тем больше, чем ниже $\cos \varphi$, а потому, чем ниже $\cos \varphi$, тем больший ток возбуждения требуется для поддержания на зажимах генератора номинального напряжения.

Мы вначале будем рассматривать работу синхронной машины в режиме генератора. При этом будем иметь в виду, что синхронная машина (как любая другая электрическая машина) обратима и что основные электромагнитные процессы в ней одинаковы независимо от того, работает ли она в режиме генератора или двигателя.

Различие между тем и другим режимами заключается в том, что в генераторе сдвиг между э.д.с. обмотки якоря и ее током меньше 90° , а в двигателе тот же сдвиг больше 90° . Вследствие этого электромагнитный момент, действующий на ротор, в генераторе направлен против вращения, а в двигателе в сторону вращения.

2. Устройство и конструктивное исполнение синхронных машин.

Конструктивная схема 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 (рис.

6.2, 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 (рис. 6.2, б) нагрузка подключается к обмотке якоря посредством трех колец.

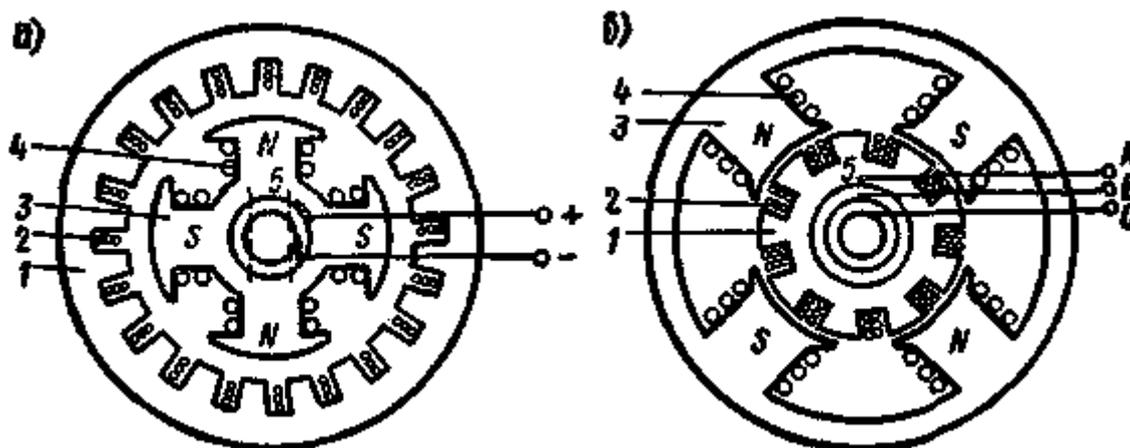


Рис. 6.2. Конструктивная схема синхронной машины с неподвижным и вращающимся якорем:

1 - якорь; 2 - обмотка якоря; 3 - полюсы индуктора; 4 - обмотка возбуждения; 5 - кольца и щетки

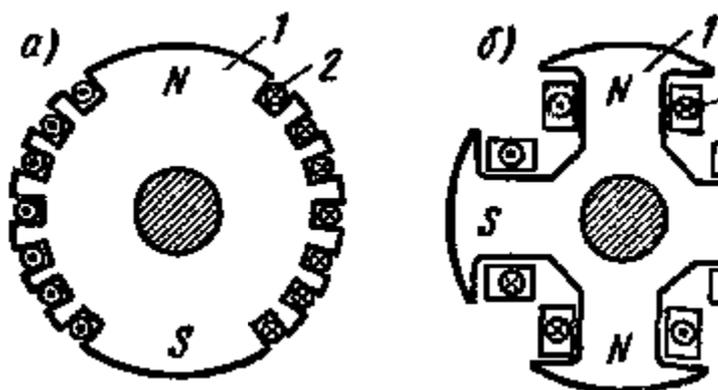


Рис. 6.3. Роторы синхронных неявнополюсной и явнополюсной машин:

1 — сердечник ротора; 2 — обмотка возбуждения

Конструкция ротора. В синхронных машинах применяют две различные конструкции ротора: неявнополюсную — с неявновыраженными полюсами (рис. 6.3, а) и явнополюсную — с явновыраженными полюсами (рис. 6.3, 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.

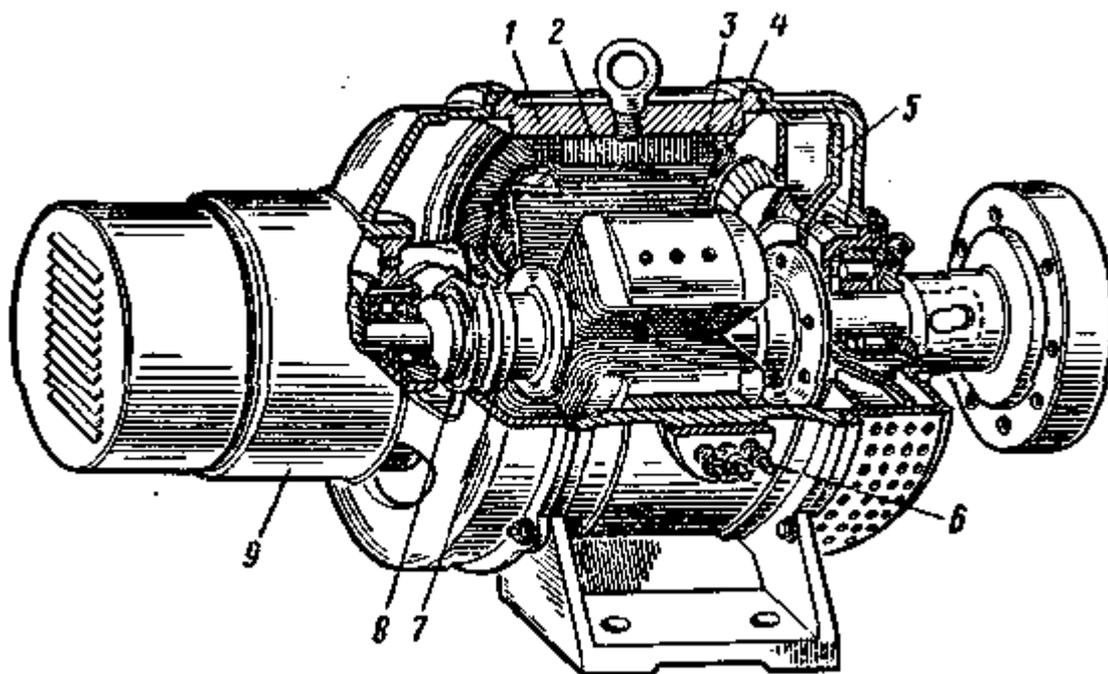
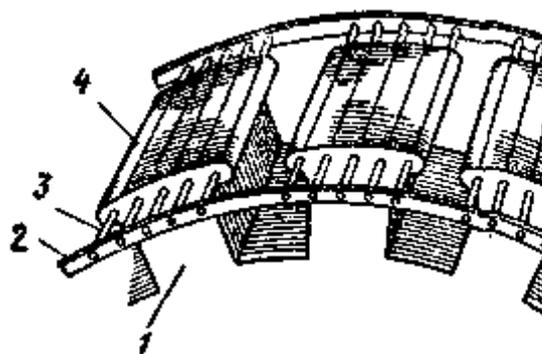


Рис. 6.4. Устройство явнополюсной машины: 1 — корпус; 2 — сердечник статора; 3 — обмотка статора; 4 — ротор; 5 — вентилятор; 6 — выводы обмоток; 7 — контактные кольца; 8 — щетки; 9 — возбудитель

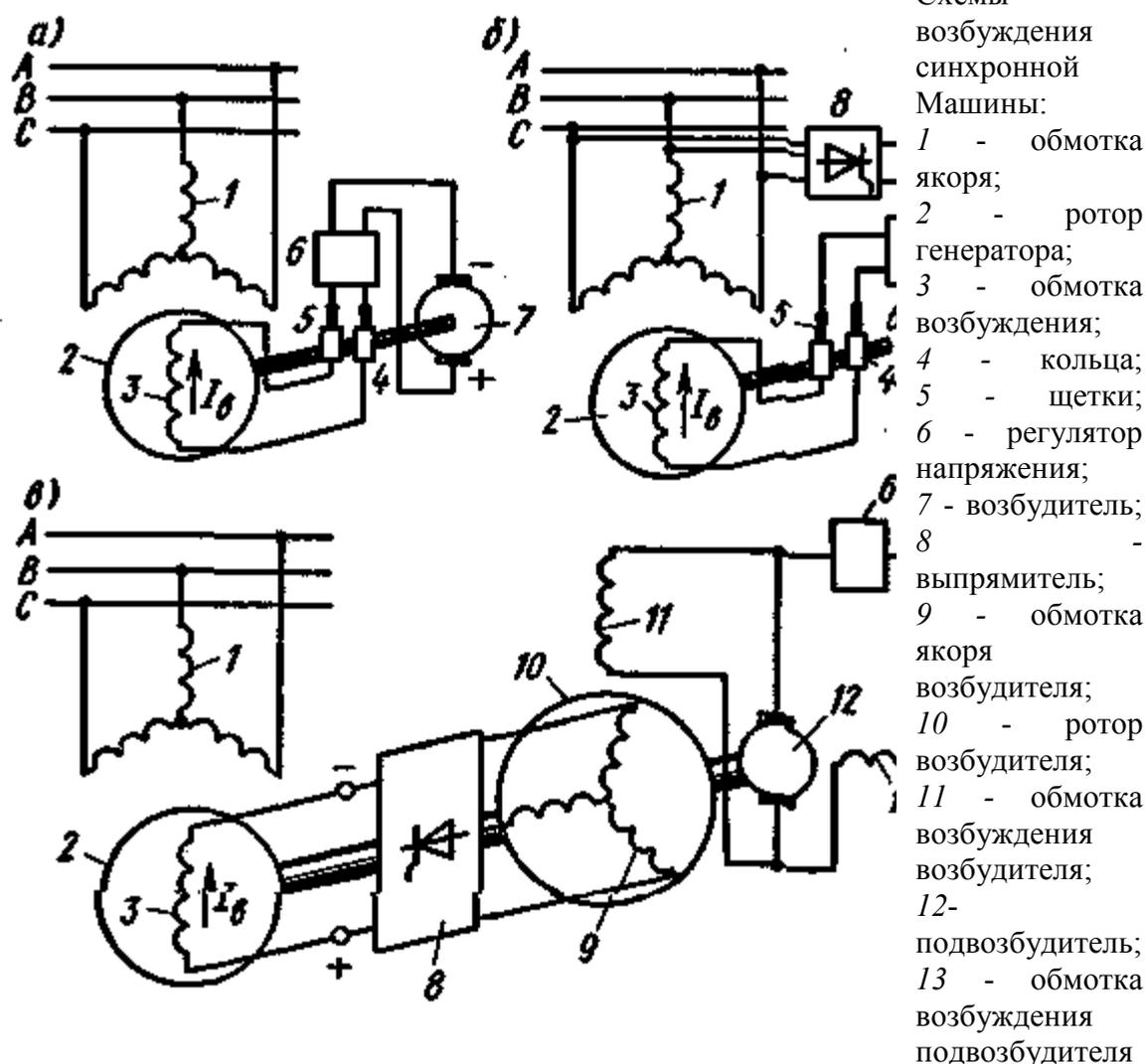
Рис. 6.5. Устройство пусковой обмотки в синхронных двигателях: 1 — полюсы ротора; 2 — короткозамыкающие кольца; 3 — стержни «беличьей клетки»; 4 — полюсные наконечники



В синхронной машине (рис. 6.4) 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.

В полюсных наконечниках синхронных двигателей с явно-полюсным ротором размещают стержни *пусковой обмотки* (рис. 6.5), выполненной из материала с повышенным удельным электрическим сопротивлением (латуни). Такую же обмотку (типа «беличья клетка»), состоящую из медных стержней, применяют и в синхронных генераторах; ее называют *успокоительной* или *демпферной обмоткой*, так как 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.

Рис. 6.6.



Питание обмотки возбуждения. 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 (рис. 6.6, 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 (рис. 6.6, 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 I_b 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 (рис. 6.6, 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.

3. Системы возбуждения синхронных машин.

СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

Большинство синхронных машин имеет электромагнитное возбуждение. Источниками постоянного тока для обмоток возбуждения являются специальные системы возбуждения, к которым предъявляется ряд важных требований:

1) надежное и устойчивое регулирование тока возбуждения в любых режимах работы машины;

2) достаточное быстродействие, для чего применяется форсировка возбуждения, т. е. быстрое увеличение напряжения возбуждения до предельного значения, называемого потолочным. Форсировка возбуждения применяется для поддержания устойчивой работы машины во время аварий и в процессе ликвидации их последствий. Потолочное напряжение возбуждения выбирают не менее 1,8-2 номинального напряжения возбуждения. Скорость нарастания напряжения при форсировке возбуждения должна быть не менее 1,5-2 номинальных напряжений на контактных кольцах ротора в секунду;

3) быстрое гашение магнитного поля, т. е. уменьшение тока возбуждения машины до нуля без значительного повышения напряжения на ее обмотках. Необходимость в гашении поля возникает при отключении генератора или повреждении в нем.

Для возбуждения синхронных машин применяется несколько систем. Простейшей из них является электромашинная система возбуждения с возбудителем постоянного тока (рис. 15). В этой системе в качестве источника используют специальный генератор постоянного тока GE , называемый возбудителем; он приводится во вращение от вала синхронного генератора, а его мощность составляет 1-3 % мощности синхронного генератора. Ток возбуждения синхронной машины I_B относительно велик и составляет несколько сотен и даже тысяч ампер. Поэтому его регулируют с помощью реостатов, установленных в цепи возбуждения возбудителя. Возбуждение возбудителя осуществляют по схеме самовозбуждения (рис. 15) или независимого возбуждения от специального генератора постоянного тока GEA , называемого подвозбудителем (рис. 16). Подвозбудитель работает с самовозбуждением, и сопротивление резистора $R_{ш2}$ при работе генератора не изменяется.

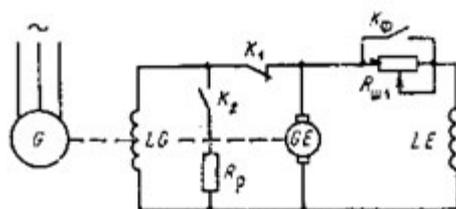


Рис. 15. Электромашинная система возбуждения:
 LG - обмотка возбуждения синхронного генератора; LE - обмотка
 возбуждения возбудителя GE

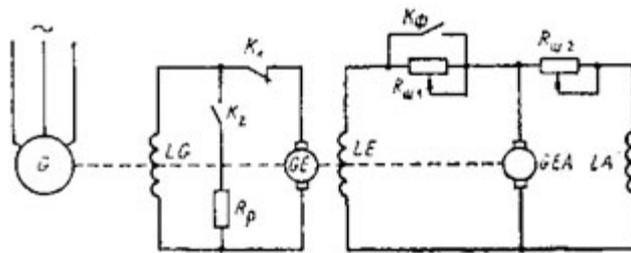


Рис. 16. Электромашинная система возбуждения с подвозбудителем: LA - обмотка возбуждения возбудителя GEА. Остальные обозначения те же, что и на рис. 15.

Для гашения магнитного поля применяют автомат гашения поля (АГП), который состоит из контакторов K_1 и K_2 и гасительного резистора R_p . Гашение поля проводится в следующем порядке. При включенном контакторе K_1 включается контактор K_2 , замыкающий обмотку возбуждения на гасительный резистор, имеющий сопротивления $r_p \approx 5 r_b$, где r_b - сопротивление обмотки возбуждения. Затем происходит размыкание контактора K_1 и ток в цепи обмотки возбуждения генератора уменьшается (рис. 17).

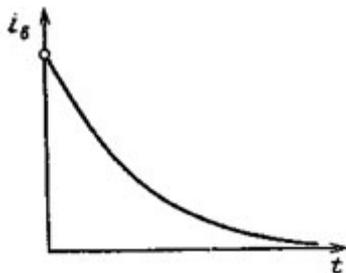
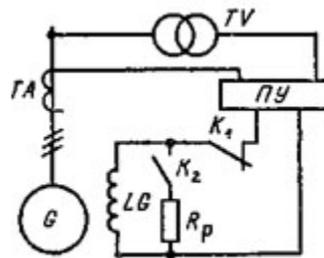


Рис. 17. Затухание тока возбуждения при гашении поля

Ток возбуждения можно было бы снизить до нуля отключением только одного контактора K_1 без включения гасительного резистора. Ток возбуждения в этом случае исчез бы практически мгновенно. Но мгновенный разрыв цепи возбуждения недопустим, так как из-за большой индуктивности обмотки возбуждения L_b в ней индуктировалась бы большая ЭДС самоиндукции $e = -L_b \cdot di/dt$, превышающая в несколько раз номинальное напряжение, в результате чего возможен пробой изоляции этой

обмотки. Кроме того, в контакторе K_1 при его отключении выделялась бы значительная энергия, запасенная в магнитном поле обмотки возбуждения, что могло бы вызвать разрушение контактора.

Рис. 18. Вентильная система с самовозбуждением: LG-обмотка возбуждения синхронного генератора; ПУ-преобразовательное устройство с регулятором напряжения; TV-трансформатор напряжения; ТА-трансформатор тока (компаундирующий трансформатор, служащий для поддержания напряжения при нагрузке генератора)



Форсировка возбуждения при использовании схем на рис. 15 и 16 осуществляется шунтированием резистора $R_{ш1}$ включенного в цепь возбуждения возбудителя.

В последнее время вместо электромашинных систем получают все большее применение вентильные системы возбуждения с диодами и тиристорами. Эти системы возбуждения могут быть построены на большие мощности и являются более надежными, чем электромашинные.

Различают три разновидности вентильных систем возбуждения: систему с самовозбуждением, независимую систему возбуждения и бесщеточную систему возбуждения.

В вентильной системе с самовозбуждением (рис. 18) для возбуждения синхронной машины используется энергия, отбираемая от обмотки якоря основного генератора G , которая затем преобразуется статическим преобразователем ПУ в энергию постоянного

тока. Эта энергия поступает в обмотку возбуждения. Начальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного намагничивания его полюсов.

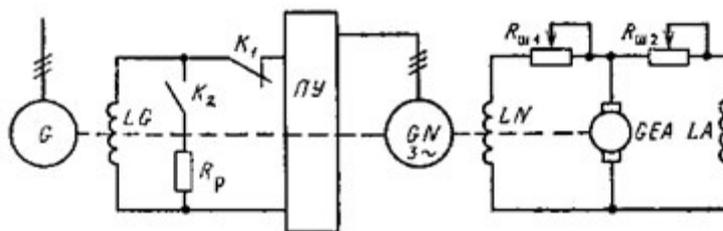


Рис. 19. вентильная система возбуждения:
GN-возбудитель переменного тока (синхронный); LN-обмотка возбуждения возбудителя; GEА и LA-возбудитель возбудителя и его обмотка возбуждения; ПУ-преобразовательное устройство с регулятором напряжения

В вентильной независимой системе возбуждения (рис. 19) энергия для возбуждения получается от специально го возбудителя GN , выполненного в виде трехфазного синхронного генератора. Ротор его укреплен на валу главного генератора. Переменное напряжение возбудителя выпрямляется и подводится к обмотке возбуждения.

Разновидностью вентильной независимой системы возбуждения является бесщеточная система возбуждения. В этом случае на валу основной синхронной машины размещается якорь возбудителя переменного тока с трехфазной обмоткой. Переменное напряжение этой обмотки с помощью выпрямительного моста, закрепленного на валу машины, преобразуется в постоянное напряжение и непосредственно (без колец) подается на обмотку возбуждения основного генератора. Обмотка возбуждения возбудителя располагается на статоре и получает питание от независимого источника.

1.15 Лекция №15 (2 часа).

Тема: «Рабочий процесс синхронного генератора»

1.15.1 Вопросы лекции:

1. Холостой ход генератора.
2. Работа генератора под нагрузкой.

1.15.2 Краткое содержание вопросов

1. Холостой ход генератора.

ЭДС в обмотке якоря. При холостом ходе магнитный поток генератора создается обмоткой возбуждения, причем он направлен по оси полюсов ротора и индуцирует в фазах

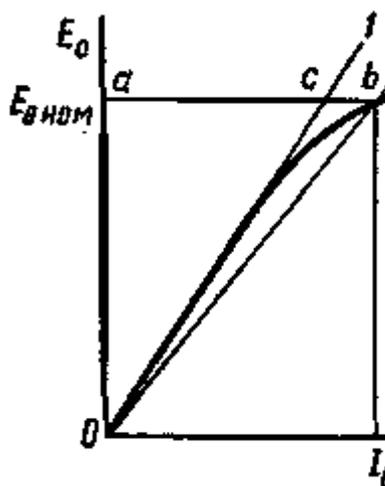


Рис. 6.17. Характеристика холостого хода синхронного

обмотки якоря ЭДС. Первая гармоническая E_0^* этой ЭДС определяется по той же формуле, что и первая гармоническая ЭДС для асинхронной машины:

(6.3)

$$E_0 = 4,44fI_{\text{кб}} \Phi_{\text{в}},$$

где w_a и $k_{\text{об}}$ — число витков в фазе и обмоточный коэффициент обмотки якоря; $\Phi_{\text{в}}$ — поток первой гармонической магнитного поля возбуждения.

* Для обозначения потоков первых гармонических магнитного поля, основных гармонических ЭДС и токов в формулах и на векторных диаграммах применяются соответствующие буквенные символы без индекса «1».

При небольших токах возбуждения магнитный поток мал и стальные участки магнитопровода машины не насыщены, вследствие чего их магнитное сопротивление незначительно. В этом случае магнитный поток практически определяется только магнитным сопротивлением воздушного зазора между ротором и статором, а характеристика холостого хода $E_0 = f(I_{\text{в}})$, или в другом масштабе $\Phi = f(I_{\text{в}})$, имеет вид прямой линии (рис. 6.17). По мере возрастания потока увеличивается магнитное сопротивление стальных участков магнитопровода. При индукции в стали более 1,7—1,8 Тл магнитное сопротивление стальных участков сильно возрастает и характеристика холостого хода становится нелинейной. Номинальный режим работы синхронных генераторов приблизительно соответствует «колелу» кривой характеристики холостого хода; при этом коэффициент насыщения $k_{\text{нас}}$, т. е. отношение отрезков ab/ac , составляет 1,1 — 1,4.

В ряде случаев при рассмотрении работы синхронной машины для облегчения математического анализа не учитывают нелинейность кривой холостого хода, заменяя ее прямой линией. В качестве спрямленной характеристики принимают касательную к кривой холостого хода (прямая 1 на рис. 6.17) или прямую, проходящую через точку b , соответствующую рассматриваемому режиму работы, например номинальному напряжению (прямая 2). Характеристика 1 соответствует работе машины при отсутствии насыщения; характеристика 2 учитывает некоторое среднее насыщенное состояние магнитной цепи машины.

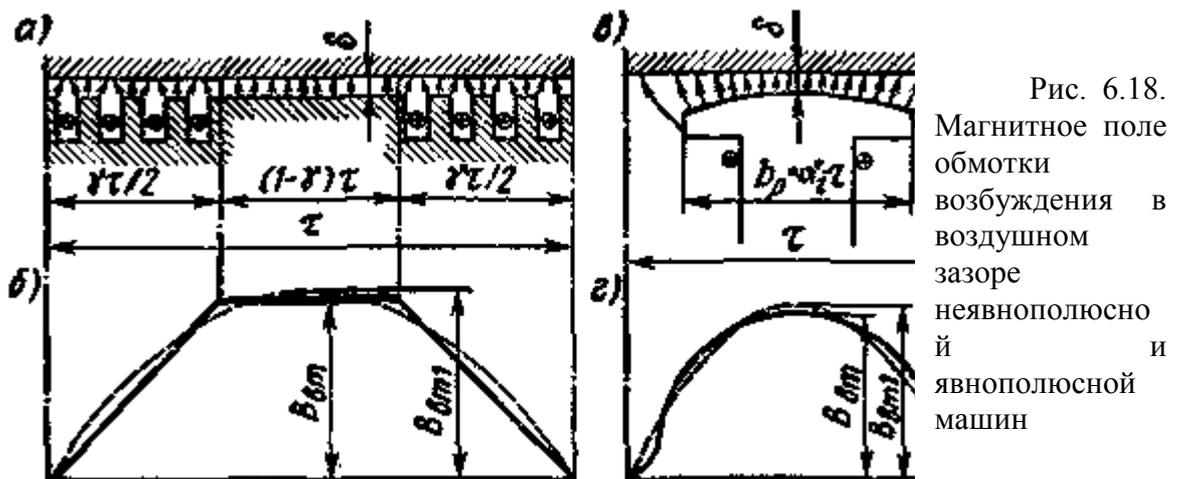
В теории синхронной машины широко используют систему относительных единиц. Основные параметры машины (ток, напряжение, мощность, сопротивления) выражают в долях соответствующей базисной величины*. В качестве базисных единиц при построении характеристики холостого хода принимают номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ машины и ток возбуждения $I_{\text{в}0}$, при котором ЭДС $E_0 = U_{\text{ном}}$. При этом относительные значения ЭДС и тока возбуждения $E^*0 = E_0 / U_{\text{ном}}$; $I_{\text{в}}^* = I_{\text{в}} / I_{\text{в}0}$.

* Для обозначения величин в относительных единицах используют те же буквенные символы, но со звездочками.

Характеристики холостого хода, построенные в относительных единицах для различных синхронных генераторов при одинаковых коэффициентах насыщения, совпадают (см. гл. 3). Поэтому характеристику холостого хода в относительных единицах можно принять единой для всех генераторов; для каждого конкретного генератора различие будет только в базисных единицах и коэффициентах насыщения.

Форма кривой напряжения. Напряжение, индуцированное в обмотке якоря при холостом ходе, должно быть практически синусоидальным. Согласно ГОСТу напряжение

считается практически синусоидальным, если разность между ординатой действительной кривой напряжения и ординатой синусоиды в одной и той же точке для генератора мощностью до 1 МВ•А не превышает 10%, а для генератора свыше 1 МВ•А — 5 % от амплитуды основной синусоиды. Чтобы получить кривую напряжения, близкую к синусоидальной, желательно иметь в машине приблизительно синусоидальное распределение магнитного поля. Для этого в неявнополюсных машинах обмотку возбуждения распределяют так, чтобы были уменьшены амплитуды МДС высших гармонических (см. гл. 3). В явнополюсных машинах это достигается путем увеличения зазора под краями полюсных наконечников. Обмотку якоря выполняют распределенной ($q = 4 \div 6$) с укороченным шагом ($y \approx 0,8\tau$). Чтобы исключить третьи гармонические токи и уменьшить потери мощности в машине, обмотку якоря в трехфазных генераторах соединяют по схеме Y. При этом отсутствуют третьи гармонические в линейных напряжениях. Подавление третьих гармонических в кривой фазного напряжения путем укорочения шага обмотки нерационально, так как при $y = 0,66\tau$ существенно уменьшается первая гармоническая.



Указанные меры позволяют получить на выходе машины практически синусоидальную ЭДС, поэтому при дальнейшем рассмотрении теории синхронной машины можно учитывать поток только первой гармонической магнитного поля и соответствующую гармоническую ЭДС. Поток первой гармонической магнитного поля возбуждения Φ_v называют потоком возбуждения, потоком взаимной индукции. Магнитное поле возбуждения. Магнитное поле, созданное обмоткой возбуждения, характеризуется рядом коэффициентов, посредством которых реальное распределение индукции в воздушном зазоре приводится к синусоидальному. К числу этих коэффициентов относятся: коэффициент формы кривой поля возбуждения $k_v = B_{v1}/B_{vm}$ - отношение амплитуды первой гармонической B_{v1} индукции поля возбуждения в воздушном зазоре к амплитуде B_{vm} действительного распределения этой индукции; коэффициент потока возбуждения $k_\Phi = \Phi/\Phi_v$ — отношение потока Φ , созданного обмоткой возбуждения в воздушном зазоре, к потоку первой гармонической Φ_v этого поля (потоку взаимной индукции). На рис. 6.18, а, б показано распределение магнитного поля возбуждения в воздушном зазоре в пределах одного полюсного деления для неявнополусной машины. На одно полюсное деление ротора приходится значительное число пазов (20—40), поэтому можно принять, что распределение индукции в воздушном зазоре вдоль окружности якоря (сплошная линия) имеет трапецеидальный характер. При таком распределении коэффициенты k_v и k_Φ зависят только от относительной длины γ обмотанной части полюсного деления ротора τ , т. е. от коэффициента полюсного перекрытия $\alpha_1 = B_{v.c.p}/B_{vm} = 1 - 0,5\gamma$. При этом коэффициент формы кривой поля возбуждения

(6.4)

$$k_v = B_{\text{вм1}} / B_{\text{вм}} = 8 \sin(\pi\gamma/2) / (\pi 2\gamma),$$

а коэффициент потока возбуждения

(6.5)

$$k_{\Phi} = \Phi / \Phi_v = \pi (1 - \gamma/2) / (2k_v).$$

В синхронных машинах коэффициент $\gamma = 0,65 \div 0,80$. В этом случае (при отсутствии насыщения) $k_v = 1,065 \div 0,965$, а $k_{\Phi} = 0,995 \div 0,975$. На рис. 6.18, в, г показано распределение магнитного поля возбуждения в воздушном зазоре в пределах одного полюсного деления для явнополюсной машины. При проектировании явнополюсных синхронных машин стремятся, чтобы кривая распределения поля возбуждения в воздушном зазоре (сплошная линия) приближалась к синусоиде (для этого воздушный зазор выполняют неравномерным), однако получить идеальное распределение не удастся. Поэтому наряду с первой гармонической (штриховая линия) имеется и ряд высших гармонических. Форма распределения магнитного поля и коэффициент k_v зависят от коэффициента $ai = br / \tau$ и формы воздушного зазора, т. е. от отношений $\delta_{\text{max}} / \delta$ и δ / τ . Обычно $ai = 0,65 \div 0,75$; $\delta_{\text{max}} / \delta = 1 \div 2,5$ и $\delta / \tau = 0,01 \div 0,05$. При этих условиях $k_v = 0,90 \div 1,2$. Коэффициент магнитного потока k_{Φ} также зависит от формы распределения магнитного поля и представляет собой отношение площадей, ограниченных рассматриваемыми кривыми. При указанных выше значениях br / τ , $\delta_{\text{max}} / \delta$ и δ / τ коэффициент $k_{\Phi} = 0,92 \div 1,08$.

2. Работа генератора под нагрузкой.

Реакция якоря. Рассмотрим работу трехфазного синхронного генератора в автономном режиме, когда к фазам обмотки статора подключены равные и однородные сопротивления (симметричная нагрузка). В этом случае по фазным обмоткам генератора проходят равные токи, сдвинутые по времени относительно друг друга на 120° . Эти токи создают магнитное поле якоря, вращающееся с частотой n_1 , равной частоте вращения ротора n_2 . Следовательно, *магнитные потоки якоря Φ_a и возбуждения Φ_v взаимно неподвижны и результирующий поток машины $\Phi_{\text{рез}}$ при нагрузке создается суммарным действием МДС F_v обмотки возбуждения и МДС F_a обмотки якоря*. Однако в синхронной машине (в отличие от асинхронной) МДС обмотки ротора (возбуждения) не зависит от нагрузки, поэтому результирующий поток при работе генератора в рассматриваемом режиме существенно отличается от потока при холостом ходе.

Воздействие МДС якоря на магнитное поле синхронной машины называют *реакцией якоря*. Так как под действием реакции якоря изменяется результирующий поток в машине, напряжение генератора, работающего в автономном режиме, зависит от значения и характера нагрузки, а также от индивидуальных особенностей машины: значения МДС обмотки возбуждения, свойств магнитной системы и др. Рассмотрим, как проявляется реакция якоря при двух основных конструктивных формах синхронных машин — неявнополюсных и явнополюсных.

Реакция якоря в неявнополюсной машине. В этой машине воздушный зазор между статором и ротором по всей окружности остается неизменным, поэтому результирующий магнитный поток машины $\Phi_{\text{рез}}$ и создаваемую им ЭДС E при любой нагрузке можно определить по характеристике холостого хода, исходя из результирующей МДС $F_{\text{рез}}$. Однако при отсутствии насыщения в магнитной цепи машины этот метод определения потока $\Phi_{\text{рез}}$ можно существенно упростить, так как от сложения указанных МДС можно перейти к непосредственному сложению пространственных векторов соответствующих потоков:

(6.6)

$$\vec{\Phi}_{\text{рез}} = \vec{\Phi}_v + \vec{\Phi}_a.$$

Рассмотрим влияние реакции якоря на рабочие свойства синхронной машины при различных углах сдвига фаз ψ между ЭДС E_0 и током I_a в обмотке якоря. Этот угол определяется характером нагрузки, т. е. значениями сопротивлений R , X_L и X_C нагрузки.

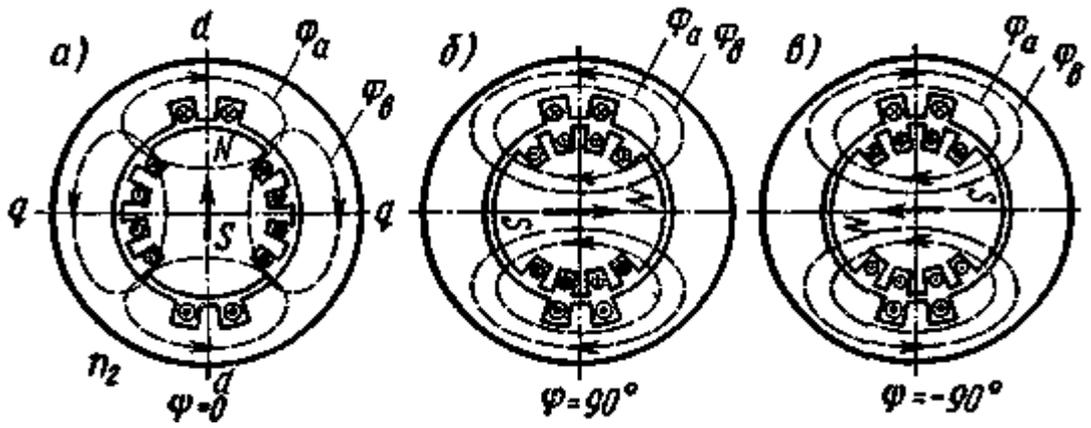


Рис. 6.19. Магнитные потоки в неявнополюсной машине при различных углах ψ нагрузки

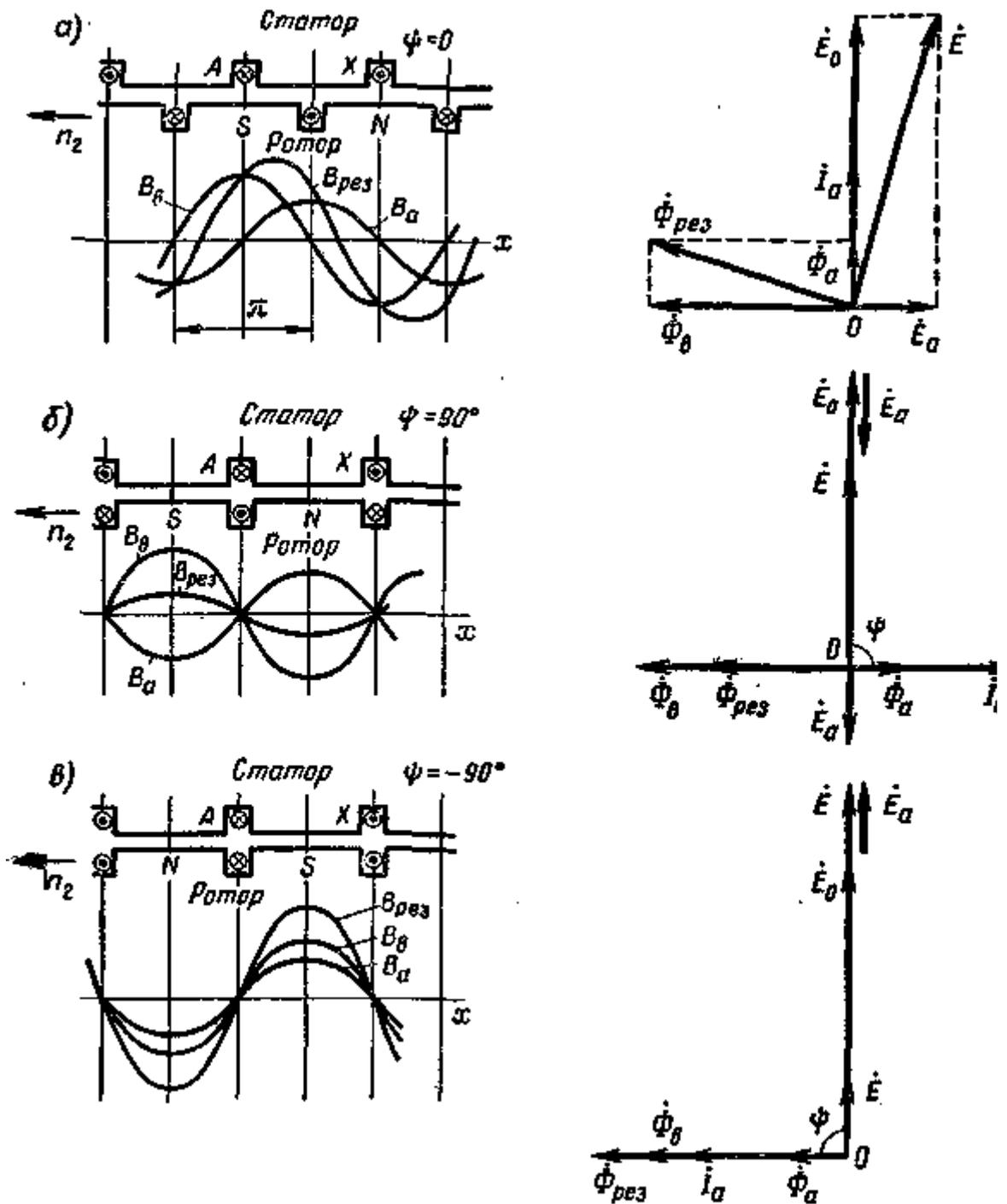


Рис. 6.20. Кривые распределения индукции в неявнополюсной машине и векторные диаграммы потоков и ЭДС при различных углах ψ

При $\psi = 0$ (рис. 6.19, *a* и 6.20, *a*) ток в фазе AX достигает максимума в момент времени, когда оси полюсов N и S ротора совпадают с осью среднего паза рассматриваемой обмотки. Известно (см. гл. 3), что в машинах переменного тока ось магнитного потока, создаваемого всеми фазами обмотки якоря, совпадает с осью той фазы, ток в которой максимален. Следовательно, в данный момент времени ось потока якоря совпадает с осью фазы AX , т. е. отстает от оси потока ротора на 90 электрических градусов.

Для этого случая показаны диаграммы распределения основных гармонических магнитных полей. Кривая распределения индукции $B_a = f(x)$ для двухполюсной машины

смещена относительно кривой индукции $Bв = f(x)$ в пространстве на 90° , т. е. поток якоря Φ_a действует в направлении, перпендикулярном действию потока возбуждения $\Phiв$ (поперек оси полюсов). В теории синхронной машины ось, проходящую через середину полюсов, называют *продольной* и обозначают $d-d'$; ось, проходящую между полюсами, называют *поперечной* и обозначают $q-q'$. Следовательно, при $\psi = 0$ *поток якоря действует по поперечной оси машины*. Кривая распределения результирующей индукции $Bрез = f(x)$ при этом сдвигается относительно кривой $Bв = f(x)$ против направления вращения ротора. В соответствии с пространственным сдвигом кривых распределения индукции сдвигаются и векторы потоков на временной векторной диаграмме, т. е. вектор Φ_a отстает от вектора $\Phiв$ на 90° . При этом модуль вектора результирующего потока $\Phiрез = \sqrt{\Phiв^2 + \Phi_a^2}$.

При $\psi = 90^\circ$ (рис. 6.19,б и 6.20,б) ток в фазе $AХ$ достигает максимума на четверть периода позднее момента, соответствующего максимуму ЭДС $E0$. За это время полюсы ротора перемещаются на половину полюсного деления, вследствие чего кривая $Bа = f(x)$ смещается относительно кривой $Bв = f(x)$ на 180° . При этом поток якоря Φ_a действует по продольной оси машины против потока возбуждения $\Phiв$; результирующий поток $\Phiрез = \Phiв - \Phi_a$ сильно уменьшается, вследствие чего уменьшается и ЭДС якоря E . Таким образом, *при $\psi = 90^\circ$ реакция якоря действует на машину размагничивающим образом*.

При $\psi = -90^\circ$ (рис. 6.19, в и 6.20, в) поток якоря также действует по продольной оси машины, но совпадает по направлению с потоком возбуждения, т. е. $\Phiрез = \Phiв + \Phi_a$. Следовательно, *при $\psi = -90^\circ$ реакция якоря действует на машину подмагничивающим образом, увеличивая ее результирующий поток $\Phiрез$ и ЭДС E* .

Выводы, полученные на основании рассмотренных трех случаев, можно распространить и на общий случай, когда $-90^\circ < \psi < 90^\circ$. При этом характерным является то, что *отстающий ток* (активно-индуктивная нагрузка) *размагничивает машину, а опережающий ток* (активно-емкостная нагрузка) *подмагничивает ее*.

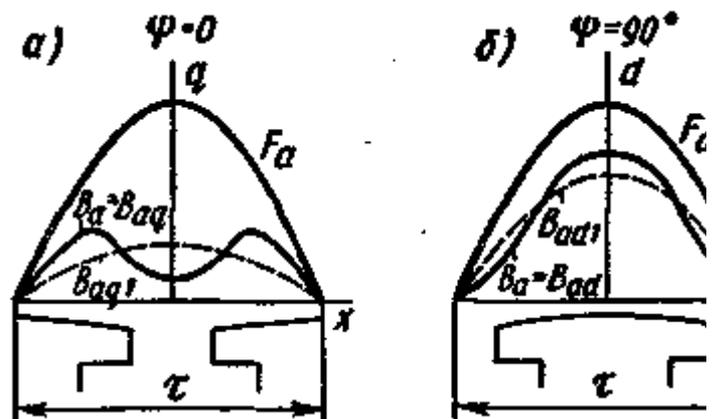
ЭДС E при работе генератора под нагрузкой можно рассматривать как сумму двух составляющих

(6.7)

$$\dot{E} = \dot{E}0 + \dot{E}a .$$

ЭДС Ea пропорциональна потоку Φ_a , а при отсутствии насыщения и току Ia в обмотке якоря, поэтому ее можно рассматривать как ЭДС самоиндукции, индуцированную в обмотке якоря, и представить в виде $\dot{E}a = -jIaXa$, где Xa — индуктивное сопротивление синхронной машины, обусловленное потоком якоря.

Рис. 6.21. Кривые распределения МДС якоря и создаваемой ею индукции в явнополюсной машине



Реакция якоря в явнополюсной машине. В этой машине воздушный зазор между статором и ротором не остается постоянным — он расширяется по направлению к краям полюсов и резко увеличивается в зоне междуполюсного пространства. Следовательно, поток якоря здесь зависит не только от значения МДС якоря F_a , но и от положения кривой распределения этой МДС $F_a = f(x)$ относительно полюсов ротора, так как одна и та

же МДС якоря в зависимости от ее пространственного положения создает различные магнитные потоки.

Так, например, при угле $\psi = 0$ (рис. 6.21, а), когда поток якоря направлен по поперечной оси машины ($q-q$), кривая распределения индукции $B_a = B_{aq}$ имеет седлообразную форму, хотя МДС якоря F_a распределена синусоидально. При этом максимуму МДС F_a соответствует небольшая индукция, так как магнитное сопротивление воздушного зазора максимально. При угле $\psi = 90^\circ$ (рис. 6.21,б), когда поток якоря направлен по продольной оси машины, кривая распределения индукции $B_a = B_{ad}$ расположена симметрично относительно оси полюсов $d-d$. В этом случае индукция имеет большее значение, чем при $\psi = 0$, так как магнитное сопротивление воздушного зазора в данном месте невелико. Соответственно различные максимальные значения имеют и первые гармонические B_{ad1} и B_{aq1} указанных кривых (штриховые линии).

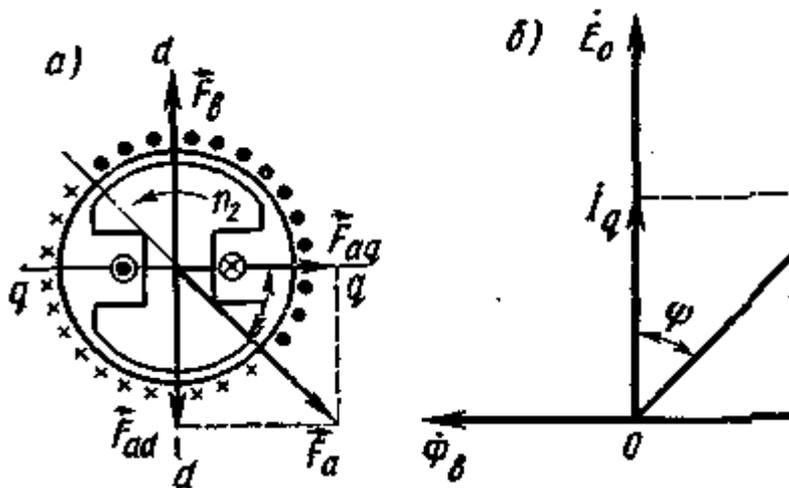
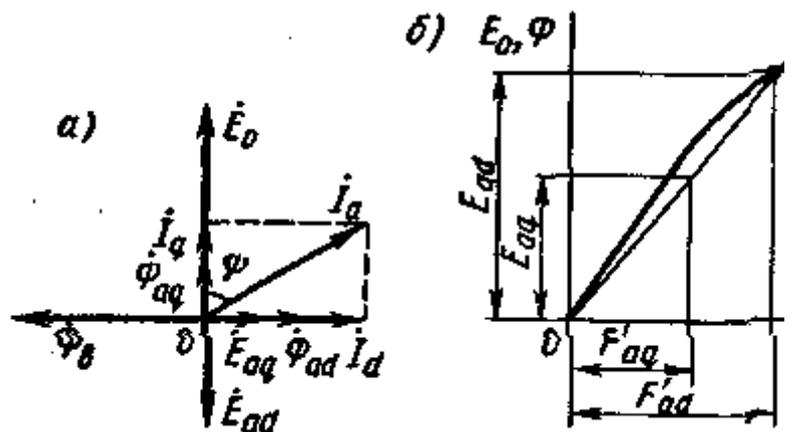


Рис. 6.22. Продольные и поперечные составляющие векторов МДС F_a и тока якоря I_a

Рис. 6.23. Векторная диаграмма потоков Φ_{ad} и Φ_{aq} ЭДС E_{ad} и E_{aq} явнополюсной машины и их определение по характеристике холостого хода



В связи с изменением результирующего сопротивления воздушного зазора при различных режимах явнополюсной машины при анализе ее работы используют так называемый метод двух реакций. Согласно этому методу, МДС якоря F_a в общем случае представляют в виде суммы двух составляющих — продольной $F_{ad} = F_a \sin \psi$ и поперечной $F_{aq} = F_a \cos \psi$ (рис. 6.22, а), причем $\vec{F}_a = \vec{F}_{ad} + \vec{F}_{aq}$. Продольная составляющая \vec{F}_{ad} создает продольный поток якоря Φ_{ad} , индуцирующий в обмотке якоря ЭДС E_{ad} , а поперечная составляющая \vec{F}_{aq} — поперечный поток Φ_{aq} , индуцирующий ЭДС E_{aq} , причем принимают, что эти потоки не оказывают влияния друг на друга. В соответствии с принятым методом ток якоря I_a создающий МДС F_a , также представляют в виде двух составляющих — продольной I_a и поперечной I_q (рис. 6.22,б).

Магнитные потоки Φ_{ad} и Φ_{aq} и индуцируемые ими ЭДС E_{ad} и E_{aq} (рис. 6.23, а) можно определить по кривой намагничивания машины или по спрямленной характеристике (рис. 6.23,б). Однако кривая намагничивания строится для МДС возбуждения, имеющей не синусоидальное, а прямоугольное распределение вдоль окружности якоря. Чтобы воспользоваться этой кривой или спрямленной характеристикой, МДС F_{ad} и F_{aq} следует привести к прямоугольной МДС возбуждения F_v , т. е. найти их эквивалентные значения F'_{ad} и F'_{aq} .

Установление эквивалентных значений F'_{ad} и F'_{aq} производят на следующем основании: МДС F_{ad} и F_{aq} создают в воздушном зазоре машины индукции B_{ad} и B_{aq} , распределенные вдоль окружности якоря так же, как и индукции, создаваемые МДС F_a соответственно при углах $\psi = 0$ и $\psi = 90^\circ$ (см. рис. 6.21, а, б). Первые гармонические B_{ad1} и B_{aq1} кривых $B_{ad} = f(x)$ и $B_{aq} = f(x)$ образуют магнитные потоки

$$\Phi_{ad} = F_{ad} / R_{m ad} ; \Phi_{aq} = F_{aq} / R_{m aq} ,$$

где $R_{m ad}$ и $R_{m aq}$ — магнитные сопротивления для соответствующих потоков, учитывающие не только форму воздушного зазора, но и синусоидальность кривой распределения МДС F_{ad} и F_{aq} вдоль окружности якоря. МДС возбуждения может создавать такие же потоки Φ_{ad} и Φ_{aq} при меньших значениях МДС F'_{ad} и F'_{aq} :

$$\Phi_{ad} = F_{ad} / R_{m ad} = F'_{ad} / R_{m.v} ;$$

$$\Phi_{aq} = F_{aq} / R_{m aq} = F'_{aq} / R_{m.v} .$$

Из последних выражений можно найти коэффициенты реакции якоря k_d и k_q , характеризующие уменьшение эффективных значений МДС якоря:

(6.8)

$$k_d = F'_{ad} / F_{ad} = R_{m.v} / R_{m ad} ; k_q = F'_{aq} / F_{aq} = R_{m.v} / R_{m aq} ,$$

где $R_{m.v}$ — магнитное сопротивление потока возбуждения, учитывающее форму воздушного зазора по продольной оси машины и прямоугольное распределение МДС F_v вдоль окружности якоря. Коэффициенты k_d и k_q физически характеризуют уменьшение магнитного сопротивления для потока Φ_v по сравнению с потоками Φ_{ad} и Φ_{aq} . Обычно $k_d = 0,80 \div 0,95$; $k_q = 0,30 \div 0,65$. В машине с явно выраженными полюсами ЭДС E при работе генератора под нагрузкой можно представить как сумму трех составляющих:

(6.9)

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} .$$

ЭДС E_{ad} и E_{aq} , индуцируемые продольным Φ_{ad} и поперечным Φ_{aq} потоками якоря, представляют собой по существу ЭДС самоиндукции, так как потоки Φ_{ad} и Φ_{aq} создаются МДС F_{ad} и F_{aq} , пропорциональными токам I_d и I_q . Поэтому для ненасыщенной машины можно считать, что

(6.10)

$$\dot{E}_{ad} = -jI_d X_{ad} ; \dot{E}_{aq} = -jI_q X_{aq} ,$$

где X_{ad} и X_{aq} — индуктивные сопротивления обмотки якоря, соответствующие полям продольной и поперечной реакции якоря.

Для машины с неявно выраженными полюсами МДС якоря приводятся к МДС обмотки возбуждения по формуле

(6.11)

$$F'_a = k_d F_a .$$

1.16 Лекция №16 (2 часа).

Тема: «Параметры и характеристики СГ»

1.16.1 Вопросы лекции:

1. Уравнение ЭДС и напряжений синхронного генератора. Индуктивные сопротивления синхронных машин.
2. Векторные диаграммы синхронного генератора.

3. Характеристики синхронного генератора и определение его параметров.

1.16.2 Краткое содержание вопросов

1. Уравнение ЭДС и напряжений синхронного генератора. Индуктивные сопротивления синхронных машин.

Опыты холостого хода и короткого замыкания. Синхронные индуктивные сопротивления машины можно определить по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода определяют характеристику холостого хода $E_0 = f(I_B)$ при номинальной частоте вращения машины, изменяя ток возбуждения I_B .

При опыте короткого замыкания фазы обмотки якоря замыкают накоротко через амперметры, после этого ротор приводят во вращение с номинальной частотой и снимают характеристику короткого замыкания, т. е. зависимость тока якоря от тока возбуждения $I_a = f(I_B)$. Эта характеристика (рис. 6.30, а) имеет линейный характер, так как при $R_a \approx 0$ сопротивление цепи якоря является чисто индуктивным и ток к. з. $I_k = I_d$ (рис. 6.30, б) создает поток реакции якоря, размагничивающий машину. В результате магнитная цепь машины оказывается ненасыщенной, т. е. ЭДС E_0 и ток I_k изменяются пропорционально току возбуждения I_B .

При работе в рассматриваемом режиме напряжение $U = 0$, поэтому уравнения (6.21) и (6.15) для явнополюсной и неявнополюсной машины принимают соответственно такой вид:

$$(6.23) \quad \dot{E}_0 = jI_k X_{ad} + jI_k X_{\sigma a} = jI_k X_d ;$$

$$(6.24) \quad \dot{E}_0 = jI_k X_a + jI_k X_{\sigma a} = jI_k X_{\text{сн}} .$$

Определение индуктивных сопротивлений X_d и X_q . Из формулы (6.23) можно определить синхронное индуктивное сопротивление машины по продольной оси $X_d = E_0 / I_k$, где ЭДС E_0 и ток I_k должны быть взяты при одном и том же значении тока возбуждения (рис. 6.30, а). Для прямолинейного участка характеристики холостого хода не имеет значения, при каком токе возбуждения определяется X_d , так как во всех случаях $X_d = \text{const}$. Это же значение сопротивления X_d получим при определении E_0 по спрямленной характеристике холостого хода Oa , соответствующей ненасыщенной машине.

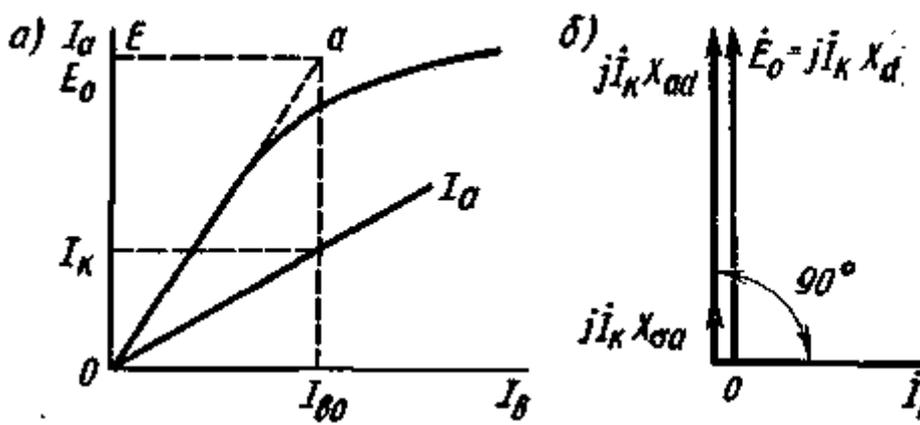


Рис. 6.30. Характеристики холостого хода и короткого замыкания (а) и векторная диаграмма явнополюсной машины при коротком замыкании (б)

При учете насыщения сопротивление X_d уменьшается. Однако его значение различно для разных точек реальной характеристики холостого хода. Поэтому практически употребляется значение X_d для ненасыщенной машины, а учет насыщения, если это требуется, производится путем непосредственного определения соответствующих ЭДС по характеристике холостого хода (как это показано в § 6.6). Если известны коэффициенты приведения k_d и k_q , то по полученному значению X_d можно определить синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси $X_q = (k_q / k_d) X_d$.

В неявнополюсных машинах $X_d = X_q = X_{сн}$, т. е. $X_{сн} = E_0/I_k$. Если выразить синхронные индуктивные сопротивления в относительных единицах, то

(6.25)

$$X_d^* = (I_{ном} / U_{ном}) X_d ; X_q^* = (I_{ном} / U_{ном}) X_q ,$$

где $I_{ном}$ и $U_{ном}$ — номинальные значения фазных тока и напряжения.

В современных синхронных явнополюсных машинах средней и большой мощности $X_d^* = 0,6 \div 1,6$, а $X_q^* = 0,4 \div 1$. Сопротивление X_d^* определяется в основном реакцией якоря, так как относительная величина индуктивного сопротивления, обусловленного потоком рассеяния, мала ($X_{\sigma a}^* = 0,1 \div 0,2$). В неявнополюсных машинах средней и большой мощности обычно сопротивление $X_{сн}^* = 0,9 \div 2,4$.

Сопротивления, выраженные в относительных единицах, характеризуют параметры машины, показывая относительную (относительно номинального напряжения) величину падения напряжения при номинальном токе. Кроме того, эти величины позволяют сравнивать свойства генераторов различной мощности.

Отношение короткого замыкания. Иногда в паспорте машины указывают величину, обратную X_d^* , называемую отношением короткого замыкания:

(6.26)

$$OKЗ = 1/X_d^* = U_{ном} / (I_{ном} X_d) .$$

Это отношение характеризует значение установившегося тока к. з. $I_{к.ном} = OKЗ I_{ном}$, который возникает при номинальном токе возбуждения генератора (соответствующем номинальному напряжению). При указанных выше значениях X_d^* и X_q^* для неявнополюсных машин $OKЗ = 0,5 \div 1,0$, а для явнополюсных $0,8 \div 1,8$. Следовательно, установившийся ток короткого замыкания в синхронных машинах сравнительно невелик (в некоторых машинах он меньше номинального), так как при этом режиме $\psi_k \approx 0$, и поле якоря сильно размагничивает машину. Очевидно, что при коротком замыкании результирующий магнитный поток $\Phi_{рез.к} \ll \Phi_{в}$ и ЭДС $E \ll E_0$.

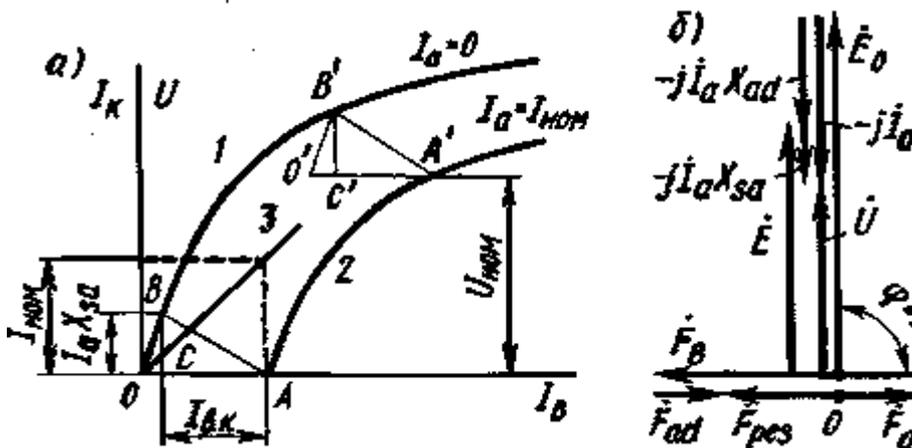


Рис. 6.31. Индукционная нагрузочная характеристика синхронного генератора (а) и его векторная диаграмма при индуктивной нагрузке (б)

Величина ОКЗ имеет большое значение для эксплуатации: она показывает кратность тока к. з. и определяет значение мощности, которой можно нагрузить синхронный генератор. Следовательно, целесообразнее иметь машину с большим ОКЗ, однако это требует выполнения ее с большим воздушным зазором, что существенно удорожает машину.

Определение индуктивного сопротивления $X_{\sigma a}$. Для определения $X_{\sigma a}$ снимают индукционную нагрузочную характеристику генератора, т. е. зависимость его напряжения U от тока возбуждения I_b при неизменном токе нагрузки $I_a = I_{ном}$, частоте f и $\cos \phi = 0$ (чисто индуктивная нагрузка). Нагрузочная характеристика 2 (рис. 6.31, а) проходит ниже характеристики холостого хода 1, которую можно рассматривать как частный случай нагрузочной характеристики при $I_a = 0$. Так как при снятии индукционной нагрузочной характеристики в машине имеется только продольная составляющая МДС $F_{ад}$ реакции

якоря, то, как следует из векторной диаграммы (рис. 6.31, б), результирующая МДС $\dot{F}_{рез} = \dot{F}_в - \dot{F}_{ад}$ и напряжение машины $\dot{U} = \dot{E}0 - j\dot{I}_а X_{ад} - j\dot{I}_а X_{\sigma а} = E - j\dot{I}_а X_{\sigma а}$. Точка A кривой 2 соответствует режиму короткого замыкания, т. е. значению $U = 0$ при $I_k = I_{ном}$. Треугольник ABC называют реактивным или характеристическим треугольником; его горизонтальный катет CA соответствует току возбуждения $I_{в.к}$, компенсирующему размагничивающее действие реакции якоря $\dot{F}_{ад}$ ном, а вертикальный катет BC — ЭДС, необходимой для компенсации падения напряжения $\dot{I}_а$ ном $X_{\sigma а}$ при номинальном токе якоря. Для любой другой точки нагрузочной характеристики при $\varphi = 90^\circ$ составляющая тока возбуждения, компенсирующая размагничивающее действие реакции якоря, остается неизменной, так как значение тока якоря постоянно. Неизменным остается и падение напряжения $\dot{I}_а$ ном $X_{\sigma а}$. Следовательно, нагрузочную характеристику можно получить как след вершины A реактивного треугольника при перемещении его так, чтобы вершина B скользила по характеристике холостого хода, а стороны треугольника оставались бы параллельными соответствующим сторонам первоначально построенного треугольника. В этом легко убедиться, рассматривая точку A' и треугольник $A'B'C'$ (рис. 6.31) при номинальном напряжении $U_{ном}$. В этом режиме ЭДС $E = U_{ном} + I_{аном} X_{\sigma а}$, т. е. равна ординате точки B' ; отрезок $A'C'$ соответствует току $I_{в.к}$, компенсирующему размагничивающее действие реакции якоря. Отрезок $O'C' = OC$ соответствует составляющей тока возбуждения, необходимой для индуцирования ЭДС $E_{\sigma а} = I_{аном} X_{\sigma а}$.

Из рассмотренного выводим следующий способ определения индуктивного сопротивления $X_{\sigma а}$. На кривой 2 находят точку A' , соответствующую номинальному напряжению $U_{ном}$, и откладывают влево от этой точки отрезок $O'A' = OA$ (его определяют по характеристике короткого замыкания на рис. 6.30, а для тока $I_k = I_{ном}$). Затем через точку O' проводят прямую, параллельную начальной части характеристики 1, до пересечения с этой характеристикой в точке B' . Опустив из точки B' перпендикуляр на линию $O'A'$, получают отрезок $B'C' = I_{аном} X_{\sigma а}$. Следовательно, $X_{\sigma а} = B'C' / I_{аном}$.

Сопротивление, найденное описанным способом (его называют *сопротивлением Потье*), несколько превышает действительное сопротивление $X_{\sigma а}$, обусловленное потоками рассеяния; обычно $X_{P} \approx (1,05 \div 1,3) X_{\sigma а}$. Последнее объясняется тем, что в точках B' (при холостом ходе) и A' (при токе $I_{аном}$) токи возбуждения различны, и, хотя ЭДС и потоки в воздушном зазоре одинаковы, при большем токе возбуждения наблюдается увеличение магнитного сопротивления из-за больших потоков рассеяния обмотки возбуждения, насыщающих полюсы и ярмо индуктора, т. е. реально $A'C' > AC$.

2. Векторные диаграммы синхронного генератора.

Неявнополюсной генератор. При анализе работы синхронных генераторов и двигателей обычно используют векторные диаграммы: при качественном — упрощенные диаграммы, справедливые для машин, в которых отсутствует насыщение; при количественном — уточненные диаграммы.

Для цепи якоря неявнополюсного синхронного генератора можно составить уравнение

(6.12)

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{\sigma а} - \dot{I}_а R_a,$$

или

(6.13)

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_а X_{\sigma а} - \dot{I}_а R_a = \dot{E}0 + \dot{E}_а - j\dot{I}_а R_{\sigma а} - \dot{I}_а R_a,$$

где $E_{\sigma а}$ — ЭДС, индуцированная в обмотке якоря потоком рассеяния; $X_{\sigma а}$ — индуктивное сопротивление, обусловленное этим потоком.

Векторная диаграмма неявнополюсной машины (рис. 6.24, а), называемая диаграммой Потье, позволяет определить ЭДС холостого хода $E0$ с учетом насыщения, если заданы напряжение, ток нагрузки (по величине и фазе), характеристика холостого

хода и параметры машины. При ее построении по известным падениям напряжения определяют вектор ЭДС

(6.14)

$$\dot{E} = \dot{U} + \dot{I}_a R_a + j \dot{I}_a X_{\sigma a} .$$

Так как ЭДС E индуцируется результирующим потоком $F_{рез}$, который создается результирующей МДС $F_{рез} = F_{в} + kd F_{a}$, то по характеристике холостого хода (рис. 6.24,б) по значению $F_{рез}$ можно определить соответствующую ЭДС E . Векторы $F_{рез}$ и $\Phi_{рез}$ совпадают по фазе и оба эти вектора опережают вектор \dot{E} на 90° . Зная $F_{рез}$ и параметры машины, можно найти МДС возбуждения $F_{в} = F_{рез} - kd F_{a}$, а затем по характеристике холостого хода определить ЭДС холостого хода E_0 . Вектор \dot{E}_0 отстает от вектора $F_{в}$ на 90° . Если требуется перейти от режима холостого хода к режиму нагрузки, построения производят в обратном порядке.

Если машина не насыщена, то векторная диаграмма существенно упрощается, так как в этом случае можно складывать не МДС $F_{в}$ и $kd F_{a}$, а соответствующие им потоки и ЭДС. Упрощенную векторную диаграмму синхронной неявнополюсной машины (рис. 6.25, а) строят по уравнению (6.13).

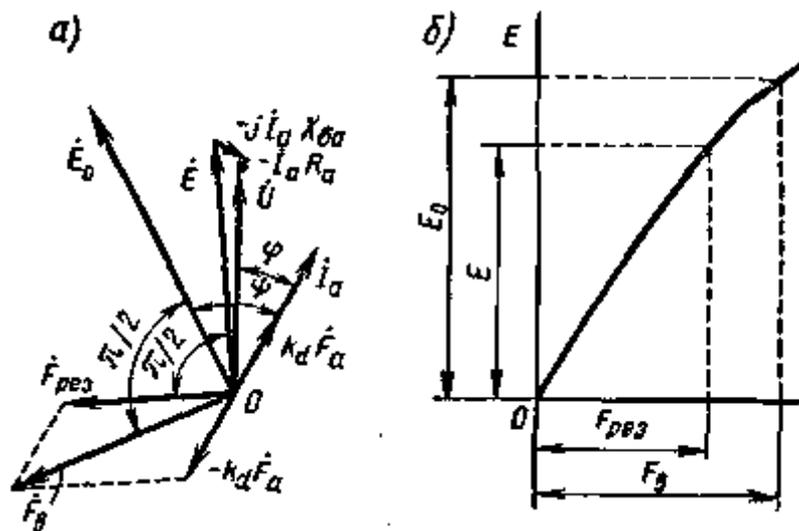
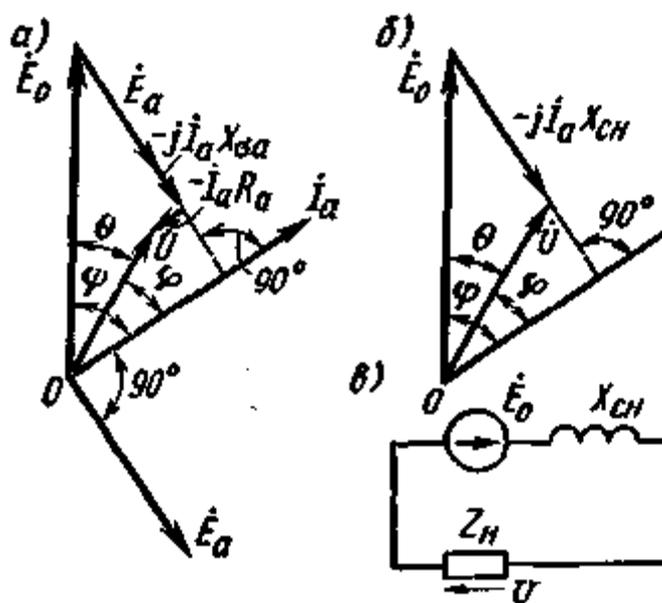


Рис. 6.24. Векторная диаграмма синхронной неявнополюсной машины и характеристика холостого хода

Рис. 6.25. Упрощенные векторные диаграммы и схема замещения синхронной неявнополюсной машины



Поскольку падение напряжения в активном сопротивлении обмотки якоря $I_a R_a$ сравнительно невелико, им можно пренебречь. Заменяя, кроме того, в уравнении (6.13) $\dot{E}_a = -jI_a X_a$, получаем

(6.15)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jI_a X_a - jI_a X_{\sigma a} = E_0 - jI_a X_{\Sigma} .$$

Величину $X_{\Sigma} = X_a + X_{\sigma a}$ называют полным или синхронным индуктивным сопротивлением машины. Упрощенная векторная диаграмма и схема замещения, соответствующие уравнению (6.15), изображены на рис. 6.25,б,в; их широко используют при качественном анализе работы синхронной машины. Необходимо, однако, отметить, что при определении E_0 по упрощенной диаграмме получается несколько большее значение, чем по точной диаграмме (см. рис. 6.24, а), в которой учитывается насыщение.

Угол θ между векторами \dot{U} и \dot{E}_0 называют *углом нагрузки*. При работе синхронной машины в генераторном режиме напряжение U всегда отстает от ЭДС E_0 , в этом случае угол θ считается положительным. *Чем больше нагрузка генератора (отдаваемая им мощность), тем больше угол θ .*

Явнополюсный генератор. Упрощенную диаграмму синхронной явнополюсной машины можно также построить по общему уравнению (6.12), которое с учетом (6.9) принимает вид

(6.16)

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{\sigma a} - I_a R_a = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - I_a R_a .$$

На рис. 6.26,а приведена векторная диаграмма, соответствующая уравнению (6.16). Если пренебречь малой величиной R_a , то

(6.17)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} .$$

ЭДС $E_{\sigma a}$, индуцируемую в обмотке якоря потоком рассеяния, можно представить в виде суммы двух составляющих, ориентированных по осям d - d и q - q :

(6.18)

$$\dot{E}_{\sigma a} = \dot{E}_{\sigma ad} + \dot{E}_{\sigma aq} ,$$

где

(6.19)

$$\dot{E}_{\sigma ad} = -jI_d X_{\sigma a} ; \dot{E}_{\sigma aq} = -jI_q X_{\sigma a} ,$$

или

$$E_{\sigma ad} = E_{\sigma a} \sin \psi = I_a X_{\sigma a} \sin \psi = I_d X_{\sigma a} ;$$

$$E_{\sigma aq} = E_{\sigma a} \cos \psi = I_a X_{\sigma a} \cos \psi = I_q X_{\sigma a} .$$

С учетом (6.18) вместо (6.17) получим

(6.20)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma ad} + \dot{E}_{\sigma aq} = \dot{E}_0 + \dot{E}_d + \dot{E}_q ,$$

где

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma ad} ; \dot{E}_q = \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma aq} .$$

Векторная диаграмма, построенная по (6.20), приведена на рис. 6.26,б.

Заменяем ЭДС соответствующими индуктивными падениями напряжения:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jI_d X_{ad} - jI_q X_{aq} - jI_d X_{\sigma a} - jI_q X_{\sigma a} ,$$

или

(6.21)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jI_d X_d - jI_q X_q ,$$

где $X_d = X_{ad} + X_{\sigma a} ; X_q = X_{aq} + X_{\sigma a} .$

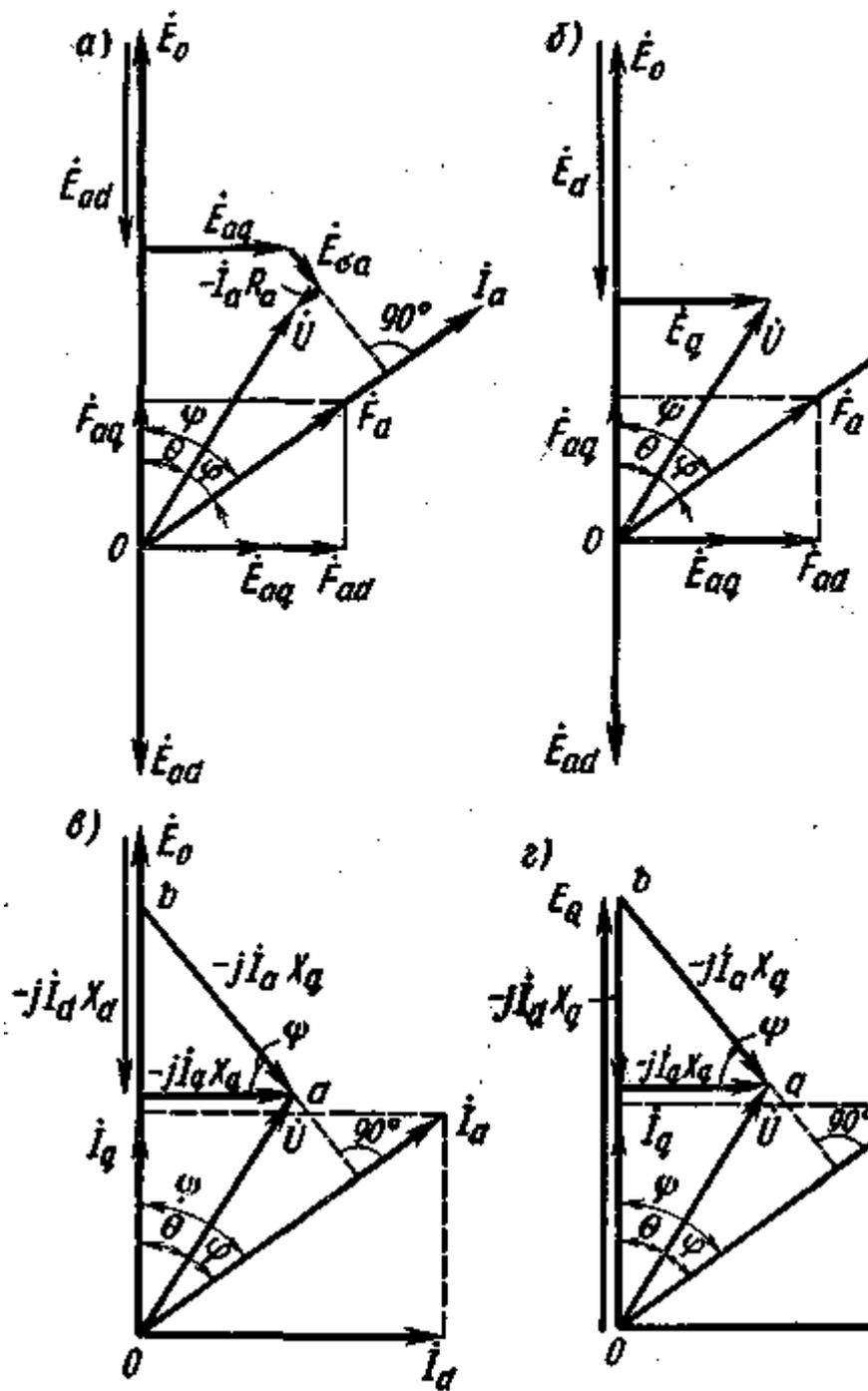


Рис. 6.26.
Упрощенные
векторные
диаграммы
синхронной
явнополюсной
машины

Сопротивления X_d и X_q называют полными или синхронными индуктивными сопротивлениями обмотки якоря по продольной и поперечной осям.

На рис. 6.26, в приведена векторная диаграмма, построенная по (6.21). Если заданы векторы тока \dot{I}_a и напряжения \dot{U} , а угол ψ неизвестен, то его можно определить, проведя из конца вектора напряжения \dot{U} отрезок ab , равный $I_a X_q$ и перпендикулярный вектору тока \dot{I}_a . При этом точка b будет расположена на линии, соответствующей направлению вектора \dot{E}_0 , так как проекция отрезка ab на вектор \dot{E}_q равна модулю этого вектора:

$$ab \cos \psi = I_a X_q \cos \psi = I_q X_q = E_q .$$

В некоторых случаях при качественном анализе явнополюсную машину заменяют эквивалентной неявнополюсной, у которой синхронное индуктивное сопротивление по обеим осям равно сопротивлению X_q рассматриваемой явнополюсной машины. Возможность такой замены следует из векторной диаграммы (рис. 6.26, в). Такая

эквивалентная машина имеет вместо ЭДС E_0 эквивалентную ЭДС E_Q (рис. 6.26, г), причем угол нагрузки θ остается одним и тем же.

3. Характеристики синхронного генератора и определение его параметров.

Внешние характеристики. Зависимости напряжения U от тока нагрузки I_a при неизменных токе возбуждения I_b , угле φ и частоте f_1 (постоянной частоте вращения ротора n_2) называют внешними характеристиками генератора. Их можно построить с помощью векторных диаграмм. Допустим, что при номинальной нагрузке I_a ном генератор имеет номинальное напряжение $U_{ном}$, что достигается путем соответствующего выбора тока возбуждения. При уменьшении тока нагрузки до нуля напряжение генератора становится равным ЭДС холостого хода E_0 . Следовательно, векторная диаграмма, построенная при номинальной нагрузке, сразу дает две точки внешней характеристики. Форма внешней характеристики зависит от характера нагрузки, т. е. от угла сдвига фаз φ между \dot{U} и \dot{I}_a , так как в зависимости от этого изменяется вектор \dot{E}_0 (при заданном значении $U = U_{ном}$).

На рис. 6.27 показаны упрощенные векторные диаграммы генератора с неявно выраженными полюсами для активной (а), активно-индуктивной (б) и активноемкостной (в) нагрузок. При активной и активно-индуктивной нагрузках ЭДС $E_0 > U$; при активноемкостной нагрузке ЭДС $E_0 < U$. Таким образом, в первых двух случаях при увеличении нагрузки напряжение генератора уменьшается, в третьем — увеличивается. Это объясняется тем, что при активно-емкостной нагрузке имеется продольная намагничивающая составляющая реакции якоря, а при активной и активно-индуктивной нагрузках — продольная размагничивающая составляющая (при чисто активной нагрузке угол $\psi > 0$).

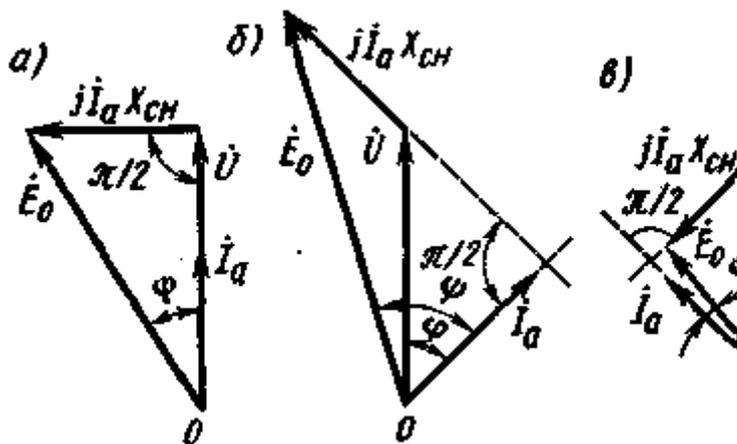
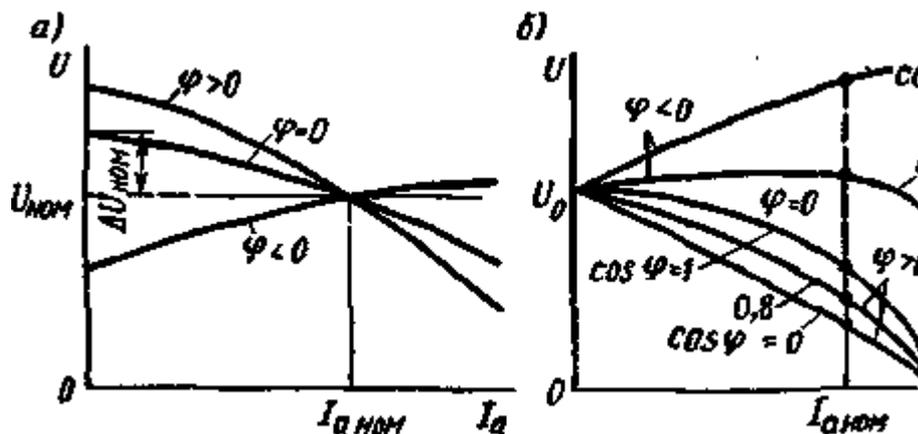


Рис. 6.27. Упрощенные векторные диаграммы синхронного неявнополюсного генератора при различных видах нагрузки

Рис. 6.28. Внешние характеристики синхронного генератора при различных видах нагрузки



На рис. 6.28, а изображены внешние характеристики генератора при различных видах нагрузки, полученные при одинаковом для всех характеристик значении $U_{ном}$ а

на рис. 6.28,б - при одинаковом значении $U_0 = E_0$. При $U = 0$ (короткое замыкание) все характеристики пересекаются в одной точке, соответствующей значению тока I_k .

При переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки изменение напряжения характеризуется величиной (%)

(6.22)

$$\Delta u = [(U_0 - U_{ном}) / U_{ном}] 100.$$

Обычно генераторы работают с $\cos \varphi = 0,9 \div 0,85$ при отстающем токе. В этом случае $\Delta u = 25 \div 35$ %. Чтобы подключенные к генератору потребители работали при напряжении, близком к номинальному, применяют специальные устройства, стабилизирующие его выходное напряжение U , например быстродействующие регуляторы тока возбуждения. Чем больше Δu , тем более сложным получается регулирующее устройство, а поэтому желательно иметь генераторы с небольшой величиной Δu . Однако для получения небольшого изменения Δu

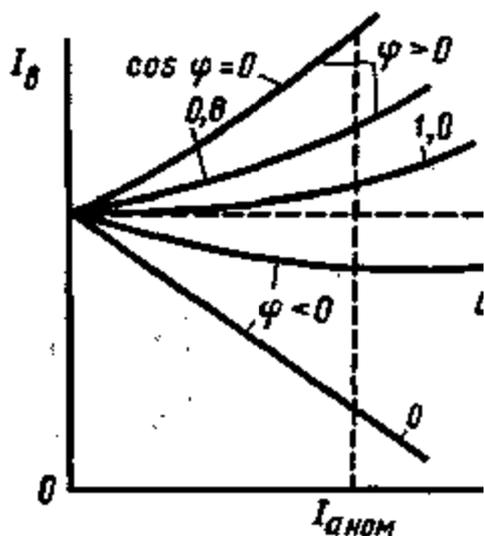


Рис. 6.29. Регулировочные характеристики синхронного генератора при различных видах нагрузки

необходимо снижать синхронное индуктивное сопротивление $X_{сн}$ (в неявнополюсных машинах) или соответственно X_d и X_q (в явнополюсных машинах), для чего требуется увеличивать воздушный зазор между ротором и статором. Это, в свою очередь, требует увеличения МДС обмотки возбуждения, т. е. ее размеров, что в конечном итоге делает синхронную машину более дорогой.

В турбогенераторах большой мощности мощность ограничивается именно размерами ротора, на котором размещена обмотка возбуждения. Поэтому в современных турбогенераторах с повышением мощности машины одновременно возрастает и изменение напряжения Δu . В гидрогенераторах (по сравнению с турбогенераторами) воздушный зазор обычно имеет гораздо большую величину, поэтому у них относительно слабее проявляется реакция якоря, т. е. они имеют меньшие синхронные индуктивные сопротивления, выраженные в относительных единицах, что обуславливает и меньшее изменение напряжения Δu .

Регулировочные характеристики. Зависимости тока возбуждения I_b от тока нагрузки I_a при неизменных напряжении U , угле φ и частоте f называют регулировочными характеристиками (рис. 6.29). Они показывают, как надо изменять ток возбуждения генератора, чтобы поддерживать его напряжение неизменным при

изменении тока нагрузки. Очевидно, что с возрастанием нагрузки при $\varphi > 0$ необходимо увеличивать ток возбуждения, а при $\varphi < 0$ - уменьшать его. Чем больше угол φ по абсолютной величине, тем в большей степени требуется изменять ток возбуждения.

1.17 Лекция №17 (2 часа).

Тема: «Параллельная работа СГ с энергосистемой»

1.17.1 Вопросы лекции:

1. Включение синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой.
2. Регулирование активной и реактивной мощностей.
3. Мощность и электромагнитный момент синхронного генератора.

1.17.2 Краткое содержание вопросов

1. Включение синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой.

Особенности работы генератора на сеть большой мощности. Обычно на электростанциях устанавливают несколько синхронных генераторов для параллельной работы на общую электрическую сеть. Это обеспечивает увеличение общей мощности электростанции (при ограниченной мощности каждого из установленных на ней генераторов), повышает надежность энергоснабжения потребителей и позволяет лучше организовать обслуживание агрегатов. Электрические станции, в свою очередь, объединяют для параллельной работы в мощные энергосистемы, позволяющие наилучшим образом решать задачу производства и распределения электрической энергии. Таким образом, для синхронной машины, установленной на электрической станции или на каком-либо объекте, подключенном к энергосистеме, типичным является режим работы на сеть большой мощности, по сравнению с которой собственная мощность генератора является очень малой. В этом случае с большой степенью точности можно принять, что генератор работает параллельно с сетью бесконечно большой мощности т. е. что *напряжение сети U_c и ее частота f_c являются постоянными, не зависящими от нагрузки данного генератора.*

Включение генератора на параллельную работу с сетью. В рассматриваемом режиме необходимо обеспечить возможно меньший бросок тока в момент присоединения генератора к сети. В противном случае возможны срабатывание защиты поломка генератора или первичного двигателя.

Ток в момент подключения генератора к сети будет равен нулю, если удастся обеспечить равенство мгновенных значений напряжений сети u_c и генератора u_g :

(6.27)

$$U_{cm} \sin(\omega c t - \alpha c) = U_{gm} \sin(\omega g t - \alpha g).$$

На практике выполнение условия (6.27) сводится к выполнению трех равенств: значений напряжений сети и генератора $U_{cm} = U_{gm}$ или $U_c = U_g$; частот $\omega c = \omega g$ или $f_c = f_g$; их начальных фаз $\alpha c = \alpha g$ (совпадение по фазе векторов \vec{U}_c и \vec{U}_g). Кроме того, для трехфазных генераторов нужно согласовать порядок чередования фаз.

Совокупность операций, проводимых при подключении генератора к сети, называют синхронизацией. Практически при синхронизации генератора сначала устанавливают номинальную частоту вращения ротора, что обеспечивает приближенное равенство частот $f_c \approx f_g$ а затем, регулируя ток возбуждения, добиваются равенства напряжения $U_c = U_g$. Совпадение по фазе векторов напряжений сети и генератора ($\alpha c = \alpha g$) контролируется специальными приборами — *ламповым и стрелочными синхроноскопами.*

Ламповые синхроноскопы применяют для синхронизации генераторов малой мощности, поэтому обычно их используют в лабораторной практике. Этот прибор представляет собой три лампы, включенные между фазами генератора и сети (рис. 6.32, а). На каждую лампу действует напряжение $\Delta u = u_c - u_g$, которое при $f_c \neq f_g$ изменяется с частотой $\Delta f = f_c - f_g$, называемой *частотой биений* (рис. 6.32,б). В этом случае лампы

мигают. При $f_c \approx f_r$ разность Δu изменяется медленно, вследствие чего лампы постепенно загораются и погасают.

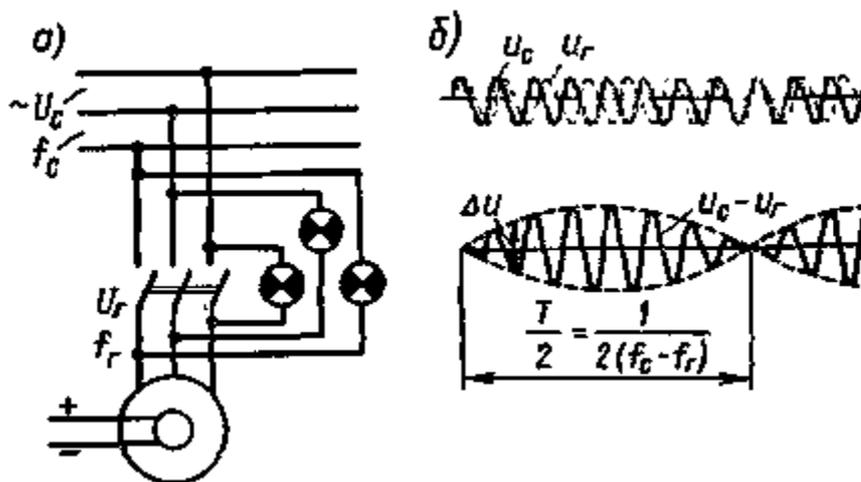


Рис. 6.32. Схема подключения синхронного генератора к сети с помощью лампового синхроноскопа (а) и кривые изменения напряжений u_c и u_r перед включением генератора (б)

Обычно генератор подключают к сети в тот момент, когда разность напряжений Δu на короткое время становится близкой нулю, т. е. в середине периода погасания ламп. В этом случае выполняется условие совпадения по фазе векторов \dot{U}_c и \dot{U}_r . Для более точного определения этого момента часто применяют нулевой вольтметр, имеющий растянутую шкалу в области нуля. После включения генератора в сеть дальнейшая синхронизация частоты его вращения, т. е. обеспечение условия $n_2 = n_1$, происходит автоматически.

Генераторы большой мощности синхронизируют с помощью стрелочных синхроноскопов, работающих по принципу вращающегося магнитного поля. В этих приборах при $f_c \neq f_r$ стрелка вращается с частотой, пропорциональной разности частот $f_c - f_r$, в одну или другую сторону в зависимости от того, какая из этих частот больше. При $f_c = f_r$ стрелка устанавливается на нуль; в этот момент и следует подключать генератор к сети. На электрических станциях обычно используют автоматические приборы для синхронизации генераторов без участия обслуживающего персонала.

Довольно часто применяют метод самосинхронизации, при котором генератор подключают к сети при отсутствии возбуждения (обмотка возбуждения замыкается на активное сопротивление). При этом ротор разгоняют до частоты вращения, близкой к синхронной (допускается скольжение до 2%), за счет вращающего момента первичного двигателя и асинхронного момента, обусловленного индуцированием тока

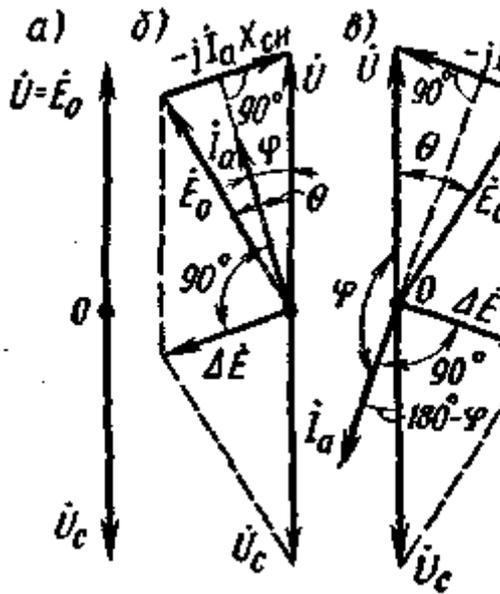


Рис. 6.33. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного генератора при параллельной работе с сетью

в демпферной обмотке. После этого в обмотку возбуждения подают постоянный ток, что приводит к втягиванию ротора в синхронизм. При методе самосинхронизации в момент включения генератора возникает сравнительно большой бросок тока, который не должен превышать $3,5I_a \text{ ном}$.

Регулирование активной мощности. После включения генератора в сеть его напряжение U становится равным напряжению сети U_c . Относительно внешней нагрузки напряжения U и U_c совпадают по фазе, а по контуру «генератор — сеть» находятся в противофазе, т. е. $\dot{U} = -\dot{U}_c$ (рис. 6.33, а). При точном выполнении указанных трех условий, необходимых для синхронизации генератора, его ток I_a после подключения машины к сети равняется нулю. Рассмотрим, какими способами можно регулировать ток I_a при работе генератора параллельно с сетью на примере неявнополюсного генератора.

Ток, проходящий по обмотке якоря неявнополюсного генератора, можно определить из уравнения (6.23)

(6.28)

$$\dot{I}_a = (\dot{E}_0 - \dot{U}) / (jX_{сн}) = -j(\dot{E}_0 - \dot{U}) / X_{сн}.$$

Так как $U = U_c = \text{const}$, то силу тока I_a можно изменять только двумя способами — изменяя ЭДС E_0 по величине или по фазе. Если к валу генератора приложить внешний момент, больший момента, необходимого для компенсации магнитных потерь мощности в стали и механических потерь, то ротор приобретает ускорение, вследствие чего вектор \dot{E}_0 смещается относительно вектора \dot{U} на некоторый угол θ в направлении вращения векторов (рис. 6.33, б). При этом возникает некоторая небалансная ЭДС ΔE , приводящая согласно (6.28) к появлению тока I_a . Возникающую небалансную ЭДС $\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 - \dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{U}_c = j\dot{I}_a X_{сн}$ можно показать на векторной диаграмме (рис. 6.33, б). Вектор тока I_a отстает от вектора ΔE на 90° , поскольку его величина и направление определяются индуктивным сопротивлением $X_{сн}$.

При работе в рассматриваемом режиме генератор отдает в сеть активную мощность

$P = mUIa \cos \varphi$ и на вал его действует электромагнитный тормозной момент, который уравнивает вращающий момент первичного двигателя, вследствие чего частота вращения ротора остается неизменной. Чем больше внешний момент, приложенный к валу генератора, тем больше угол θ , а следовательно, ток и мощность, отдаваемые генератором в сеть.

Если к валу ротора приложить внешний тормозной момент, то вектор \dot{E}_0 будет отставать от вектора напряжения \dot{U} на угол θ (рис. 6.33, в). При этом возникают небалансная ЭДС $\Delta \dot{E}$ и ток \dot{I}_a , вектор которого отстает от вектора $\Delta \dot{E}$ на 90° . Так как угол $\varphi > 90^\circ$, активная составляющая тока находится в противофазе с напряжением генератора. Следовательно, в рассматриваемом режиме активная мощность $P = mUIa \cos \varphi$ забирается из сети, и машина работает двигателем, создавая электромагнитный вращающий момент, который уравнивает внешний тормозной момент; частота вращения ротора при этом снова остается неизменной.

Таким образом, для увеличения нагрузки генератора необходимо увеличивать приложенный к его валу внешний момент (т. е. вращающий момент первичного двигателя), а для уменьшения нагрузки — уменьшать этот момент. При изменении направления внешнего момента (если вал ротора не вращать, а тормозить) машина автоматически переходит из генераторного в двигательный режим.

Регулирование реактивной мощности. Если в машине, подключенной к сети и работающей в режиме холостого хода (рис. 6.34, а), увеличить ток возбуждения I_b , то возрастет ЭДС E_0 (рис. 6.34, б), возникнет небалансная ЭДС $\Delta \dot{E} = -jI_a X_{сн}$ и по обмотке якоря будет проходить ток I_a , который согласно (6.28) определяется только индуктивным сопротивлением $X_{сн}$ машины. Следовательно, ток \dot{I}_a реактивный: он отстает по фазе от напряжения \dot{U} на угол 90° или опережает на тот же угол напряжение сети \dot{U}_c . При уменьшении тока возбуждения ток \dot{I}_a изменяет свое направление: он опережает на 90° напряжение \dot{U} (рис. 6.34, в) и отстает на 90° от напряжения \dot{U}_c . Таким образом, при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока I_a , т. е. реактивная мощность машины Q . Активная составляющая тока I_a в рассматриваемых случаях равна нулю. Следовательно, активная мощность $P = 0$, и машина работает в режиме холостого хода.

При работе машины под нагрузкой создаются те же условия: при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока I_a , т. е. реактивная мощность машины Q . Режим возбуждения синхронной машины с током I_b , при

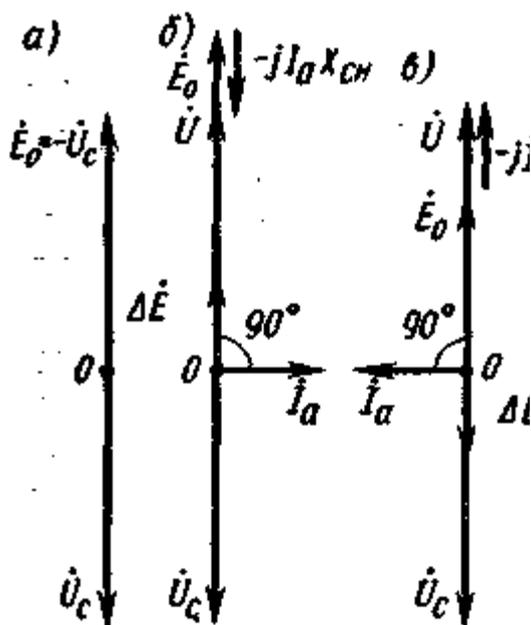


Рис. 6.34. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного синхронного генератора при параллельной работе с сетью и отсутствии активной нагрузки

котором реактивная составляющая тока I_a равна нулю, называют режимом полного или нормального возбуждения. Если ток возбуждения I_b больше тока $I_{b.п}$, при котором имеется режим полного возбуждения, то ток I_a содержит отстающую от U реактивную составляющую, что соответствует активно-индуктивной нагрузке генератора. Такой режим называют режимом перевозбуждения. Если ток возбуждения I_b меньше тока $I_{b.п}$, то ток I_a содержит реактивную составляющую, опережающую напряжение U , что соответствует активно-емкостной нагрузке генератора. Такой режим называют режимом недовозбуждения.

Перевозбужденная синхронная машина, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна емкости. Машину, специально предназначенную для работы в таком режиме, называют синхронным компенсатором и используют для повышения коэффициента мощности электрических установок и стабилизации напряжения в электрических сетях. Недовозбужденная синхронная машина, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна индуктивности.

Возникновение реактивной составляющей тока I_a физически объясняется тем, что при работе синхронной машины на сеть бесконечно большой мощности суммарный магнитный поток сцепленный с каждой из фаз, $\Sigma\Phi = \Phi_{рез} + \Phi\sigma = \Phi_b + \Phi_a + \Phi\sigma$ не зависит от тока возбуждения и при всех условиях остается неизменным, так как

$$(6.29) \quad \dot{U} = \dot{E}\theta + \dot{E}a + \dot{E}\sigma a = -\dot{U}_c = const.$$

Следовательно, если ток возбуждения I_b больше тока, требуемого для полного возбуждения, то возникает отстающая составляющая тока I_a , которая создает размагничивающий поток реакции якоря Φ_a ; если ток I_b меньше тока, необходимого для полного возбуждения, то возникает опережающая составляющая тока I_a , которая создает подмагничивающий поток реакции якоря Φ_a . Во всех случаях суммарный поток машины $\Sigma\Phi$ автоматически поддерживается неизменным.

2. Регулирование активной и реактивной мощностей.

Способы регулирования. Изменение активной и реактивной мощностей синхронного генератора, работающего параллельно с сетью большой мощности, осуществляется путем изменения внешнего момента и тока возбуждения. Чтобы обеспечить требуемый режим работы генератора, обычно одновременно регулируют и ток возбуждения, и вращающий момент.

Рассмотрим два предельных случая регулирования: а) момента при неизменном токе возбуждения; б) тока возбуждения при неизменном внешнем моменте.

Работа генератора с неизменным током возбуждения. Для генератора с неявно выраженными полюсами векторную диаграмму (рис. 6.35, а) строят по уравнению $\dot{U} = \dot{E}\theta - j\dot{I}_a X_{сн}$. Вектор напряжения сети \dot{U}_c по контуру обмотки генератора имеет направление, встречное вектору напряжения генератора, т. е. $\dot{U} = -\dot{U}_c$.

Если генератор работает с $\cos \varphi = 1$, то вектор тока якоря $\dot{I}_a 1$ совпадает по направлению с вектором напряжения \dot{U} , а вектор ЭДС $\dot{E}\theta 1$ опережает эти векторы на угол $\theta 1$. При изменении нагрузки, например при ее возрастании, следует увеличить момент, приложенный к валу генератора. При этом угол θ должен увеличиться до какого-то значения $\theta 2$ в соответствии с возрастанием мощности со значения $P 1$ до $P 2$.

Принимая полезную мощность (отдаваемую в сеть), равной электромагнитной $P = m (E\theta / X_{сн}) U \sin \theta$, для соотношения мощностей $P 1$ и $P 2$ имеем $P 1 / P 2 = \sin \theta 1 / \sin \theta 2$. Таким образом, при увеличении мощности с $P 1$ до $P 2$ вектор ЭДС $\dot{E}\theta$ поворачивается в

сторону опережения и образует с вектором \dot{U} угол θ_2 . Конец вектора $\dot{E}O$ скользит по окружности радиусом, равным E_0 , так как ток возбуждения остается неизменным.

Соединив конец вектора \dot{U} с концом вектора $\dot{E}O_2$, получим вектор $j\dot{I}a_2 X_{сн}$. Вектор тока $\dot{I}a_2$ перпендикулярен падению напряжения $j\dot{I}a_2 X_{сн}$, а его модуль определится из соотношения

$$I_{a2}/I_{a1} = |\dot{I}a_2 X_{сн}|/|j\dot{I}a_1 X_{сн}|.$$

При уменьшении мощности с P_1 до P_3 следует уменьшить момент, приложенный к валу генератора. При этом новый угол θ_3 меньше угла θ_1 . Построение всех векторов (рис. 6.35, а) на диаграмме и в этом случае аналогично описанному в предшествующем примере.

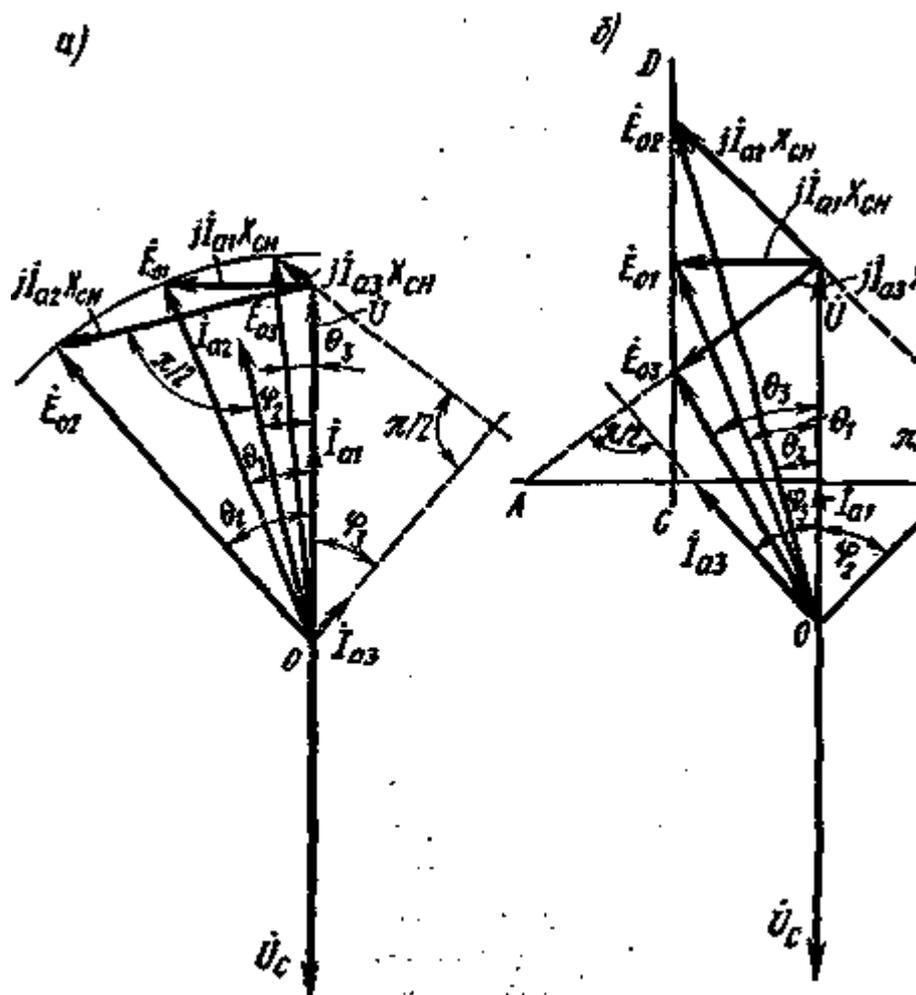


Рис. 6.35. Векторные диаграммы синхронного генератора при различных режимах нагрузки

Приведенные диаграммы показывают, что при изменении внешнего момента, приложенного к валу синхронного генератора, работающего параллельно с сетью, изменяется не только активная, но и реактивная мощность. Следовательно, для того чтобы обеспечить наиболее благоприятный или требуемый режим работы генератора, при изменении активной мощности необходимо регулировать и ток возбуждения.

Работа генератора с неизменным моментом. Неизменность внешнего момента на валу генератора эквивалентна неизменности его мощности $P = mUI_a \cos \varphi$. При работе на сеть большой мощности $U = U_c = const$, следовательно, при изменении тока возбуждения остается постоянной активная составляющая тока якоря $I_a \cos \varphi = const$. На векторной диаграмме (рис. 6.35, б) это условие выражается в том, что конец вектора $\dot{I}a$ скользит по прямой AB , перпендикулярной вектору напряжения \dot{U} . Однако при неизменной мощности (для машины с неявновыраженными полюсами) справедливо условие

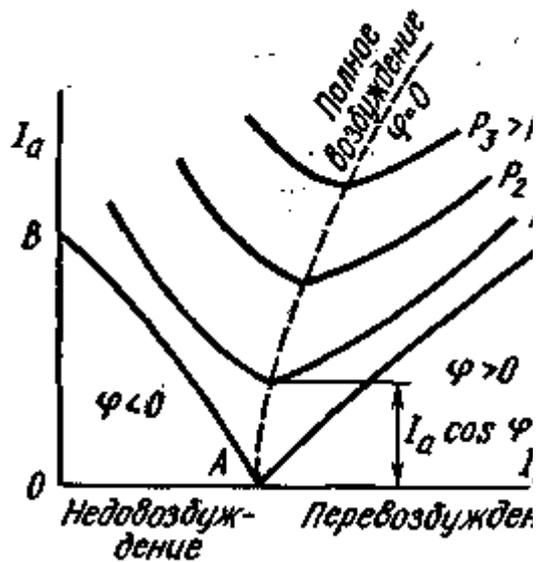


Рис. 6.36. U-образные характеристики синхронного генератора

$P = (mE_0U/X_{сн}) \sin \theta = const.$ При изменении тока возбуждения остаются неизменными все величины, кроме E_0 и $\sin \theta$; следовательно, условие неизменной мощности приводит к условию $E_0 \sin \theta = const.$ На диаграмме это условие выражается в том, что конец вектора \dot{E}_0 скользит по прямой CD , параллельной вектору напряжения \dot{U} . Чем меньше ток возбуждения, тем меньше по модулю вектор \dot{E}_0 , но больше угол θ . Вектор тока I_a перпендикулярен вектору падения напряжения $jI_a X_{сн}$, поэтому его можно легко построить для каждого угла θ . На рис. 6.35,б показаны положения векторов \dot{E}_0 , I_a и $jI_a X_{сн}$ для трех значений тока I_b (эти векторы имеют индексы 1,2 и 3). Минимальному значению тока I_a соответствует режим работы при $\cos \varphi = 1$. Чему соответствует определенный ток возбуждения. При увеличении тока возбуждения свыше этого значения или его уменьшения ток I_a возрастает. Зависимость тока якоря от тока возбуждения, называемая U-образной характеристикой, представлена на рис. 6.36. Для каждой мощности имеется вполне определенный ток возбуждения, которому соответствует минимум тока якоря. Чем больше мощность, тем больше ток возбуждения, соответствующий минимальному току якоря. Штриховая кривая, проведенная через точки минимумов, соответствует режимам работы генератора с $\cos \varphi = 1$.

3. Мощность и электромагнитный момент синхронного генератора.

Активная мощность. Чтобы установить, как зависит активная мощность P синхронной машины от угла нагрузки θ , рассмотрим упрощенные векторные диаграммы, построенные при $R_a = 0$. Из диаграммы, приведенной на рис. 6.37, а для неявнополюсной машины, можно установить, что общая сторона треугольников OAB и ACB $AB = OA \sin \theta = AC \cos \varphi$ или с учетом модулей соответствующих векторов

$$(6.30)$$

$$E_0 \sin \theta = I_a X_{сн} \cos \varphi.$$

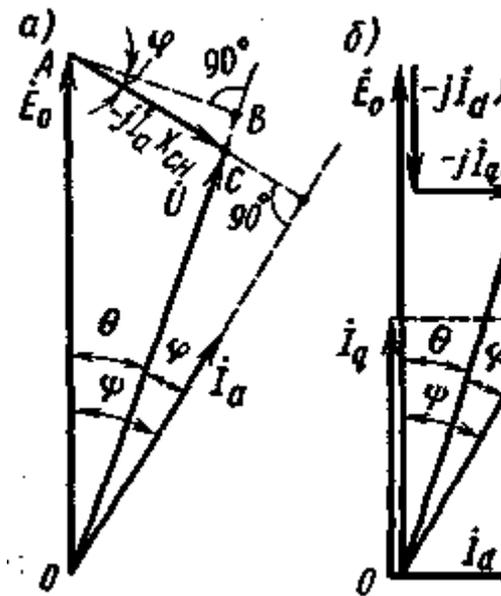


Рис. 6.37. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсной и явнополюсной синхронной машины

Следовательно, активная мощность синхронной машины (6.31)

$$P = mUIa \cos \varphi = (mUE_0/X_{сн}) \sin \theta.$$

Векторная диаграмма для явнополюсной машины приведена на рис. 6.37,б. Так как $\varphi = \psi - \theta$, то активная мощность

$$\begin{aligned} P &= mUIa \cos(\psi - \theta) = \\ &= mU (Ia \sin \psi \sin \theta + Ia \cos \psi \cos \theta) = \\ (6.32) \quad &= mU (Id \sin \theta + Iq \cos \theta). \end{aligned}$$

Чтобы определить токи I_d и I_q , спроектируем модули векторов ЭДС \dot{E}_0 , напряжения \dot{U} , падений напряжений $-jI_d X_d$ и $-jI_q X_q$ на оси — параллельную и перпендикулярную вектору \dot{E}_0 (рис. 6.37,б). Тогда $E_0 \cos \theta = U + I_d X_d$; $U \sin \theta = I_q X_q$, откуда

$$(6.33) \quad I_d = (E_0 - U \cos \theta) / X_d ; I_q = U \sin \theta / X_q .$$

Подставляя значение I_d и I_q в (6.32), получаем

$$\begin{aligned} P &= mU \{ [(E_0 - U \cos \theta) / X_d] \sin \theta + (U \sin \theta / X_q) \cos \theta \}, \\ (3.34) \quad &\text{или, используя формулу } \sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta, \end{aligned}$$

$$P = (mUE_0/X_d) \sin \theta + (mU^2/2) (1/X_q - 1/X_d) \sin 2\theta.$$

Электромагнитный момент. В синхронных машинах большой и средней мощности потери мощности в обмотке якоря $\Delta P_{эл} = mI_a^2 R_a$ малы по сравнению с электрической мощностью P , отдаваемой (в генераторе) или потребляемой (в двигателе) обмоткой якоря. Следовательно, если пренебречь величиной $\Delta P_{эл}$, то можно считать, что электромагнитная мощность машины $P_{эм} = P$. Электромагнитный момент пропорционален мощности $P_{эм}$, поэтому для неявнополюсной и явнополюсной машин соответственно

(3.35)

$$M = P_{эм} / \omega l = [mUE_0 / (\omega l X_{сн})] \sin \theta;$$

(3.36)

$$M = P_{эм} / \omega l = [mUE_0 / (\omega l X_d)] \sin \theta + [mU^2 / (2\omega l)] (1/X_q - 1/X_d) \sin 2\theta.$$

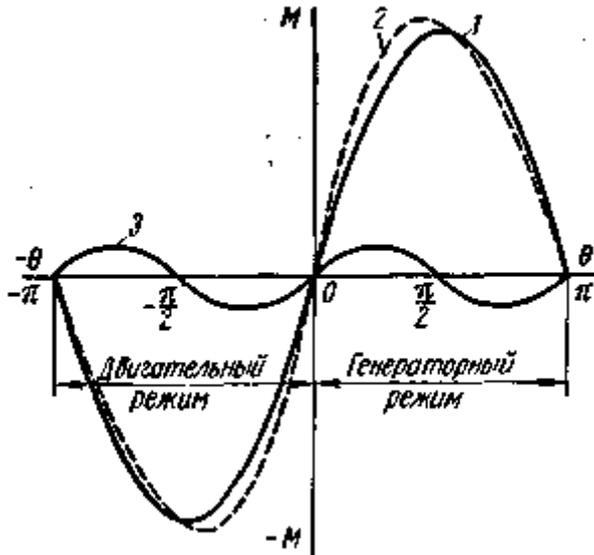


Рис. 6.38. Угловые характеристики явнополюсной и неявнополюсной машин

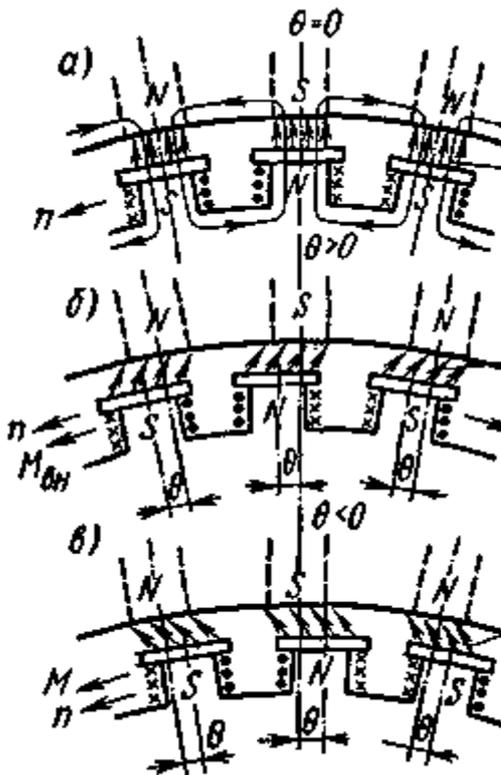


Рис. 6.39. Характер взаимодействия

потоков Φ_v и $\Sigma\Phi$ в синхронной
машине

При неявнополюсной машине зависимость $M = f(\theta)$ представляет собой синусоиду, симметричную относительно осей координат (рис. 6.38, кривая 1). При явнополюсной машине из-за неодинаковой магнитной проводимости по различным осям ($X_d \neq X_q$) возникает реактивный момент

(6.37)

$$M_p = [mU^2 / (2\omega l)] (1/X_q - 1/X_d) \sin 2\theta$$

Он появляется в результате стремления ротора ориентироваться по оси результирующего поля, что несколько искажает синусоидальную зависимость $M = f(\theta)$ (кривая 2). Реактивный момент возникает даже при отсутствии тока возбуждения (когда $E_0 = 0$); он пропорционален $\sin 2\theta$ (кривая 3). Так как электромагнитная мощность $P_{эм}$ пропорциональна моменту, то приведенные на рис. 6.38 характеристики в другом масштабе представляют собой зависимости $P_{эм} = f(\theta)$ или при принятом предположении ($\Delta P_{аэл} = 0$) — зависимости $P = f(\theta)$. Кривые $M = f(\theta)$ и $P_{эм} = f(\theta)$ называют угловыми характеристиками.

Физически полученная форма кривой $M = f(\theta)$ обусловлена тем, что потоки Φ_v и $\Sigma\Phi$ сдвинуты между собой на тот же угол θ , на который сдвинуты векторы \dot{E}_0 и \dot{U} (векторы Φ_v и $\Sigma\Phi$ опережают \dot{E}_0 и \dot{U} на 90°). Поэтому если угол $\theta = 0$ (холостой ход), то между ротором и статором существуют только силы притяжения f , направленные радиально (рис. 6.39, а), и электромагнитный момент равен нулю.

При $\theta > 0$ (генераторный режим) ось потока возбуждения Φ_v (полюсов ротора) под действием вращающего момента $M_{вн}$ опережает ось суммарного потока $\Sigma\Phi$ на угол θ (рис. 6.39, б), вследствие чего электромагнитные силы, возникающие между ротором и статором, образуют тангенциальные составляющие, которые создают электромагнитный тормозной момент M . Максимум момента соответствует значению $\theta = 90^\circ$, когда ось полюсов ротора расположена между осями «полюсов» суммарного потока $\Sigma\Phi$. При $\theta < 0$ (двигательный режим) ось потока возбуждения под действием тормозного момента нагрузки $M_{вн}$ отстает от оси суммарного потока (рис. 6.39, в), вследствие чего тангенциальные составляющие электромагнитных сил, возникающие между ротором и статором, создают электромагнитный вращающий момент M .

1.18 Лекция №18 (2 часа).

Тема: «Синхронные двигатель и компенсатор»

1.18.1 Вопросы лекции:

1. Особенности конструкции, принцип работы и характеристики синхронного двигателя
2. Пуск в ход синхронного двигателя
3. Синхронный компенсатор.

1.18.2 Краткое содержание вопросов

1. Особенности конструкции, принцип работы и характеристики синхронного двигателя

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью, автоматически переходит в двигательный режим, если к валу ротора приложен тормозной момент. При этом машина начинает потреблять из сети активную мощность и возникает электромагнитный вращающий момент. Частота вращения ротора остается неизменной, жестко связанной с частотой сети по соотношению $n_2 = n_1 = 60f_1/p$, что является важнейшим эксплуатационным свойством синхронных двигателей.

Векторные диаграммы. По основным комплексным уравнениям синхронной машины (6.15 и 6.21) могут быть построены векторные диаграммы. Однако для синхронного двигателя в приведенные уравнения вместо напряжения машины \dot{U} , надо подставить $-\dot{U}_c$, так как термин «напряжение двигателя» обычно не употребляется; при этом для неявнополюсной и явнополюсной машин имеем

(6.45)

$$-\dot{U}_c = \dot{E}_0 - j\dot{I}_a X_{сн}; \quad -\dot{U}_c = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d X_d - j\dot{I}_q X_q.$$

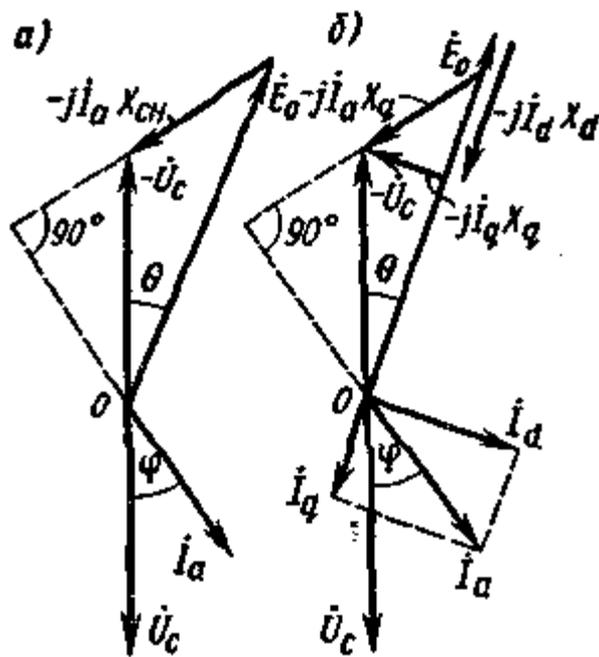


Рис. 6.45. Упрощенные векторные диаграммы синхронного неявнополюсного (а) и явнополюсного (б) двигателя

Построение векторных диаграмм (рис. 6.45, а и б) по формулам (6.45) рекомендуется начинать с изображения векторов \dot{U}_c и $-\dot{U}_c$. Затем строится вектор тока \dot{I}_a , активная составляющая которого совпадает с направлением вектора \dot{U}_c , и определяется вектор \dot{E}_0 . При построении диаграммы для явнополюсной машины (рис. 6.45, б) нужно также (по аналогии с построением диаграммы для генератора, см. рис. 6.26, в) сначала определить направление вектора \dot{E}_0 , прибавив к $-\dot{U}_c$ вспомогательный вектор $j\dot{I}_a X_q$.

Чтобы выяснить свойства синхронного двигателя, рассмотрим его работу при изменении нагрузочного момента $M_{вн}$ и постоянном токе возбуждения; при этом для простоты будем пользоваться векторной диаграммой неявнополюсной машины. Допустим, что двигатель работает при $\cos \varphi = 1$, чему на векторной диаграмме (рис. 6.46, а) соответствуют ток I_{a1} и угол θ_1 . С повышением нагрузки увеличивается угол между векторами \dot{E}_0 и $-\dot{U}_c$ до какого-то значения θ_2 , так как согласно (6.35) вращающий момент $M = M_{вн}$ пропорционален $\sin \theta$. При этом конец вектора \dot{E}_0 перемещается по окружности с радиусом, равным E_0 , и при принятых условиях ($I_b = \text{const}$; $E_0 = \text{const}$; $U_c = \text{const}$) вектор тока \dot{I}_a также поворачивается вокруг точки O , располагаясь перпендикулярно вектору $-j\dot{I}_a X_{сн}$. Из диаграммы видно, что в рассматриваемом случае ток двигателя \dot{I}_a имеет отстающую реактивную составляющую. Если нагрузка двигателя уменьшается по сравнению с исходной, то угол θ уменьшается до значения θ_3 . При этом ток двигателя \dot{I}_a имеет опережающую реактивную составляющую.

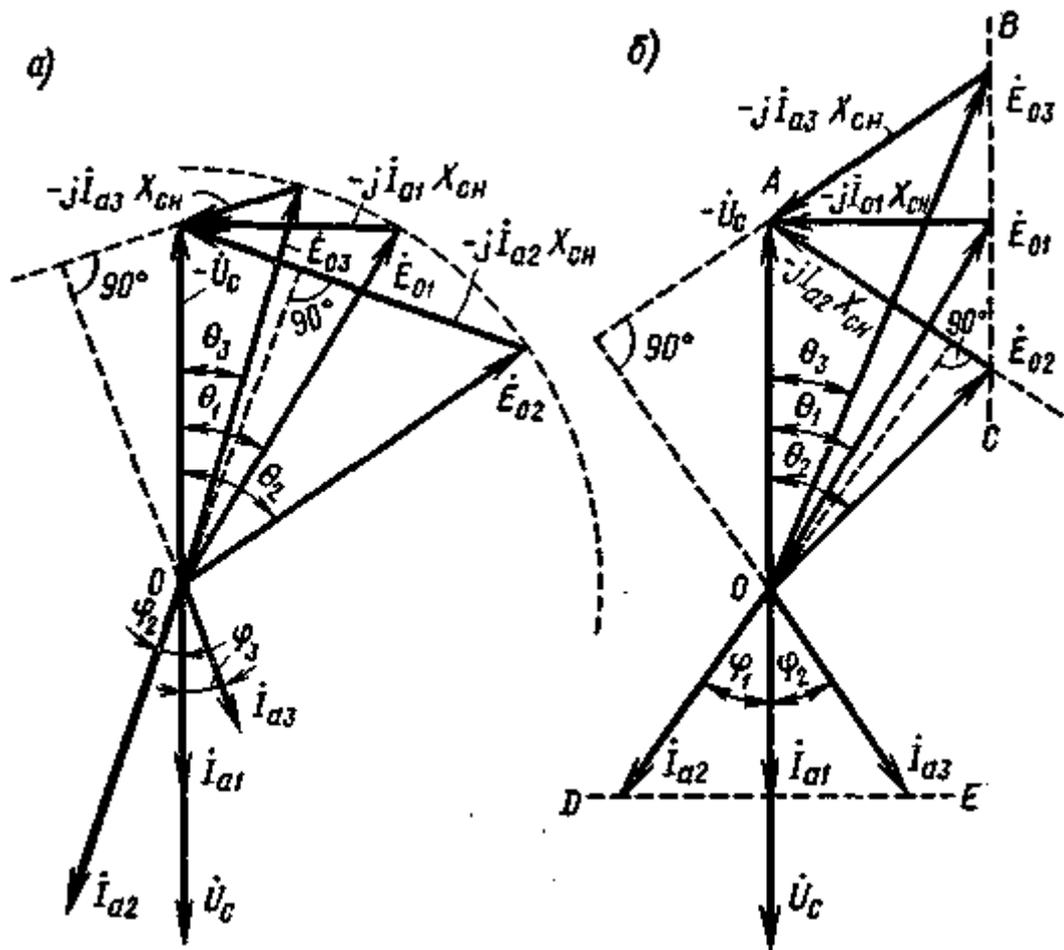


Рис. 6.46. Упрощенные векторные диаграммы синхронного двигателя при изменении нагрузочного момента на валу и тока возбуждения

Следовательно, изменение активной мощности синхронного двигателя приводит к изменению его $\cos \varphi$: при уменьшении нагрузки вектор тока поворачивается в сторону опережения и двигатель может работать с $\cos \varphi = 1$ или с опережающим током; при увеличении нагрузки вектор тока поворачивается в сторону отставания. Если при неизменной активной мощности изменять ток возбуждения, то будет изменяться только реактивная мощность, т. е. величина $\cos \varphi$. Векторная диаграмма для этого случая изображена на рис. 6.46, б. Если двигатель работает при $\cos \varphi = 1$, то этому режиму соответствует ЭДС \dot{E}_{01} и некоторый угол θ_1 . При уменьшении тока возбуждения ЭДС \dot{E}_0 снижается до \dot{E}_{02} . Поскольку активная мощность остается неизменной, из условия $P_{эл} = P_{эм} = (mUE_0/X_{сн}) \sin \theta = \text{const}$ получаем, что $E_{01} \sin \theta_1 = E_{02} \sin \theta_2$, откуда следует, что конец вектора \dot{E}_0 при изменении тока возбуждения перемещается по прямой BC , параллельной вектору \dot{U}_c и проходящей через конец вектора \dot{E}_{01} . Из векторной диаграммы видно, что угол θ_2 больше θ_1 .

Аналогично строят диаграмму при увеличении тока возбуждения. В этом случае ЭДС \dot{E}_0 возрастает до величины \dot{E}_{03} и угол θ_3 становится меньшим θ_1 . Вектор $-j\dot{I}_a3 X_{сн}$ поворачивается вокруг точки A и соответственно ему изменяет направление вектор тока \dot{I}_a3 , перпендикулярный вектору $-j\dot{I}_a3 X_{сн}$, при этом из условия равенства активных мощностей $I_{a1} \cos \varphi_1 = I_{a2} \cos \varphi_2 = I_{a3} \cos \varphi_3$ конец вектора тока \dot{I}_a перемещается по прямой DE , перпендикулярной вектору \dot{U}_c . По диаграмме, приведенной на рис. 6.46, б, можно построить U -образные характеристики для двигателя $I_a = f(I_{в})$, которые будут иметь такую же форму, как и характеристики для генератора (см. рис. 6,36), с тем

лишь отличаем, что для двигателя угол сдвига фаз φ принято отсчитывать от вектора напряжения

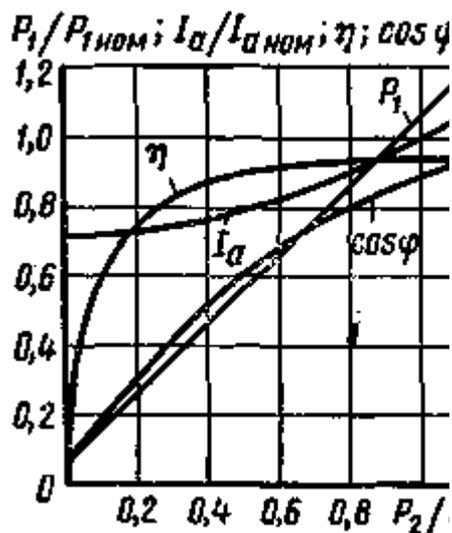


Рис. 6.47. Рабочие характеристики синхронного двигателя

сети \dot{U}_c . При недовозбуждении ток \dot{I}_a отстает от напряжения сети \dot{U}_c , т. е. двигатель потребляет из сети реактивную мощность, а при перевозбуждении ток опережает напряжение сети \dot{U}_c , т. е. двигатель отдает в сеть реактивную мощность.

Рабочие характеристики (рис. 6.47). Они представляют собой зависимости тока I_a , электрической мощности P_1 , поступающей в обмотку якоря, КПД η и $\cos \varphi$ от отдаваемой механической мощности P_2 при $U_c = \text{const}$, $f_c = \text{const}$ и $I_b = \text{const}$. Часто эти характеристики строят в относительных единицах. Поскольку частота вращения двигателя постоянна, зависимость $n_2 = f(P_2)$ обычно не приводится; не приводится также и зависимость $M = f(P_2)$, так как вращающий момент M пропорционален P_2 . Зависимость $P_1 = f(P_2)$ имеет характер, близкий к линейному.

Ток двигателя при холостом ходе является практически реактивным. По мере роста нагрузки возрастает активная составляющая тока, в связи с чем зависимость тока I_a от мощности P_2 является нелинейной. Кривая $\eta = f(P_2)$ имеет характер, общий для всех электрических машин. Синхронные двигатели могут работать при $\cos \varphi = 1$, но обычно их рассчитывают на работу при номинальной нагрузке с опережающим током и $\cos \varphi_{ном} = 0,9 \div 0,8$. В этом случае улучшается суммарный $\cos \varphi$ сети, от которой питаются синхронные двигатели, так как создаваемая ими опережающая реактивная составляющая тока I_a компенсирует отстающую реактивную составляющую тока асинхронных двигателей. Зависимость $\cos \varphi = f(P_2)$ при работе машин с перевозбуждением имеет максимум в области $P_2 > P_{ном}$. При снижении P_2 значение $\cos \varphi$ уменьшается, а отдаваемая в сеть реактивная мощность возрастает.

Достоинства и недостатки синхронного двигателя в сравнении с асинхронным. Синхронные двигатели имеют следующие достоинства:

а) возможность работы при $\cos \varphi = 1$; это приводит к улучшению $\cos \varphi$ сети, а также к сокращению размеров двигателя, так как его ток меньше тока асинхронного двигателя той же мощности. При работе с опережающим током синхронные двигатели служат генераторами реактивной мощности, поступающей в асинхронные двигатели, что снижает потребление этой мощности от генераторов электростанций;

б) меньшую чувствительность к колебаниям напряжения, так как их максимальный момент пропорционален напряжению в первой степени (а не квадрату напряжения);

в) строгое постоянство частоты вращения независимо от механической нагрузки на валу.

Недостатками синхронных двигателей являются:

а) сложность конструкции;

б) сравнительная сложность пуска в ход (см. § 6.14);

в) трудности с регулированием частоты вращения, которое возможно только путем изменения частоты питающего напряжения.

Указанные недостатки синхронных двигателей делают их менее выгодными, чем асинхронные двигатели, при ограниченных мощностях до 100 кВт. Однако при более высоких мощностях, когда особенно важно иметь высокий $\cos \varphi$ и уменьшенные габаритные размеры машины, синхронные двигатели предпочтительнее асинхронных.

2. Пуск в ход синхронного двигателя

Метод асинхронного пуска. *Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента.* Если его подключить к сети переменного тока, когда ротор неподвижен, а по обмотке возбуждения проходит постоянный ток, то за один период изменения тока, электромагнитный момент будет дважды изменять свое направление, т. е. средний момент за период равняется нулю. При этих условиях двигатель не сможет прийти во вращение, так как его ротор, обладающий определенной инерцией, не может быть в течение одного полупериода разогнан до синхронной частоты вращения. Следовательно, для пуска синхронного двигателя необходимо разогнать его ротор с помощью внешнего момента до частоты вращения, близкой к синхронной.

В настоящее время для этой цели применяют метод асинхронного пуска. При этом методе синхронный двигатель пускают как асинхронный, для чего его снабжают специальной коротко-замкнутой пусковой обмоткой, выполненной по типу «беличья клетка». Чтобы увеличить сопротивление стержней, клетку изготовляют из латуни. При включении трехфазной обмотки статора в сеть образуется вращающееся магнитное поле, которое, взаимодействуя с током $I_{пв}$ пусковой обмотке (рис. 6.48, а), создает электромагнитные силы F и увлекает за собой ротор. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной, постоянный ток, проходящий по обмотке возбуждения, создает синхронизирующий момент, который втягивает ротор в синхронизм.

Применяют две основные схемы пуска синхронного двигателя. При схеме, изображенной на рис. 6.48, б, обмотку возбуждения сначала замыкают на гасящий резистор, сопротивление которого $R_{доб}$ превышает в 8 — 12 раз активное сопротивление $R_{в}$ обмотки возбуждения. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной (при $s \approx 0,05$), обмотку возбуждения отключают от гасящего резистора и подключают к источнику постоянного тока (возбудителю), вследствие чего ротор втягивается в синхронизм. Осуществить пуск двигателя с разомкнутой обмоткой возбуждения нельзя, так как во время разгона ротора при $s > 0$ в ней вращающимся магнитным полем индуцируется ЭДС $E_{в} = 4,44f_2w_{в}\Phi_m = 4,4f_1s w_{в}\Phi_m$, где $f_2 = f_1s$ — частота изменения тока в обмотке возбуждения; $w_{в}$ — число витков обмотки возбуждения; Φ_m — амплитуда магнитного потока вращающегося поля.

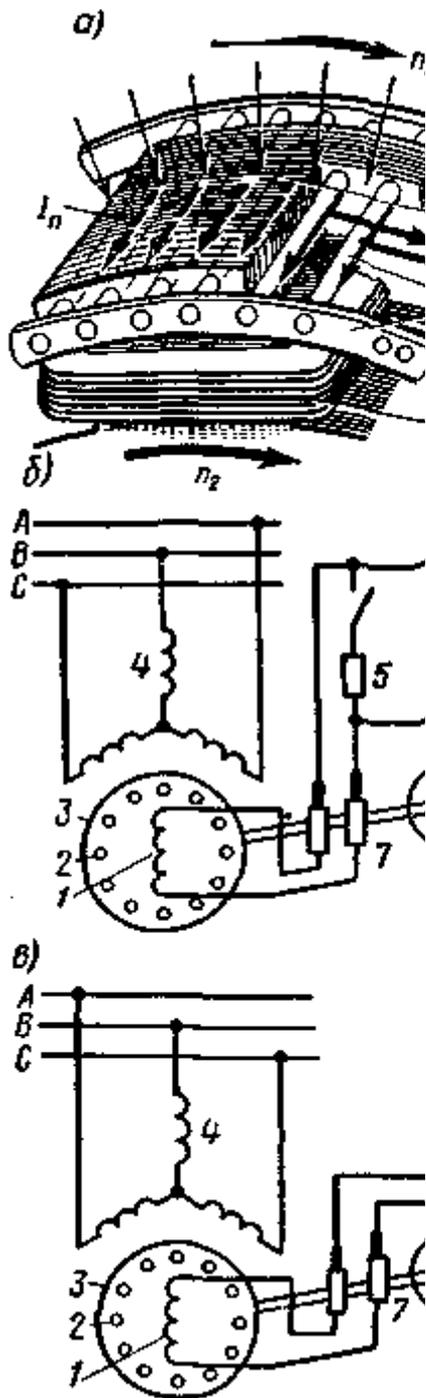


Рис. 6.48. Устройство пусковой обмотки синхронного двигателя (а) и схемы его асинхронного пуска (б и в): 1 - обмотка возбуждения; 2 - пусковая обмотка; 3 - ротор; 4 - обмотка якоря; 5 - гасящее сопротивление; 6 - якорь возбудителя; 7 - кольца и щетки

В начальный момент пуска при $s = 1$ из-за большого числа витков обмотки возбуждения ЭДС $E_{\text{в}}$ может достигать весьма большого значения и вызвать пробой

изоляции. При схеме, изображенной на рис. 6.48, в, обмотка возбуждения постоянно подключена к возбудителю, сопротивление которого по сравнению с сопротивлением R_v весьма мало, поэтому эту обмотку в режиме асинхронного пуска можно считать замкнутой накоротко. С уменьшением скольжения до $s = 0,3 \div 0,4$ возбудитель возбуждается и в обмотку возбуждения подается постоянный ток, обеспечивающий при $s \approx 0,05$ втягивание ротора в синхронизм. Различие пусковых схем обусловлено тем, что не во всех случаях может быть применена более простая схема с постоянно подключенной к возбудителю обмоткой возбуждения (рис. 6.48, в), так как она имеет худшие пусковые характеристики, чем более сложная схема, приведенная на рис. 6.48,б. Главной причиной ухудшения пусковых характеристик является возникновение одноосного эффекта — влияние тока, индуцируемого в обмотке возбуждения при пуске, на характеристику пускового момента.

Одноосный эффект. Для анализа этого явления предположим сначала, что в двигателе отсутствует пусковая обмотка, а обмотка возбуждения замкнута накоротко. В результате при асинхронном пуске двигателя в обмотке возбуждения индуцируется ЭДС с частотой $f_2 = f_1 s$ и по обмотке проходит переменный ток, создающий пульсирующее магнитное поле (обмотка возбуждения в этом случае является однофазной обмоткой переменного тока). Пульсирующее магнитное поле можно разложить на две составляющие: прямое и обратное вращающиеся магнитные поля ротора, которые характеризуются потоками $\Phi_{пр}$ и $\Phi_{обр}$. Частота вращения каждого из этих полей относительно ротора

$$n_{р} = \pm 60f_2/p = \pm 60f_1 s/p = \pm n_1 s.$$

Относительно статора прямое поле вращается с частотой

$$(6.46)$$

$$n_{р.пр} = n_2 + n_{р} = n_1(1 - s) + n_1 s = n_1,$$

где $n_2 = n_1(1 - s)$ — частота вращения ротора.

Следовательно, оно вращается синхронно с полем статора; образуемый этим полем с током статора электромагнитный момент $M_{пр}$ изменяется в зависимости от скольжения так же, как и в трехфазном асинхронном двигателе (рис. 6.49, кривая 2). Обратное поле ротора вращается относительно статора с частотой

$$(6.47)$$

$$n_{р.обр} = n_2 - n_1 = n_1(1 - s) - n_1 s = n_1(1 - 2s).$$

При частотах вращения ротора $n_2 < 0,5n_1$, т. е. при $s > 0,5$, обратное поле, как видно из формулы (6.47), перемещается относительно статора в сторону, противоположную направлению вращения ротора; при $n_2 = 0,5n_1$, это поле неподвижно относительно статора; при $n_2 > 0,5$ (т. е. при $s < 0,5$) оно перемещается в ту же сторону, что и ротор.

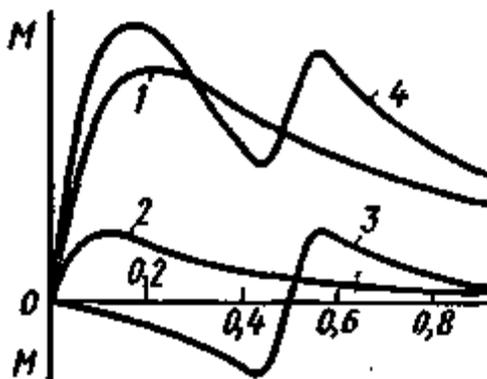


Рис. 6.49. Зависимость электромагнитного момента от

скольжения при асинхронном пуске
синхронного двигателя

В обмотке статора обратным полем индуцируется ЭДС с частотой $f(1 - 2s)$, для которой обмотка статора является короткозамкнутой. При этом по обмотке статора проходит соответствующий ток. Взаимодействуя с обратным полем ротора, этот ток создает электромагнитный момент $M_{обр}$. Так как направление момента зависит от направления вращения поля $nр.обр$ относительно статора, то из формулы (6.47) следует, что он является знакопеременным и изменение его направления происходит при $s = 0,5$ (рис. 6.49, кривая 3).

Таким образом, ток, индуцируемый в обмотке возбуждения при пуске двигателя, создает электромагнитный момент, который при частоте вращения, меньшей $0,5 n_1$, является ускоряющим, а при большей частоте вращения — тормозящим.

Особенно резко проявляется действие обратного поля при $n \approx 0,5n_1$.

Наличие пусковой обмотки на роторе существенно уменьшает обратное магнитное поле и создаваемый им момент. Однако этот момент, складываясь с асинхронным моментом пусковой обмотки (кривая 1), *создает в кривой результирующего пускового момента провал при частоте вращения, равной половине синхронной* (кривая 4). Этот провал тем больше, чем больше ток в обмотке возбуждения. Очевидно, что *включение гасящего сопротивления в цепь обмотки возбуждения* (см. рис. 6.48, б) *на период пуска уменьшает ток в этой обмотке и улучшает форму кривой пускового момента*. Следует отметить, что если обмотку возбуждения при пуске не отключить от возбудителя, то по якору возбудителя в период пуска проходит переменный ток, что может вызвать искрение щеток. Поэтому такую схему пуска применяют в случае небольшого нагрузочного момента — не более 50 % от Номинального, при сравнительно небольшой мощности двигателя.

3. Синхронный компенсатор.

Синхронный компенсатор представляет собой синхронный двигатель, работающий без нагрузки на валу; при этом по обмотке якоря проходит практически только реактивный ток. Синхронный компенсатор может работать в режиме улучшения $\cos \varphi$ или в режиме стабилизации напряжения.

Обычно электрическая сеть, питающая электроэнергией промышленные предприятия, нагружена током I_n , отстающим по фазе от напряжения сети U_c (рис. 6.55, а). Это объясняется тем, что от сети получают питание асинхронные двигатели, у которых реактивная составляющая тока довольно велика. Для улучшения $\cos \varphi$ сети синхронный компенсатор должен работать в режиме перевозбуждения. При этом ток возбуждения регулируется так, чтобы ток якоря I_a синхронного компенсатора опережал на 90° напряжение сети U_c (рис. 6.55, а) и был примерно равен реактивной составляющей $I_n.p$ тока нагрузки I_n . В результате сеть загружается только активным током нагрузки $I_c = I_n.a$.

При работе в режиме стабилизации напряжения ток возбуждения синхронного компенсатора устанавливается постоянным, причем такого значения, чтобы ЭДС компенсатора E_0 равнялась номинальному напряжению сети U_c . ном (рис. 6.55, б). В сети при этом имеется некоторый ток I_n , создающий падение напряжения $\Delta U \approx I_n R_c \cos \varphi + I_n X_c \sin \varphi$, где R_c и X_c — активное и индуктивное сопротивление сети; φ — угол сдвига фаз между векторами напряжения и тока сети.

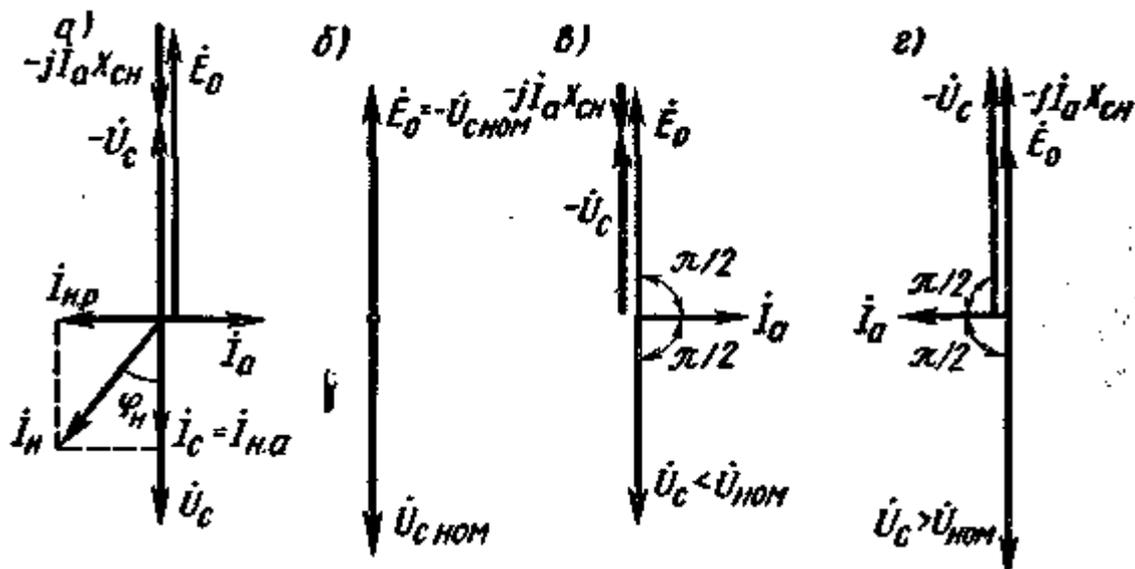


Рис. 6.55. Векторные диаграммы синхронного компенсатора: а — в режиме улучшения $\cos \varphi$ сети; б, в, г — в режиме стабилизации напряжения

Если напряжение сети в точке подключения синхронного компенсатора несколько понижается из-за возрастания тока нагрузки I_n и становится меньше $U_{c.ном}$, то синхронный компенсатор начинает забирать из сети реактивный опережающий ток I_a (рис. 6.55, в). Это уменьшает падение напряжения в ней на величину $\Delta U_k = I_a X_c$. При повышении напряжения в сети, когда $U_c > U_{c.ном}$, синхронный компенсатор загружает сеть реактивным отстающим током I_a (рис. 6.55, г), что приводит к увеличению падения напряжения на величину $\Delta U_k = I_a X_c$. При достаточной мощности синхронного компенсатора колебания напряжения в сети не превышают 0,5 — 1,0 %. Недостатком указанного метода стабилизации напряжения является то, что синхронный компенсатор загружает линию реактивным током, увеличивая потери в ней.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1 Лабораторная работа №1, 2 (4 часа).

Тема: «Вводное занятие»

2.1.1 Цель работы:

Ознакомиться с правилами проведения лабораторных работ, изучить устройство универсального лабораторного стенда, ознакомиться с приборами и оборудованием, используемым в цикле лабораторных работ по электрическим машинам.

2.1.2 Задачи работы:

1. Изучить правила проведения лабораторных работ и правила техники безопасности
2. Изучить правила сборки электрических схем
3. Записать основные технические характеристики используемого в лабораторных работах оборудования

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.1.4 Описание (ход) работы:

1. Порядок выполнения лабораторной работы:

- изучить материал по теме предстоящей лабораторной работы;
- заготовить шаблон отчёта (в шаблон отчёта не включать записи сделанные курсивом);
- ознакомиться с используемыми приборами и оборудованием;
- ознакомиться с лабораторной установкой в целом и принципом её действия;
- изучить порядок запуска установки;
- изучить порядок снятия показаний приборов и определения цены деления;
- изучить порядок снятия и расчёта экспериментальных данных и зависимостей;
- освоить порядок построения графиков полученных экспериментально;
- подготовить ответы на контрольные вопросы;
- показать преподавателю заготовленный шаблон отчёта (преподаватель делает соответствующую отметку в журнале);
- ответить на вопрос преподавателя, касающийся качества подготовки к выполнению лабораторной работы (входной контроль);
- выполнить сборку заданного преподавателем участка схемы (правила сборки приведены ниже);
- снять заданную преподавателем точку экспериментальной зависимости, т. е. установить соответствующий режим работы установки, снять и занести в таблицу через компьютер показания приборов (ориентировочно учитывать десятые доли цены деления приборов), далее за партой вычислить расчетные данные и занести их через компьютер в таблицу;
- занести в таблицу заготовленного шаблона отчёта все данные, полученные другими исполнителями;
- построить предусмотренные заданием графики;
- сделать выводы по результатам проделанной работы;
- показать отчёт преподавателю и ответить на один из контрольных вопросов.

2. Знакомство с устройством универсального лабораторного стенда

Универсальный лабораторный стенд размещён на фронтальной стене аудитории №208 и представляет собой каркас с расположенными на нём панелями приборов и оборудования, набор которых достаточен для выполнения любой из лабораторных работ цикла. Выводы приборов и оборудования осуществлены на клеммы пронумерованных панелей, с помощью которых через соединительные провода с наконечниками приборы соединяются в схемы. Для соединения приборов, находящихся на противоположных сторонах стенда, служат переходные клеммы, расположенные на двух нижних рейках стенда, имеющие номера от 1 до 18 с каждой стороны стенда. Клеммы, имеющие одинаковый номер, соединены между собой проводом-удлинителем.

На стенде с правой стороны имеется панель питания ПП1, на которой расположены 4 автоматических выключателя QF, с помощью которых на стенд подаётся трёхфазное напряжение соответственно 127/220 вольт (QF...-ПП1a) и 220/380 вольт (QF...-ПП1c) и однофазное переменное и постоянного напряжения соответственно 127 вольт (QF...-ПП1b) и 220 вольт (QF...-ПП1d). Сигнальные лампы, расположенные между выключателями, указывают на подачу напряжения до автоматических выключателей, а лампы, расположенные у клемм – на наличие напряжения непосредственно на клеммах. С левой стороны имеется панель питания ПП2, на которой расположены 2 автоматических выключателя QF, для подачи трёхфазного напряжения 21/36 вольт (QF...-ПП2a) и для подачи выпрямленного напряжения ± 25 вольт (QF...-ПП2b).

3. Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ

Используемое на лабораторном стенде напряжение опасно для жизни и может привести к смертельному исходу. В связи с этим при выполнении лабораторных работ необходимо выполнять следующие меры предосторожности:

- Перед началом работы убедитесь, что все автоматические выключатели отключены;
- Включение экспериментальной схемы осуществлять после проверки и по разрешению преподавателя в строго регламентированной в инструкции последовательности;
- При работе со схемой не прикасаться к токоведущим частям оборудования, проводам и клеммам;
- Изменение режимов работы оборудования и его отключение осуществлять в соответствии с приведённой в методическом указании инструкцией;
- Перед разборкой схемы, убедитесь, что все вводные автоматические выключатели обесточены;
- По окончании работы схему разобрать полностью, провода убрать на место хранения.

4. Правила сборки электрических схем

Преподаватель распределяет узлы собираемой схемы по исполнителям.

Получив задание на сборку определённого узла схемы, очередной студент выполняет следующие действия:

А) Каждую клемму, входящую в узел, последовательно:

- показывает указкой на плакате;
- называет выводом какого элемента и какого аппарата она является;
- находит и показывает всем студентам эту клемму на стенде.

Б) После того как все клеммы, входящие в узел, будут перечислены, указка откладывается в сторону, берутся соединительные провода и производится сборка в следующем порядке:

— Выбирается самая левая клемма на стенде из показанных и присоединяется к ней наконечник провода, длина которого достаточна для присоединения к ближайшей клемме, расположенной правее;

— К этой клемме добавляется наконечник следующего провода, длина которого достаточна для присоединения к клемме расположенной правее;

— Действия повторяются пока не будут соединены все клеммы, входящие в узел.

2.2 Лабораторная работа №3, 4 (4 часа).

Тема: «Генератор постоянного тока»

2.2.1 Цель работы:

Ознакомиться с устройством и принципом действия генератора постоянного тока. Освоить в режиме самовозбуждения практические методы проведения опытов холостого хода и под нагрузкой. Выяснить влияние схемы соединения обмоток возбуждения на основные характеристики ГПТ.

2.2.2 Задачи работы:

1. Снять и построить характеристику холостого хода ($U_0=f(I_b)$ при $n=\text{const}$)

Примечание: (характеристика одна и та же для всех способов возбуждения, но снимать её проще при независимом возбуждении генератора).

2. Снять и построить регулировочную характеристику для всех способов возбуждения ($I_v=f(I_n)$ при $U=Const=50V$, $n=const$).

3. Снять и построить внешнюю характеристику для всех способов возбуждения ($U=f(I_n)$ при $n=const$, $I_v=Const$ для независимого возбуждения и $R_v=const=0$ для самовозбуждения)

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.2.4 Описание (ход) работы:

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде

2. Собираем схему экспериментальной установки (рис. 1)

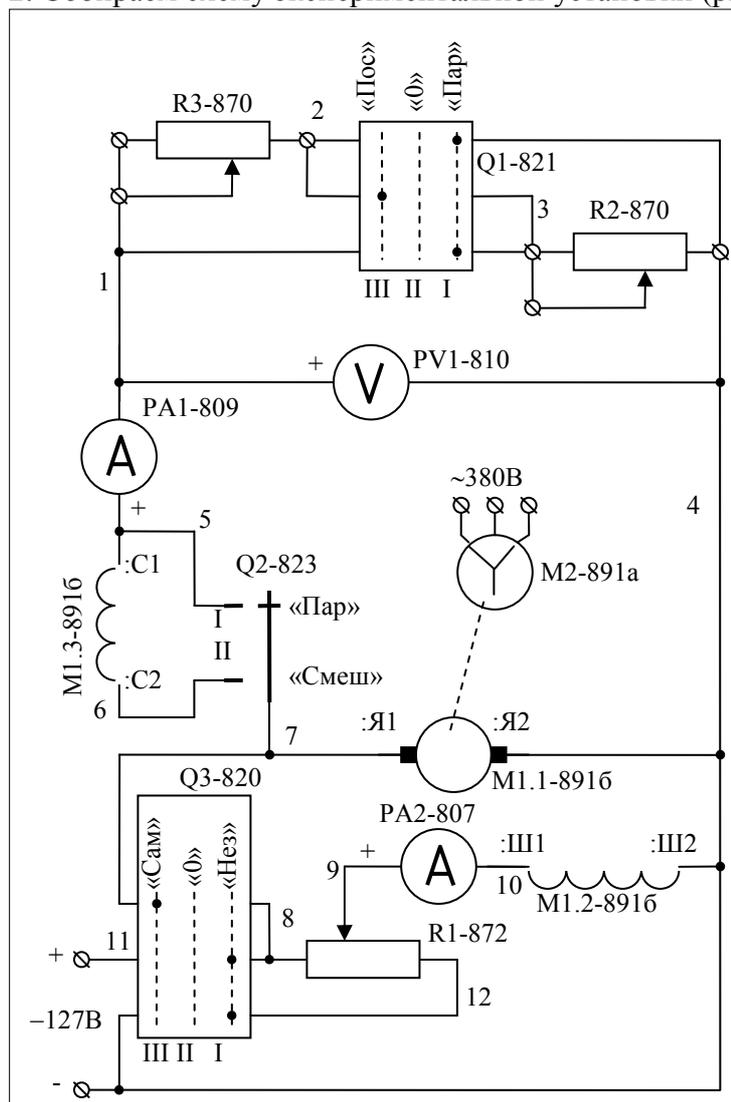


Рис. 1. Схема испытания генератора постоянного тока при параллельном, смешанном и независимом возбуждении

3. Снимаем характеристику холостого хода

Зависимость напряжения от тока возбуждения при отсутствии нагрузки ($R_n=\infty$) и постоянной, равной номинальной, частоте вращения ($\omega=\omega_n=Const$).

4. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 1

R _н	I _в , А (807)	I _н , А (809)	U, В (810)
∞	0	0	4,5
∞	0,05	0	13
∞	0,1	0	21
∞	0,15	0	27
∞	0,2	0	35
∞	0,3	0	48
∞	0,4	0	56
∞	0,5	0	64,25
∞	0,6	0	69,5
∞	0,7	0	72,5
∞	0,8	0	75
∞	0,7	0	73
∞	0,6	0	69
∞	0,5	0	65
∞	0,4	0	59
∞	0,3	0	50,5
∞	0,2	0	36,25
∞	0,15	0	29,5
∞	0,1	0	23
∞	0,05	0	14,25
∞	0	0	4

5. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0»(821, II)
- переключатель Q2 - в положение «Пар»(823, I)
- переключатель Q3 – в положение «Нез» (820, I)

6. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;
- Устанавливаем заданную величину тока возбуждения, предусмотренного первой и далее последующими строками таблицы;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

7. Снимаем внешнюю характеристику при независимом возбуждении

Зависимость напряжения от тока нагрузки при постоянных частоте вращения и токе возбуждения

8. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 2

1	R _н	I _в , А (807)	I _н , А (809)	U, В (810)
	∞	0,8	0	75

ос	2RP	0,8	2,4	71
ос	1,5RP	0,8	3	70
ос	RP	0,8	4,4	68
ар	0,5RP	0,8	7,8	60
ар	0,375RP	0,8	8,6	57,25
ар	0,25RP	0,56	10	45

9. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0» (821, II)
- переключатель Q2 - в положение «Пар»(823, I)
- переключатель Q3 – в положение «Нез» (820, I)

10. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;
- Реостатом R1 устанавливаем ток возбуждения, при котором на выходе генератора номинальное напряжение ($I=0,8A$, $U=75V$);
- Устанавливаем заданное вторым столбцом сопротивление нагрузки (ток возбуждения должен поддерживаться таким же, как и в первом опыте при сопротивлении нагрузки, равном бесконечности);
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

11. Снимаем внешнюю характеристику при параллельном возбуждении

Зависимость напряжения от тока возбуждения при постоянном, равном нулю, сопротивлении в цепи обмотки возбуждения и постоянной частоте вращения вала генератора.

12. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 3

1	R_H	I_B, A (807)	I_H, A (809)	U, B (810)
	∞	0,56	0	66
ос	2RP	0,51	2	60
ос	1,5RP	0,48	2,6	58
ос	RP	0,46	3,6	54,5
ар	0,5RP	0,35	5,4	41
ар	0,375RP	0,31	5,9	37,5
ар	0,25RP	0,25	6,6	29,5

ар	0,125RP	0,1	5,9	14
ар	0	0	2,5	0

13. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0»(821, II)
- переключатель Q2 - в положение «Пар»(823, I)
- переключатель Q3 – в положение «Сам» (820, III)

14. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;
- Реостат R1 полностью выводим (сопротивление реостата равно нулю);
- Устанавливаем заданное вторым столбцом сопротивление нагрузки;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

15. Снимаем внешнюю характеристику при смешанном возбуждении

16. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 4

Rн	Iв, А (807)	Iн, А (809)	U, В (810)
∞	0,55	0	66
2RP	0,54	2	62
1,5RP	0,53	2,6	60
RP	0,51	3,8	59,5
0,5RP	0,5	7	59,5
0,375 RP	0,47	8,2	51
025RP	0,42	9,9	45

17. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0»(821, II)
- переключатель Q2 - в положение «Смеш»(823, II)
- переключатель Q3 – в положение «Сам» (820, III)

18. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;
- Реостат R1 полностью выводим (сопротивление реостата равно нулю);
- Устанавливаем заданное вторым столбцом сопротивление нагрузки;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

19. Снимаем регулировочную характеристику при независимом возбуждении

Зависимость тока возбуждения, необходимого для поддержания номинального напряжения на выходе генератора, от тока нагрузки при номинальной частоте вращения.

Примечание: регулировочная характеристика при параллельном возбуждении будет точно такой же.

20. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 5

Rн	Iв, А (807)	Iн, А (809)	U, В (810)
∞	0,37	0	75
2RP	0,4	1,9	75
1,5RP	0,41	2,4	75
RP	0,46	3,6	75
0,5RP	0,6	7,2	75
0,375	0,7	8,8	75
RP			
025RP	0,55	10	75

21. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0» (821 II)
- переключатель Q2 - в положение «Пар»(823 I)
- переключатель Q3 – в положение «Нез» (820 I)

22. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;
- Потенциометром R1 устанавливаем ток возбуждения, при котором напряжение на выходе генератора равно номинальному;
- Устанавливаем заданное вторым столбцом сопротивление нагрузки;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

23. Снимаем регулировочную характеристику при смешанном возбуждении

24. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 6

Rн	Iв, А (807)	Iн, А (809)	U, В (810)
∞	0,38	0	75
2RP	0,4	1,9	75
1,5RP	0,4	2,5	75
RP	0,43	3,7	75
0,5RP	0,5	7,2	75
0,375	0,54	8,5	75
RP			
025RP	0,42	10	75

25. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0»(821, II)
- переключатель Q2 - в положение «Смеш»(823, II)
- переключатель Q3 – в положение «Нез» (820, I)

26. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;

- Потенциометром R1 устанавливаем ток возбуждения, при котором напряжение на выходе генератора равно номинальному;
- Устанавливаем заданное вторым столбцом сопротивление нагрузки;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

27. Строим графики экспериментальных зависимостей, предусмотренных в заданиях

28. Осуществляем оценку полученных результатов

29. Сделать и записать заключение, насколько экспериментальные характеристики подтверждают теоретические предположения.

2.3 Лабораторная работа №5, 6 (4 часа).

Тема: «Двигатель постоянного тока»

2.3.1 Цель работы:

Ознакомиться с конструкцией и принципом действия двигателя с параллельным возбуждением, научиться пускать двигатель и изменять направление его вращения, оценить влияние нагрузки на характеристики двигателя, изучить способы регулирования частоты вращения.

2.3.2 Задачи работы:

1. Снять и построить рабочие характеристики $I, M, \omega, \eta, P_1 = f(P_2)$ при $I_b = \text{const}$; $U = \text{const}$
2. Снять и построить регулировочную характеристику $I_b = f(M)$ при $U = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$.

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.3.4 Описание (ход) работы:

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
2. Собираем схему экспериментальной установки (рис. 1).

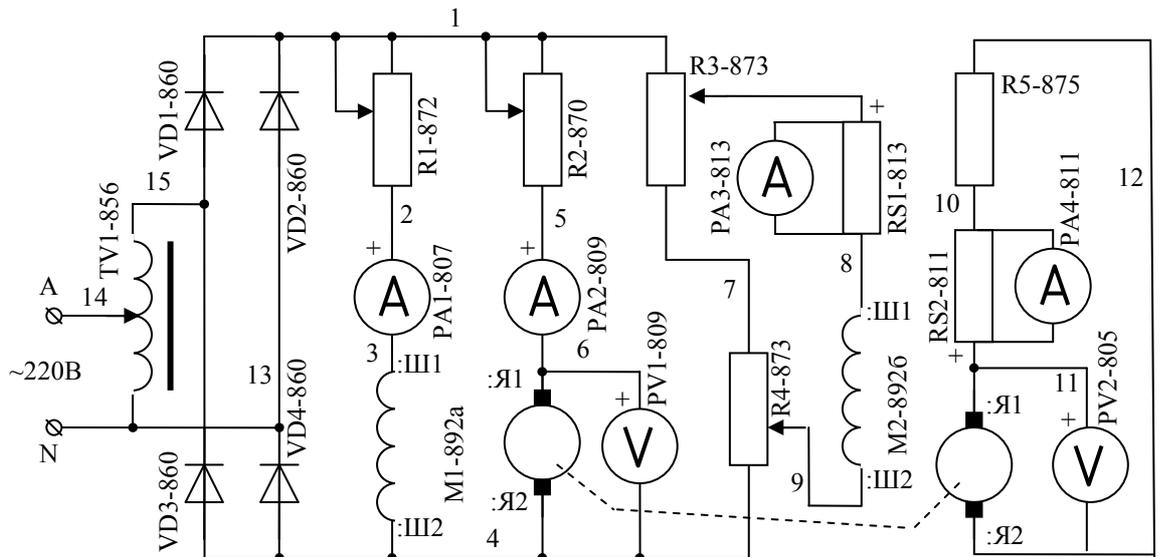


Рис. 1. Схема испытания электродвигателя.

3. Снимаем рабочие характеристики
4. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 1

Опытные данные									
У _{яд} (U ₁), В	20	20	20	20	20	20	20	20	20
I _{вг} (I ₃), А		,16	,4	,64	,88	,36	,68	,0	,32
I _{вд} (I ₁), А									
I _{яд} (I ₂), А									
U _{яг} (U ₂), В									
I _{яг} (I ₄), А									
n, об/мин									
РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ									
$\omega, 1/c=0,967\pi n/30$									
$P_{1\text{яд}}=U_{\text{яд}}\cdot I_{\text{яд}}, \text{Вт}$									
$P_{2\Gamma}=U_{\text{яг}}\cdot I_{\text{яг}}, \text{Вт}$									
$\Delta P_{\text{эмг}}=I_{\text{яг}}^2 R_{\text{аг}}, \text{Вт}$									
$\Delta P_{\text{эщг}}=I_{\text{яг}}$									
* $\Delta U_{\text{щ}}, \text{Вт}$									
$\Delta P_{\text{доб.г}}=0,01U_{\text{яг}}\cdot I_{\text{яг}}$									
$n_{\Gamma} \cdot (I_{\text{яг}}/I_{\text{янг}}) \text{ Вт}$									
$\Delta P_{\text{мг}}+\Delta P_{\text{мех.г}}=0,0$									
$3P_{2\Gamma}, \text{Вт}$									
$P_{1\Gamma}=P_{2\text{д}}=P_{2\Gamma}+\Sigma\Delta P_{\Gamma}, \text{Вт}$									
$M_{\Gamma}=M_{\text{д}}=M=P_{1\Gamma}/\omega, \text{Нм}$									
$\eta_{\text{д}}=P_{2\text{д}}/(P_{1\text{яд}}+U_{\text{вд}}\cdot I_{\text{вд}}), \text{Вт}$									

5. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
- Устанавливаем R1 на нуль (движок до отказа вниз), пусковой реостат R2 на максимум (движок до отказа вверх), движки реостатов R3 и R4 сводим так, чтобы сопротивление между ними было равно нулю; движок автотрансформатора TV1 поворачиваем по часовой стрелке до упора.
 - Подаём напряжение и постепенно по мере разгона M1 выводим пусковой реостат на нуль;
 - Движком автотрансформатора осторожно устанавливаем и поддерживаем неизменным напряжение на якоре электродвигателя равное 220 вольт.
 - Устанавливаем заданные в таблице для данной точки независимые величины
 - Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.
 - Поддерживаем неизменным на протяжении всех опытов напряжение на якоре (U2).

6. Снимаем регулировочную характеристику

7. Заготавливаем таблицу записи

Таблица 2

Опытные данные									
U _{яд} (U ₁), В	20	20	20	20	20	20	20	20	20
I _{яг} (I ₃), А		,16	,4	,64	,88	,36	,68	,0	,32
I _{вд} (I ₁), А									
n, об/мин	700	700	700	700	700	700	700	700	700
I _{яд} (I ₂), А									
U _{яг} (U ₂), В									
I _{яг} (I ₄), А									
РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ									
ω, 1/С									
P _{1яд} = U _{яд} *I _{яд} , Вт									
P _{2г} = U _{яг} *I _{яг} , Вт									
ΔP _{эмг} =I _{яг} ² R _{яг} , Вт									
ΔP _{эщг} =I _{яг} ² *ΔU _щ , Вт									
ΔP _{доб.г} =0,01U _{яг} *I _{яг} ² * (I _{яг} /I _{янг}) ² Вт									
ΔP _{мг} +ΔP _{мех.г} =0,0 3P _{2г} ,Вт									
P _{1г} =P _{2д} =P _{2г} +ΣΔP _г , Вт									
M _г =M _д =M=P _{1г} /ω, Нм									
η _д =P _{2д} /(P _{1яд} +U _{вд} *I _{вд})									

8. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек регулировочной характеристики:

— То же что и по пункту 5. Частоту вращения поддерживаем неизменной, регулируя ток возбуждения электродвигателя реостатом R1.

9. Строим графики экспериментальных зависимостей, предусмотренных в задании

10. Осуществляем оценку полученных результатов

11. Сделать и записать заключение, насколько экспериментальные характеристики подтверждают теоретические предположения.

2.4 Лабораторная работа №7, 8 (4 часа).

Тема: «Регулирование частоты вращения ДПТ»

2.4.1 Цель работы:

Научиться определять параметры схемы замещения трансформатора по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания. Освоить методику построения внешней характеристики трансформатора. Научиться определять оптимальный коэффициент загрузки трансформатора.

2.4.2 Задачи работы:

Провести опыты холостого хода и короткого замыкания, построить характеристики и определить параметры схемы замещения.

2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.4.4 Описание (ход) работы:

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде

2. Собираем схему экспериментальной установки

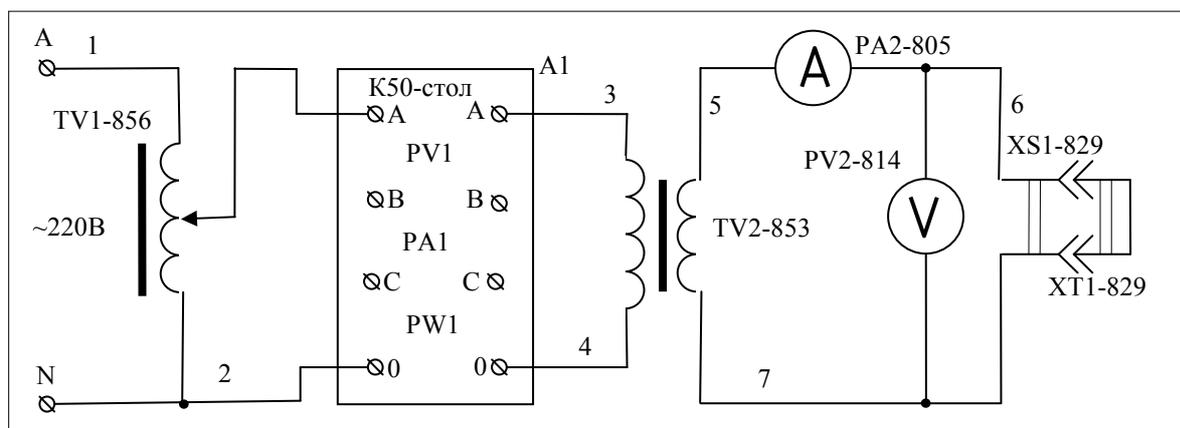


Рис. 1. Принципиальная схема установки для проведения опытов

3. Проводим опыт холостого хода

— Устанавливаем движок автотрансформатора в нулевое положение (против часовой стрелки до упора);

- Убираем короткозамкнутую вилку;
 - Подаём напряжение на вход автотрансформатора.
 - Изучаем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
 - Устанавливаем заданную в таблице величину напряжения(показания прибора PV1 необходимо умножить на 0,876) ;
 - Снимаем и записываем в таблицу показания остальных электроизмерительных приборов.
 - Определяем и заносим в таблицу результаты расчёта
4. Заготавливаем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных.

Таблица 1

⇒ Результаты:	опыта;				расчёта	
	U 10, В	I 0, А	P 10, Вт	U 20, В	S 0, ВА	cos φ φ10
	17					
	0					
	18					
	0					
	19					
	0					
	20					
	5					
	U 10НОМ =220	I 0НОМ=	P 10НОМ =	U 20НОМ=	S 0НОМ=	cos φ φ10НОМ
	24					
	0					
	$Z_m = U_{10НОМ} / I_{10}$		$R_m = P_{10НОМ} / I_{10}^2$		$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$	

Старший по работе проецирует таблицу на экран, а все остальные переносят её в тетради. Распределяются исполнители.

Запускаем установку и осуществляем измерения

Старший по работе выполняет действия по пункту 4.3.1, а каждый из ответственных за точку производит действия по пункту 4.3.2. Все остальные студенты заносят результаты измерений и расчётов в свои отчёты.

Проводим опыт короткого замыкания

Знакомимся с порядком запуска установки:

Устанавливаем движок автотрансформатора в нулевое положение (против часовой стрелки до упора);

Устанавливаем короткозамкнутую вилку;

Подаём напряжение на вход автотрансформатора.

Изучаем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

Устанавливаем заданную величину тока;

Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

Определяем и заносим в таблицу результаты расчёта

Заготавливаем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных.

Таблица 2

Результаты:	опыта;				расчёта		
Исполнитель	II	U	P	I	S	C	
ь:	К, А	1К, В	1К, Вт	2К, А	1К, ВА	osφ1К	
Сидоров	1						
Козлов	1, 5						
И т. д.	2						
	2, 5						
	3						
	3, 5						
	4						
	4, 5						
	5						
	$R_K = R_1 + R'_2 = P_{1К.НОМ}$				$R_{K75} = R_K \frac{310}{235+t} =$		
	$Z_K = Z_1 + Z'_2 = U_{1К.НОМ}$				$X_K = X_1 + X_2 = \sqrt{Z_K^2 -$		
	$Z_{K75} = \sqrt{R_{K75}^2 + X_K^2} =$				$U_K \% = \frac{I_{1НОМ} Z_{K75}}{U_{1НОМ}} 100 =$		
	$u_{Ka} \% = \frac{I_{1НОМ} R_{K75}}{U_{1НОМ}} 100 =$				$u_{Kp} \% = \frac{I_{1НОМ} X_K}{U_{1НОМ}} 100 =$		

Старший по работе спроецировал таблицу на экран, а все остальные переносят её в свои отчёты. Распределяются исполнители.

Запускаем установку и осуществляем измерения

5. Строим характеристики

- Холостого хода: $S_0, P_0, \cos\varphi_0 = f(U_{10})$
- Короткого замыкания: $P_K, I_K, \cos\varphi_k = f(U_K)$
- Теоретических зависимостей $U_2 = f(\beta)$ и $\eta = f(\beta)$

6. Рассчитываем и заносим в таблицу U_2 и η при $\cos\varphi_2 = 0.85$

β	0,2	0,4	0,6	0,8
$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta S_{НОМ} \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K}$				
$\Delta U \% = \beta (u_{Ka} \% \cos\varphi_2 + u_{Kp} \% S)$				

$$U'_2 = U_{\text{НОМ}} \left(1 - \frac{\Delta U \%}{100}\right)$$

7. Строим графики

Оба графика в одной системе координат.

8. Определяем оптимальное значение β ($\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}$)

9. Осуществляем сравнение опытных и теоретических зависимостей.

2.5 Лабораторная работа №9, 10 (4 часа).

Тема: «Однофазные трансформатор и автотрансформатор»

2.5.1 Цель работы:

Сравнить характеристики однофазных трансформатора и автотрансформатора. Уяснить достоинства и недостатки автотрансформатора и трансформатора.

2.5.2 Задачи работы:

Снять внешние характеристики трансформатора и автотрансформатора и определить процентное изменение напряжения при номинальной нагрузке по сравнению с

$$\Delta U_2 = \frac{U_{20} - U_{2H}}{U_{20}} 100\%$$

холостым ходом

2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.5.4 Описание (ход) работы:

1. Осуществляем испытание трансформатора
2. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
3. Собираем схему экспериментальной установки

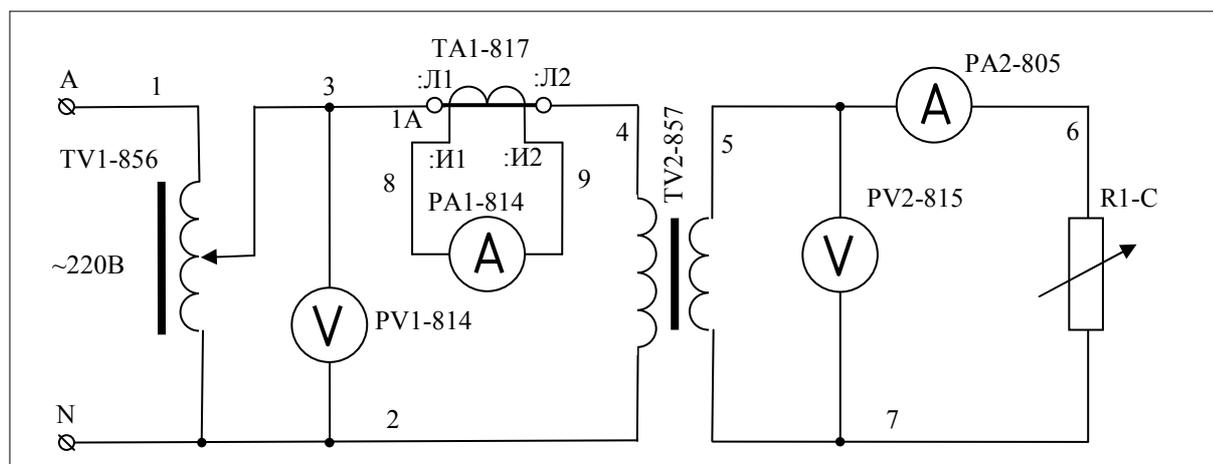


Рис. 1. Принципиальная схема установки для испытания трансформатора

4. Порядок запуска установки:

— Устанавливаем движок автотрансформатора в нулевое положение (против часовой стрелки до упора);

- Устанавливаем минимальную нагрузку (движок реостата против часовой стрелки до упора);
- Подаём напряжение на вход автотрансформатора.

5. Действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- С помощью автотрансформатора устанавливаем напряжение U_1 , (PV1), равное 220 В;
- Устанавливаем заданную величину тока нагрузки (РА2) с помощью реостата R1;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

6. Заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных.

Таблица 1

Опытные данные							
I_1 , А							
I_2 , А		3	4	5	6	7	7,5
U_1 В	20	20	20	20	20	20	20
U_2 , В							
Расчётные данные							
Степень загрузки трансформатора $\beta = I_2/I_{2н}$							
Абсолютное изменение напряжения $\Delta U = U_{20} - U_2$, В							
Относительное изменение напря-я $\delta U = 100\Delta U/U_{20}, \%$							
Полная мощность на входе тр-ра $S_1 = I_1 U_1$, ВА							
Полная мощность на выходе тр-ра $S_2 = I_2 U_2$, ВА							

7. Осуществляем испытание автотрансформатора

8. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде

9. Корректируем схему экспериментальной установки

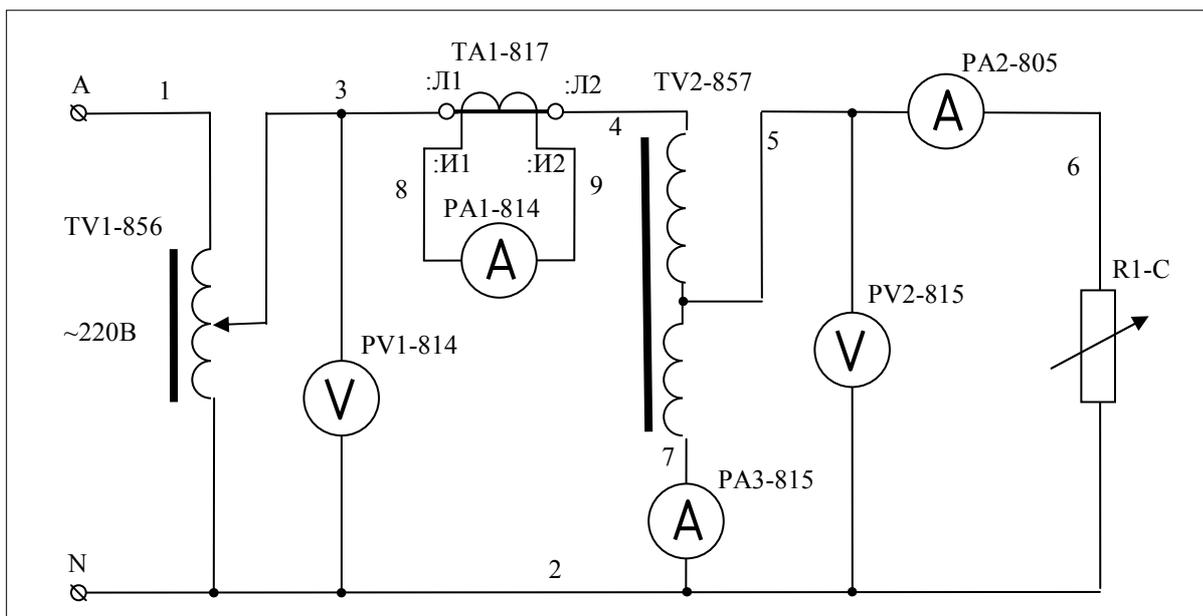


Рис. 2. Принципиальная схема установки для испытания автотрансформатора

10. Порядок запуска установки и снятия опытных данных

— Что и при испытании трансформатора.

11. Заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных.

Таблица 2

Опытные данные							
I_1, A							
I_2, A		2,7	4	5	6	7	7,5
I_3, A							
U_1, B	20	20	20	20	20	20	20
U_2, B							
Расчётные данные							
Степень загрузки трансформатора $\beta = I_2 / I_{2н}$							
Абсолютное изменение напряжения ΔU $= U_{20} - U_2, B$							
Относительное изменение напр-я $\delta U = 100 \Delta U / U_{20}, \%$							
Полная мощность на входе тр-ра $S_1 = I_1 U_1, BA$							
Полная мощность на выходе тр-ра $S_2 = I_2 U_2, BA$							

12. Строим графики экспериментальных зависимостей $U_2 = f(\beta)$ и $\delta U_2 = f(\beta)$ для трансформатора и для автотрансформатора

Все графики построить в одной системе координат.

13. Осуществляем сравнение опытных данных
14. Сделать и записать заключение, насколько экспериментальные характеристики подтверждают теоретические предположения.

2.6 Лабораторная работа №11, 12 (4 часа).

Тема: «Параллельная работа трансформаторов»

2.6.1 Цель работы:

Усвоить условия параллельной работы трансформаторов, уметь включать трансформаторы на параллельную работу и опытным путём проверять распределение нагрузки между ними.

2.6.2 Задачи работы:

Опытным путём определить уравнивающий ток в режиме холостого хода и распределение токов в фазах трансформаторов под нагрузкой. Произвести оценку качества согласования трансформаторов при параллельной работе.

2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.6.4 Описание (ход) работы:

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
2. Собираем схему экспериментальной установки

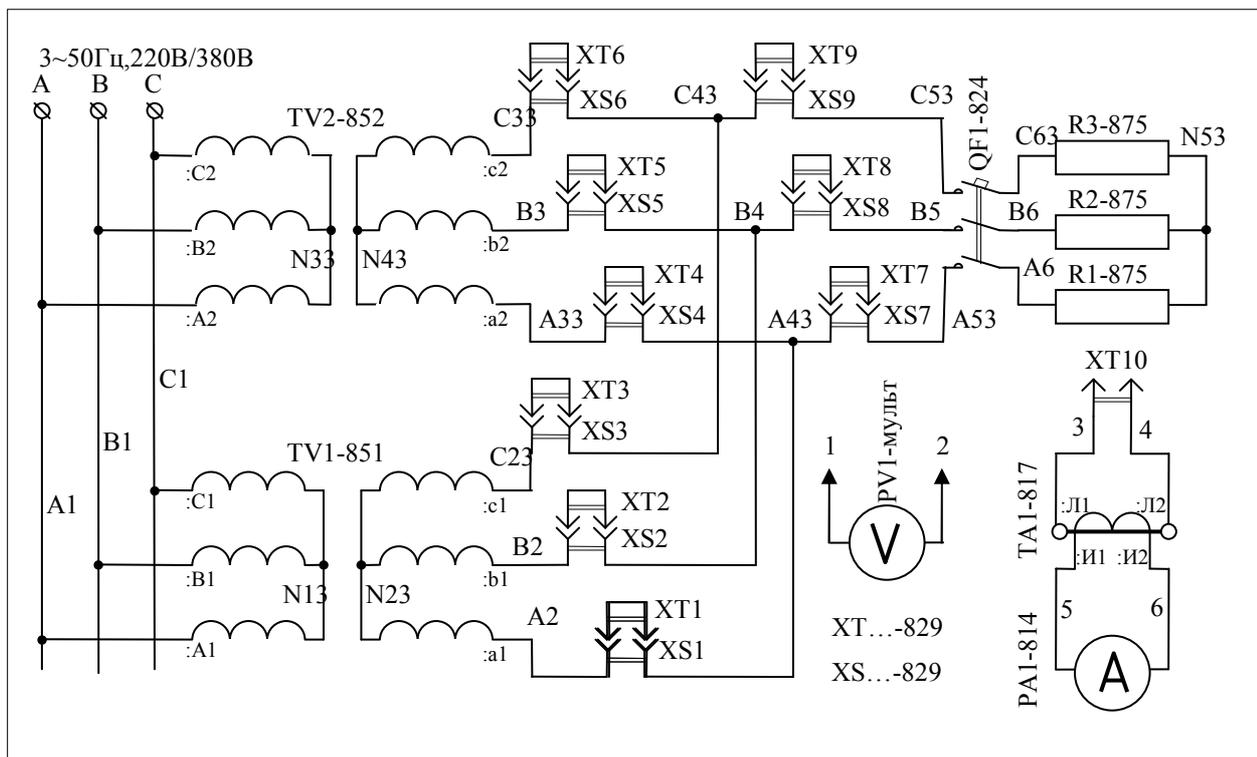


Рис. 1. Схема включения трансформаторов на параллельную работу.

3. Записываем порядок действий при включении трансформаторов на параллельную работу:

- Отключаем QF1, короткозамкнутые вилки XT2 и XT3 вынимаем из розеток;
- Подаём напряжение на входные клеммы ;
- Измеряем напряжение на розетках XS2 и XS3;
- Если измеренные напряжения близки к нулю, фазировка произведена верно,

короткозамкнутые вилки вставляем в розетки, тем самым включаем трансформаторы на параллельную работу;

4. Заготавливаем таблицу результатов измерения уравнильных токов

Таблица 1

Фаза →	A (XT1)	B (XT2)	C (XT3)
Разность потенциалов на разъединённой фазе $\Delta U, В$			
Опытное значение уравнильного тока $I_{УР.О.}$, А			
Сопротивление цепи замыкания уравнильного тока, Ом $(Z_{KI} + Z_{KI}) = \Delta U / I_{УР.О.}$			

5. Записываем действия при измерении уравнильных токов.

- Вынимаем вилку XT1;
- Измеряем и записываем в таблицу напряжение ΔU ;
- Измеряем и записываем уравнильный ток;
- То же самое проделываем с фазами В и С.

6. Заготавливаем таблицу для фиксации распределения нагрузки между трансформаторами

Таблица 2

Объект →		Тр -р I	Тр- р II	На грузка
Фазные напряжения U_{Φ}	B	U N2-a1=	UN 4-a2=	UN 5-A6=
		U N2-b1=	UN 4-b2=	UN 5-B6=
		U N2-c1=	UN 4-c2=	UN 5-C6=
Линейный ток ЛЛ (равен при соединении звездой фазному току I_{Φ})	A	I1=	I4=	I7=
		I2=	I5=	I8=
		I3=	I6=	I9=
Полная мощность в фазах (опытное значение) $S_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi}$	B	S_{Φ}		
	A	S_{Φ}		
	B	S_{Φ}		
	C	S_{Φ}		
Полная мощность	B	SI	SII	SH

всех трёх фаз $S=S\Phi A+S\Phi B+S\Phi C$	A		=	=	АГР=
Абсолютная погрешность (SI+SII)-SHAГР $\Delta S=$	A	B			
Относительная погрешность $\delta S\%=100\%\Delta S/SCPEДHEE$		%			

7. Записываем действия при определении распределения нагрузки между трансформаторами:

- Включаем автоматический выключатель QF1.
- Подаём напряжение;
- Измеряем напряжения и токи;
- Рассчитываем мощности.

8. Проверяем баланс мощностей

Должно быть $SI+SII=SHAГР$. Если есть расхождение, определить абсолютную погрешность $\Delta S= (SI+SII)-SHAГР$ и относительную $\delta S\%=100\%\Delta S/SCPEДHEE$.
 $SCPEДHEE=[(SI+SII)+SHAГР]/2$

9. Записываем выводы по работе

2.7 Лабораторная работа №13, 14 (4 часа).

Тема: «Несимметричные режимы работы трёхфазного трансформатора»

2.7.1 Цель работы:

Провести сравнительный анализ влияния схемы соединения трёхфазного двухобмоточного трансформатора на искажение симметрии первичных и вторичных линейных и фазных напряжений. Овладеть методикой определения сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемами соединения Y/Y_n Δ/Y_n .

2.7.2 Задачи работы:

Собрать на лабораторном стенде, поочерёдно, схемы соединения трансформатора U/U_n и Δ/U_n , нагрузить однофазной нагрузкой, измерить распределение токов в первичных обмотках, линейные и фазные напряжения, для той и другой схем измерить сопротивления нулевой последовательности и построить векторные диаграммы, сравнить опытные и теоретические данные.

2.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.7.4 Описание (ход) работы:

1. Исследуем распределение токов и напряжений
2. Заготавливаем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных

Таблица 1

Схема	U/УН	Д/УН
-------	------	------

Опытные данные		
ИНАГР, А	4	4
UAB, В		
UBC, В		
UCA, В		
IA, А		
IB, А		
IC, А		
Uab, В		
Ubc, В		
Uca, В		
Ua, В		
Ub, В		
Uc, В		
IA, А	$= 2K I_{нагр}$	$= K I_{нагр}$
IB, А	$= K I_{нагр} / 3$	$= 0 - 0 = 0$
IC, А	$= K I_{нагр} / 3$	$= K I_{нагр}$

$K=W2/W1$ – коэффициент трансформации исследуемого трансформатора, равный для используемого трансформатора 0,577.

3. Исследуем распределение токов и напряжений при соединении обмоток трансформатора по схеме У/Ун

4. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде.

5. Собираем схему экспериментальной установки

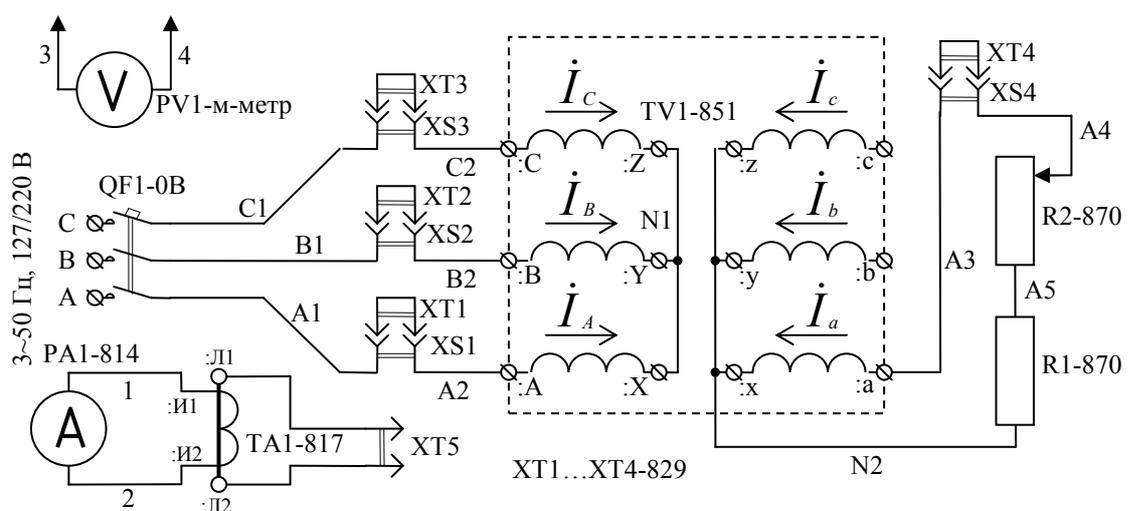


Рис.1. Принципиальная схема установки для испытания трансформатора при схеме соединения обмоток У/Ун.

6. Производим измерение и расчёт напряжений и токов и заполнение соответствующего столбца таблицы

7. Перед включением установки в сеть реостат R2 установить на максимальное сопротивление.

8. Осуществляем сравнение опытных и теоретических значений линейных токов в первичной обмотке.

9. Рассчитать процент расхождения результатов по каждому из линейных токов.

10. По данным таблицы 1 строим векторную диаграмму вторичных напряжений трансформатора для схемы соединения У/Ун:

— в нижней части поля чертежа горизонтально откладываем вектор напряжения U_{bc} в масштабе, соответствующем размеру отведённого под диаграмму поля;

— из точек B и C делаем засечки раствором циркуля соответственно равным отрезкам U_{ab} и U_{ca} ;

— в полученную точку A проводим вектора U_{ab} и U_{ca} ;

— проводим медианы полученного треугольника и определяем его центр O;

— из точек A, B, и C делаем засечки в центр треугольника ABC и получаем центр нейтральной точки фазных напряжений O1 вторичной обмотки;

— Измеряем длину отрезка OO1, который в масштабе даёт напряжение смещения нейтрали трансформатора E_o .

11. Исследуем распределение токов и напряжений при соединении обмоток трансформатора по схеме $\Delta/Ун$

12. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде

13. Корректируем схему экспериментальной установки

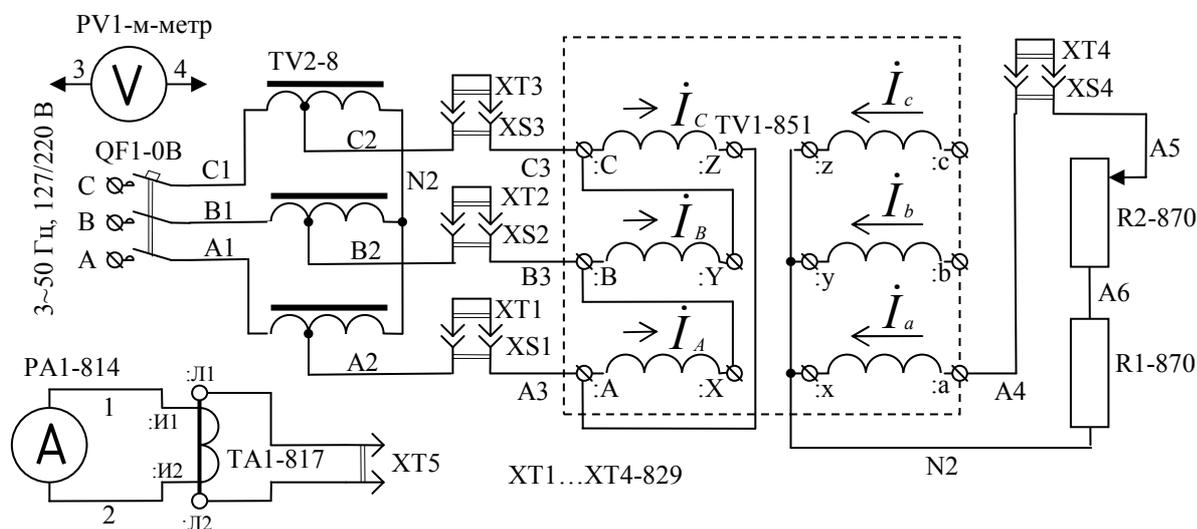


Рис.2. Принципиальная схема установки для испытания трансформатора при схеме соединения обмоток $\Delta/Ун$.

14. Обмотки трансформатора переключаются на схему $\Delta/Ун$, в соответствии со схемой, изображённой на рис. 2. Работу выполняет очередной исполнитель.

15. Производим измерение и расчёт напряжений и токов и заполнение соответствующего столбца таблицы

16. Перед включением установки в сеть реостат R2 установить на максимальное сопротивление.

17. Осуществляем сравнение опытных и теоретических значений линейных токов в первичной обмотке.

18. Рассчитать процент расхождения результатов по каждому из линейных токов.
 19. По данным таблицы 1 строим векторную диаграмму для схемы соединения Δ/Y_H
 20. Определяем сопротивления нулевой последовательности и смещение нейтрали вторичной обмотки при несимметричной нагрузке трансформатора
 21. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных

Таблица 2

Физические величины	У/У _Н	Δ/У _Н
	Параметр	Параметр
Опытные данные		
U ₀ , В		
P ₀ , Вт		
I ₀ , А (Устанавливается равным току однофазной нагрузки по предыдущему опыту)		
Расчётные данные		
$Z_0 = U_0 / (3I_0)$, Ом		
$R_0 = P_0 / (3(I_0)^2)$, Ом		
$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$, Ом		
I ₀ = I ₀ . пр/3		
E ₀ = I ₀ *X ₀ , В		

22. Определяем сопротивление нулевой последовательности для схемы соединения У/У_Н
 23. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
 24. Собираем схему экспериментальной установки
 25. Собрать электрическую схему.

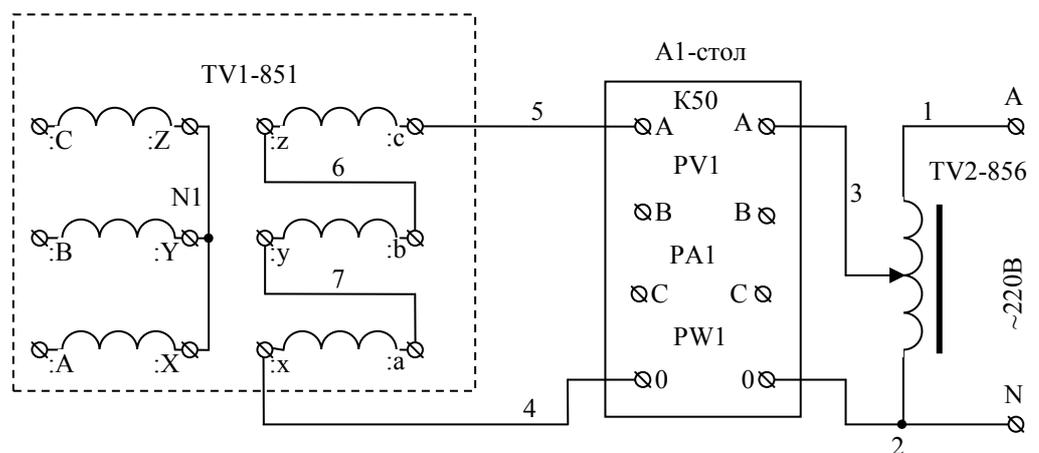


Рис.3. Принципиальная схема установки для измерения сопротивления нулевой последовательности трансформатора при схеме соединения обмоток У/У_Н

26. Включаем установку и производим измерение и расчёт параметров нулевой последовательности для схемы У/Ун.
27. Осуществляем сравнение полученных значений E_0 из потенциальной диаграммы и рассчитанных в таблице 2
28. Рассчитать процент расхождения результатов
29. Осуществляем измерение и расчёт параметров нулевой последовательности для схемы Δ /Ун.
30. Корректируем схему в соответствии с рис. 4

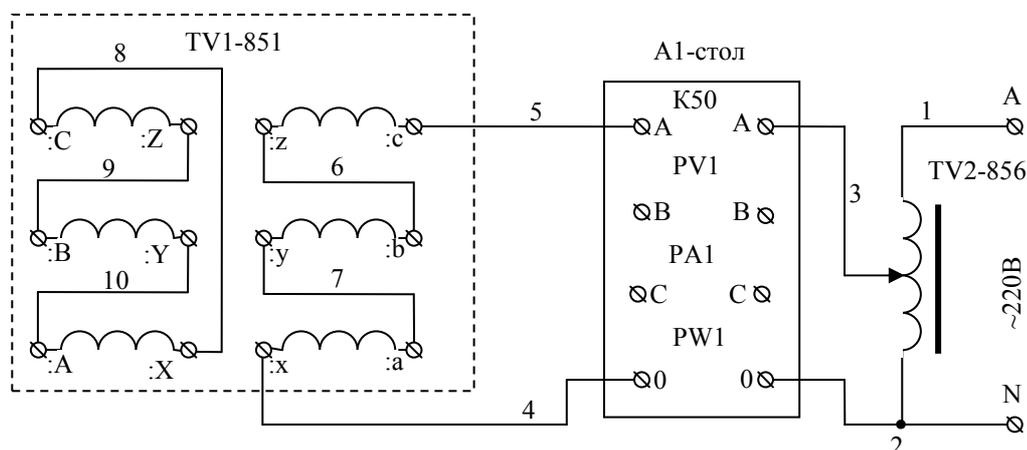


Рис. 4. Принципиальная схема установки для измерения сопротивления нулевой последовательности трансформатора при схеме соединения обмоток Δ /Ун.

31. Включаем установку и производим измерение и расчёт параметров нулевой последовательности для схемы Δ /Ун.
32. Осуществляем сравнение полученных значений E_0 из потенциальной диаграммы и рассчитанных в таблице 2
33. Рассчитать процент расхождения результатов.

2.8 Лабораторная работа №15, 16, 17 (6 часов). Тема: «Высшие гармоники в трансформаторах»

2.8.1 Цель работы:

- Выяснить причины возникновения высших гармоник тока, потока и ЭДС в трансформаторах.
- Установить характер влияния конструкции магнитопровода, схемы соединения обмоток, величины питающего напряжения на уровень и частотный спектр высших гармоник.
- Уяснить способы подавления высших гармоник или нейтрализации их вредного влияния на режимы работы электротехнического оборудования.

2.8.2 Задачи работы:

- Собрать трёхфазный групповой трансформатор по схемам У/У, У/ Δ и Δ /У, используя три однофазных броневого трансформатора.
- В режиме холостого хода измерить линейные и фазные напряжения и токи первичной и вторичной обмоток.
- Зарисовать осциллограммы всех измеряемых величин. Для каждой схемы определить величину третьей гармоники тока или ЭДС.

2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.8.4 Описание (ход) работы:

1. Исследуем схему соединения группового трансформатора У/У
 2. Знакомимся с техническими данными и размещением используемого оборудования
 3. Собираем схему экспериментальной установки
- Внутренние соединения и маркировку выводов каждого трансформатора принять по варианту 1 (рис.1)

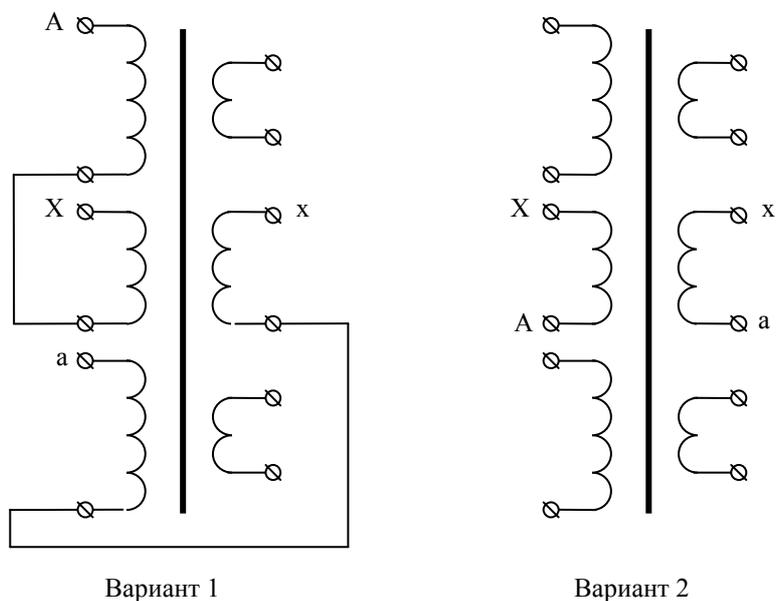


Рис.1. Маркировка выводов каждого из трансформаторов, расположенных на панели 854.

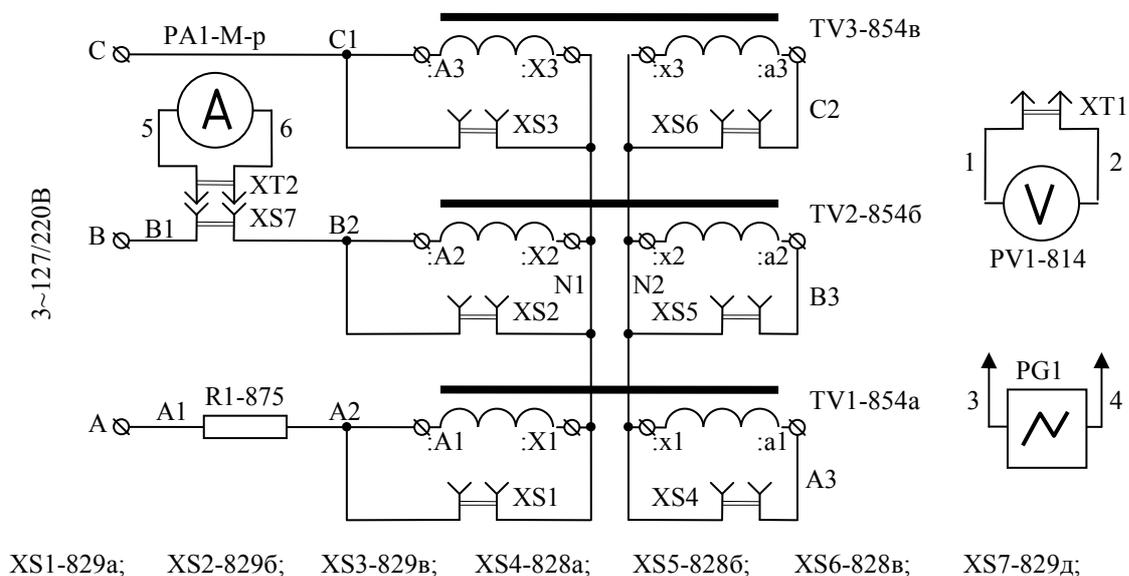


Рис. 2. Принципиальная схема установки для измерения напряжений и токов трансформатора при схеме соединения обмоток У/У.

4. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных

Таблица 1

	Измеряемый параметр		
	Обозначение	Вар. 1 (магнитная система насыщена)	Вар. 2 (магнитная система ненасыщенна)
Первичная обмотка			
	Намагничивающий ток	Io, А	
	Фазные напряжения	UA1-X1, В	
		UA2-X2, В	
		UA3-X3, В	
		УФ.СР=UФ=U А-Х, В	
	Линейные напряжения	UA1-A2, В	
		UA2-A3, В	
		UA3-A1, В	
		УЛ.СР=UЛ=UA -А, В	
	Соотношение линейного и фазного напряжений $K = UЛ/UФ$		
	$E_{3\phi} = \sqrt{U_{\phi}^2 - U_{л}^2/3}$, В		
	$E3\phi\% = (E3\phi/U\phi)100\%$		
Вторичная обмотка			
	Фазные напряжения	Ua1-x1, В	
		Ua2-x2, В	
		Ua3-x3, В	
		Уф.СР=Uф=Ua- х, В	
	Линейные напряжения	Ua1-a2, В	
		Ua2-a3, В	
		Ua3-a1, В	
		Ул.СР=Uл=Ua-a В	
	Соотношение линейного и фазного напряжений $K = UЛ/UФ$		
	$E_{3\phi} = \sqrt{U_{\phi}^2 - U_{л}^2/3}$, В		
	$E3\phi\% = (E3\phi/U\phi)100\%$		

5. Производим измерения в следующем порядке:

- Подаём напряжение сети.
- Измеряем напряжения и ток, указанные в столбце 2 таблицы 4-1 (при измерении тока мультиметр следует установить на соответствующий предел).

— Рассчитываем соотношение линейных и фазных напряжений.

— Рассчитываем и заносим в таблицу фазное значение ЭДС третьей гармоники

$$E_{3\phi} = \sqrt{E_{\phi}^2 - E_{1\phi}^2} \quad (2)$$

— где E_{ϕ} - измеренное в опыте действующее значение фазной ЭДС, представляющее собой квадратную сумму действующих значений отдельных гармоник (

$$E_{\phi} = \sqrt{E_{1\phi}^2 + E_{3\phi}^2 + E_{5\phi}^2 + \dots});$$

— $E_{1\phi}$ - действующее значение ЭДС первой гармоники, определяемое по

значениям измеренных в опыте линейных ЭДС ($E_{1\phi} = \frac{E_{1A}}{\sqrt{3}} = \frac{U_{AA}}{\sqrt{3}}$).

— Рассчитываем и заносим в таблицу значение ЭДС третьей гармоники в

процентах от номинального фазного напряжения $E_{3\phi} = \frac{E_{3\phi}}{U_{AX}} 100\%$.

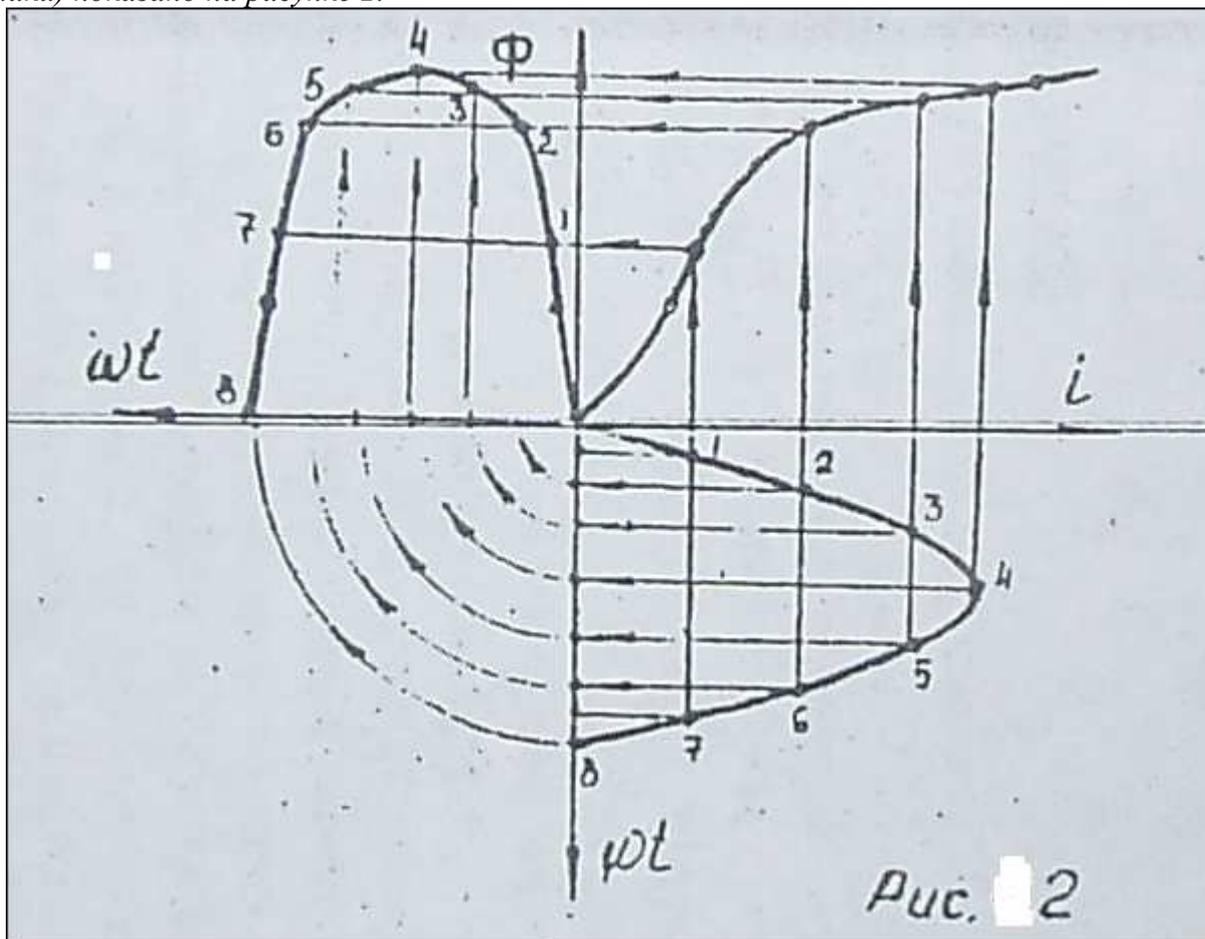
— При помощи осциллографа снимаем форму кривых измеренных напряжений (Форму кривой тока I_0 рекомендуется определять, подключив вход осциллографа на клеммы R1. Обратит внимание на установку пределов напряжения осциллографа). Форму кривых заносим в таблицу

Таблица 2

	Измеряемый параметр		
	Обозначение	Вар. 1 (магнитная система насыщена)	Вар. 2 (магнитная система ненасыщенна)
Первичная обмотка			
	Намагничивающий ток	I о, А	
	Фазное напряжение	U A1-X1, В	
	Линейное напряжение	U A1-A2, В	
Вторичная обмотка			
	Фазное напряжение	U a1-x1, В	

	Линейное напряжение	U a1-a2, В		
--	---------------------	---------------	--	--

Отсутствие проводящего контура для намагничивающего тока третьей гармоники в этой схеме приводит к возникновению несинусоидального (уплощённой формы) магнитного потока, содержащего кроме первой третью и кратные ей гармоники. Графическое построение формы кривой магнитного потока при намагничивающем практически синусоидальном токе (не содержащем третьей гармоники) показано на рисунке 2.



Третья гармоника магнитного потока наводит ЭДС третьей гармоники в фазах первичной и вторичной обмоток, что и видно из осциллограмм. Следует обратить внимание на отсутствие ЭДС третьей гармоники в линейных ЭДС. Объясняется это тем, что последние представляют собой векторную разность фазных ЭДС, а разность ЭДС третьей гармоники, обладающих свойствами нулевой последовательности, равна нулю.

$$\frac{U_{AA}}{U_{AX}} < 3$$

Поэтому отношение линейных ЭДС к фазным более высокого порядка, то ЭДС третьей гармоники можно подсчитать по формуле 2.

Из осциллограмм фазных напряжений видно, что амплитудные значения первой и третьей гармоник совпадают по фазе. В групповых броневого трансформаторах увеличение амплитудного значения фазной ЭДС может достигать больших значений, особенно в момент включения трансформатора в питающую сеть. В условиях эксплуатации это может привести к пробое изоляции и поэтому для трёхфазных

групповых трансформаторов схема У/У не применяется. В трёхстержневых трансформаторах поток третьей гармоники вытесняется из магнитопровода, замыкаясь по пути с большим магнитным сопротивлением. Поэтому поток значительно ослабляется и влияние ЭДС третьей гармоники малозаметно. Величина её составляет не более 5...7% от номинального напряжения.

6. Убеждаемся, что на осциллограмме явно прослеживается лишь 3-я и 5-я гармоники.

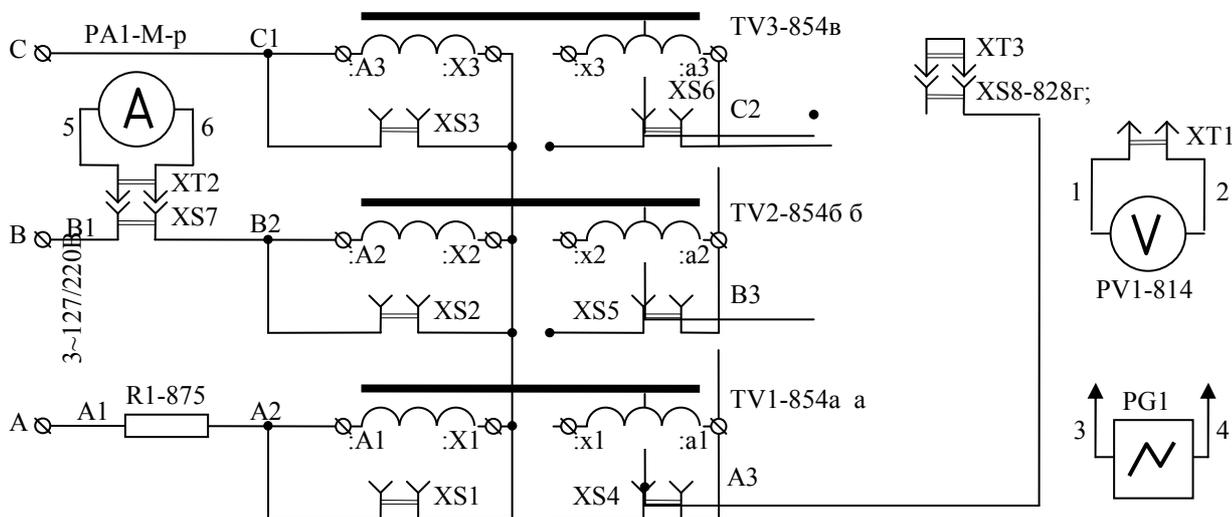
7. Корректируем схему, подключив трансформаторы по варианту 2 (магнитопровод ненасыщен)

8. Осуществляем измерения и расчёты, как описано в предыдущем пункте. Данные заносим в таблицы 1 и 2. Сравниваем результаты измерений и расчётов.

9. Исследуем схему соединения группового трансформатора У/∇

10. Корректируем схему соединения обмоток в соответствии с рис.4

Трансформаторы подключаются по варианту 1



XS1-829а; XS2-829б; XS3-829в; XS4-828а; XS5-828б; XS6-828в; XS7-829д;

Рис. 3. Принципиальная схема установки для измерения напряжений и токов трансформатора при схеме соединения обмоток У/Δ.

11. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 3

	Измеряемый параметр		
	Обозначение	Вар. 1 (магнитная система насыщена)	Вар. 2 (магнитная система ненасыщенна)
Первичная обмотка – розетка XS8 замкнута			
	Намагничивающий ток	Io, А	
	Фазные напряжения	UA1-X1, В	
		UA2-X2, В	

		UA3-X3, В		
		UФ.СР=UФ=U A-X, В		
	Линейные напряжения	UA1-A2, В		
		UA2-A3, В		
		UA3-A1, В		
		UЛ.СР=UЛ=UA -A, В		
	Соотношение линейного и фазного напряжений K= UЛ/UФ			
	$E_{3\phi} = \sqrt{U_{\phi}^2 - U_{л}^2/3}$, В			
	E3Ф%=(E3Ф/UФ)100%			
Первичная обмотка – розетка XS8 разомкнута				
	Намагничивающий ток	Io, А		
	Фазные напряжения	UA1-X1, В		
		UA2-X2, В		
		UA3-X3, В		
		UФ.СР=UФ=U A-X, В		
	Линейные напряжения	UA1-A2, В		
		UA2-A3, В		
		UA3-A1, В		
		UЛ.СР=UЛ=UA -A, В		
	Соотношение линейного и фазного напряжений K= UЛ/UФ			
	$E_{3\phi} = \sqrt{U_{\phi}^2 - U_{л}^2/3}$, В			
	E3Ф%=(E3Ф/UФ)100%			
Вторичная обмотка – розетка XS8 замкнута				
	Ток третьей гармоники	I3, А		
	Фазные напряжения	Ua1-x1, В		
		Ua2-x2, В		
		Ua3-x3, В		
		Uф.СР=Uф=Ua- x, В		
	Фазные напряжения	Ua1-x1, В		
		Ua2-x2, В		
		Ua3-x3, В		
		Uф.СР=Uф=Ua- x, В		
	Утроенное напряжение третьей гармоники	$\Sigma U3\phi = \Sigma E3 = 3E3$, В		
	E3Ф%=(E3Ф/UФ)100%			

12. Производим измерения в следующем порядке:
- Подаём напряжение сети.
 - При замкнутых накоротко с помощью короткозамкнутой вилки или амперметра розетках XS7 и XS8 измеряем фазные и линейные напряжения обмоток и токи I_0 и I_3 .
 - При разомкнутой розетке XS8 на её зажимах измеряем сумму напряжений третьих гармоник $\Sigma U_3\Phi = \Sigma E_3$.
 - Обращаем внимание, как изменяется действующее значение U_{AX} и I_0 при замкнутой и разомкнутой розетке XS8.
 - При помощи осциллографа снимаем форму кривых измеренных напряжений и токов (Форму кривой тока I_0 определять, подключив вход осциллографа на клеммы R1. Обратить внимание на установку пределов напряжения осциллографа). Форму кривых заносим в таблицу

Таблица 4

	Измеряемый параметр		
	Обозначение	Вар. 1 (магнитная система насыщена)	Вар. 2 (магнитная система ненасыщенна)
Первичная обмотка – розетка XS8 замкнута			
Намагничивающий ток	I_0 , А		
Фазное напряжение	U A1-X1, В		
Линейное напряжение	U A1-A2, В		
Первичная обмотка – розетка XS8 разомкнута			
Намагничивающий ток	I_0 , А		
Фазное напряжение	U A1-X1, В		
Линейное напряжение	U A1-A2, В		
Вторичная обмотка – розетка XS8 замкнута			
Ток третьей гармоники	I_3 , А		

	Фазное напряжение	U_a 1-х1, В		
Вторичная обмотка – розетка XS8 разомкнута				
	Фазное напряжение	U_a 1-х1, В		
	Утроенное напряжение третьей гармоники	Σ $U_{3\phi} = \Sigma E_3$ $= 3E_3$, В		

13. Обращаем внимание, как изменяется форма напряжений и тока I_0 при замкнутой и разомкнутой розетке XS8.

14. В схеме У/∇ первичная обмотка, как и в предыдущем опыте, для токов третьей гармоники представляет собой бесконечно большое сопротивление и, следовательно, возникает магнитный поток третьей гармоники Φ_3 , который наведёт ЭДС третьей гармоники E_3 в фазах первичной и вторичной обмоток. Во вторичных обмотках, собранных по схеме треугольник, ЭДС третьей гармоники сложатся и вызовут ток третьей гармоники, циркулирующий в замкнутом контуре треугольника. Последний создаст свой (вторичный) магнитный поток, который находится в противофазе с первичным потоком Φ_3 , что обуславливается индуктивным характером тока I_3 в треугольнике. В результате суммарное значение Φ_3 будет незначительным и фазную ЭДС можно считать практически не содержащей третьей гармоники. Отношение линейной и фазной ЭДС в этом случае будет равно $U_{AA} / U_{AX} = \sqrt{3}$.

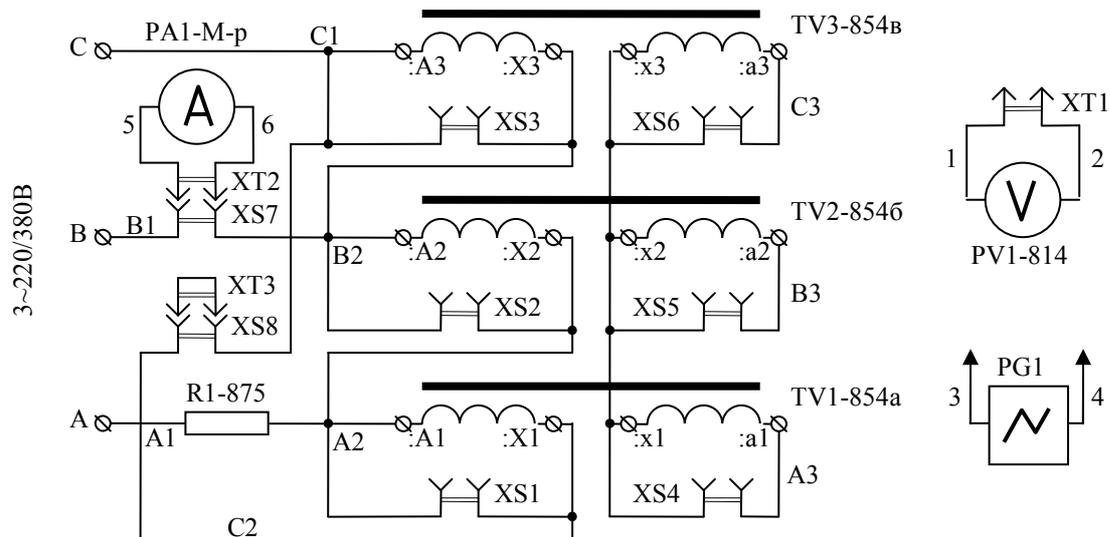
15. Корректируем схему, подключив трансформаторы по варианту 2 (магнитопровод ненасыщен)

16. Осуществляем измерения и расчёты, как описано в предыдущем пункте. Данные заносим в таблицы 1 и 2. Сравниваем результаты измерений и расчётов.

17. При измерении фазных напряжений с целью исключения влияния тока, потребляемого вольтметром, на величину и симметрию измеряемых напряжений к одной из фаз подключается вольтметр, а в две другие фазы сопротивления 12 кОм, равные по величине сопротивлению вольтметра.

18. Исследуем схему соединения группового трансформатора ∇/У

19. Корректируем схему соединения обмоток в соответствии с рис.5
Трансформаторы подключить по варианту 2.



XS1-829а; XS2-829б; XS3-829в; XS4-828а; XS5-828б; XS6-828в; XS7-829д; XS8-829г;

Рис.5. Принципиальная схема установки для испытания трансформатора при схеме соединения обмоток Δ/У.

20. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 5

	Измеряемый параметр		
	Обозначение	Вар. 2 (магнитная система насыщена – сеть 220/380В)	Вар. 2 (магнитная система ненасыщенна – сеть 127/220В)
Первичная обмотка			
	Намагничивающий линейный ток	$I_l = I_0, A$	
	Намагничивающий фазный ток	I_ϕ, A	
	Линейное напряжение	$U_l = U_A$ 1-А2, В	
	$K = I_\phi / I_l$ (при отсутствии гармоник равен 1,73)		
	$I_3 = \sqrt{I_\phi^2 - I_l^2} / 3, A$		
Вторичная обмотка			
	Фазные напряжения	В	$U_{a1-x1},$
		В	$U_{a2-x2},$
		В	$U_{a3-x3},$
			$U_{\phi.CP} =$

		U _Ф =U _{a-x} , В		
	Линейные напряжения	U _{a1-a2} , В		
		U _{a2-a3} , В		
		U _{a3-a1} , В		
		U _{Л.СР} = U _Л =U _{a-a} В		
	Соотношение линейного и фазного напряжений K= U _Л /U _Ф			
	$E_{3\phi} = \sqrt{U_{\phi}^2 - U_{л}^2/3}$, В			
	E3Ф%=(E3Ф/UФ)100%			

21. Производим измерения в следующем порядке:

- Подаём сетевое напряжение.
- Измеряем напряжения на вторичной обмотке U_{ах}, U_{аа} и токи первичной обмотки I_Л, I_Ф.

- Определяем ток третьей гармоники

$$I_{3\phi} = \sqrt{I_{\phi}^2 - I_{1\phi}^2}, \quad (3)$$

$$I_{1\phi} = \frac{I_{Л}}{\sqrt{3}}.$$

- где
- Зарисовываем осциллограммы измеренных величин.

Таблица 6

	Измеряемый параметр		
	Обозначение	Вар. 2 (магнитная система насыщена – сеть 220/380В)	Вар. 2 (магнитная система ненасыщенна – сеть 127/220В)
Первичная обмотка			
	Намагничивающий линейный ток	I о, А	
	Линейное напряжение	U A1-A2	
Вторичная обмотка			
	Фазное напряжение	U a1-x1, В	

	Линейное напряжение	U a1-a2, В		
--	---------------------	---------------	--	--

В данной схеме соединения обмоток процесс намагничивания сердечника трансформатора протекает аналогично процессу при схеме Y/∇. Разница состоит только лишь в том, что контуром для токов третьей гармоники является первичная обмотка. Измеренный в опыте фазный ток содержит сумму эффективных значений токов всех

нечётных гармоник $I_{\phi} = \sqrt{I_{1\phi}^2 + I_{3\phi}^2 + I_{5\phi}^2 + \dots}$. Поэтому ток третьей гармоники, пренебрегая токами высших гармоник, можно определить по формуле 3

Аналогично, как и в схеме Y/∇, ток третьей гармоники гасит магнитное поле третьей гармоники, вызывающее этот ток фазные ЭДС обмоток будут синусоидальны.

22. Корректируем схему, подключив трансформаторы по варианту 2 на напряжение 127/220В (магнитопровод ненасыщен)

23. Осуществляем измерения и расчёты, как описано в предыдущем пункте. Данные заносим в таблицы 1 и 2. Сравниваем результаты измерений и расчётов.

24. При измерении фазных напряжений с целью исключения влияния тока, потребляемого вольтметром, на величину и симметрию измеряемых напряжений к одной из фаз подключается вольтметр, а в две другие фазы сопротивления 12 кОм, равные по величине сопротивлению вольтметра.

2.9 Лабораторная работа №18, 19 (4 часа).

Тема: «Трёхфазная асинхронная машина в режимах с заторможенным ротором»

2.9.1 Цель работы:

- Ознакомиться с особенностями использования асинхронной машины в качестве индукционного регулятора или регулируемого индуктивного сопротивления и схемами соединения её обмоток;
- Освоить методику экспериментального получения характеристик;
- Уяснить основные свойства машины, работающей в указанных режимах.

2.9.2 Задачи работы:

- Исследовать асинхронную машину с заторможенным ротором в режимах фазорегулятора и индукционного регулятора.
- Снять зависимость величины и фазы выходных напряжений от угла поворота ротора.

2.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.9.4 Описание (ход) работы:

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
2. Собираем схему экспериментальной установки

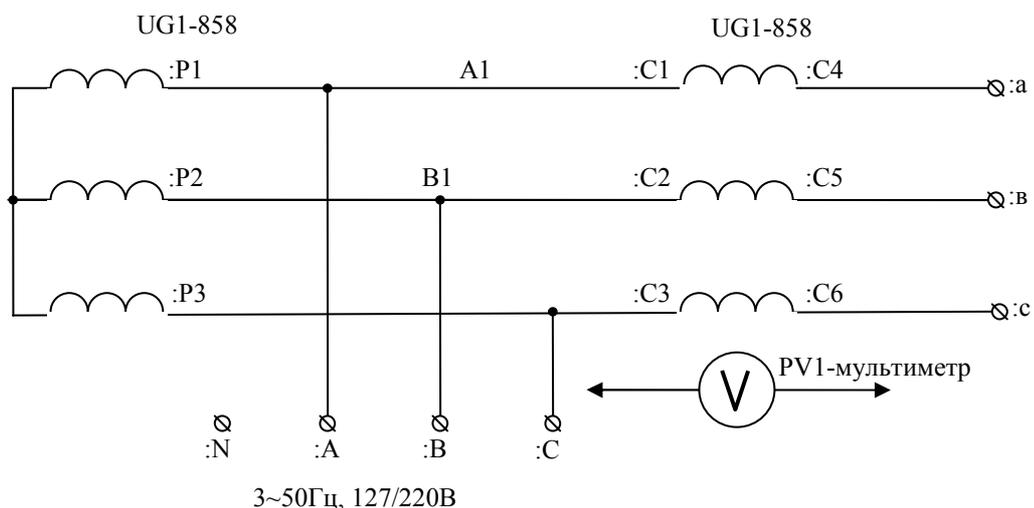


Рис.1. Принципиальная схема испытания заторможенной асинхронной машины в режиме фазорегулятора и индукционного регулятора.

В режиме фазорегулятора выходным напряжением является напряжение, снимаемое с обмоток статора (U_{Aa} , U_{Bb} , U_{Cc}), а в режиме индукционного регулятора – суммарное напряжение сети и обмоток статора (U_{Na} , U_{Nb} , U_{Nc} или U_{ab} , U_{bc} , U_{ca}). Входным напряжением в том и другом случаях является напряжение U_1 (фазное U_{NA} , U_{NB} , U_{NC} или линейное U_{AB} , U_{BC} , U_{CA})/

3. Записываем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
4. Устанавливаем заданное значение угла поворота ротора.
5. Записываем показания приборов.
6. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 3

, град	α	-	-	-	-	0	3	6	9	1
	120	90	60	30	0	0	0	0	20	1
U_{NA} , В										
U_{NB} , В										
U_{NC} , В										
U_{Aa} , В										
U_{Bb} , В										
U_{Cc} , В										
U_{Na} , В										
U_{Nb} , В										
U_{Nc} , В										
U_{AB} , В										
U_{BC} , В										
U_{CA} , В										

BC, В									
CA, В	U								
ab, В	U								
bc, В	U								
ca, В	U								
, град	φ								

7. Строим векторную диаграмму и определяем фазу выходного напряжения фазорегулятора φ

8. Векторная диаграмма строится с помощью циркуля для одной фазы, например, фазы А:

— Откладывается общий для всех углов поворота ротора вектор фазного напряжения сети.

— Раствором циркуля, равном в масштабе напряжению U_{Aa} , проводится окружность с центром в конце вектора U_{NA} .

— С начала вектора U_{NA} делается засечка раствором циркуля, в масштабе равном U_{Na} .

— В точку пересечения откладываются вектора U_{NA} и U_{Aa} .

— Транспортиром определяется и заносится в таблицу угол φ между фазным напряжением сети U_{NA} и напряжением вторичной обмотки U_{Aa} .

— Построения по пунктам 3...5 повторить для всех углов поворота ротора.

9. Строим графики зависимостей U_{Aa} и $\varphi = f(\alpha)$ - для фазорегулятора и $U_{Na} = f(\alpha)$ - для индукционного регулятора.

10. Старший заготавливает координатную плоскость на доске, а каждый из исполнителей наносит точки графиков на плоскость. Старший по работе проводит искомые кривые.

11. Формулируем заключение по проделанному заданию.

12. Исследовать асинхронную машину с заторможенным ротором в режиме регулируемой реактивной катушки.

13. Снять зависимость индуктивности катушки от угла поворота ротора.

14. Собираем схему экспериментальной установки

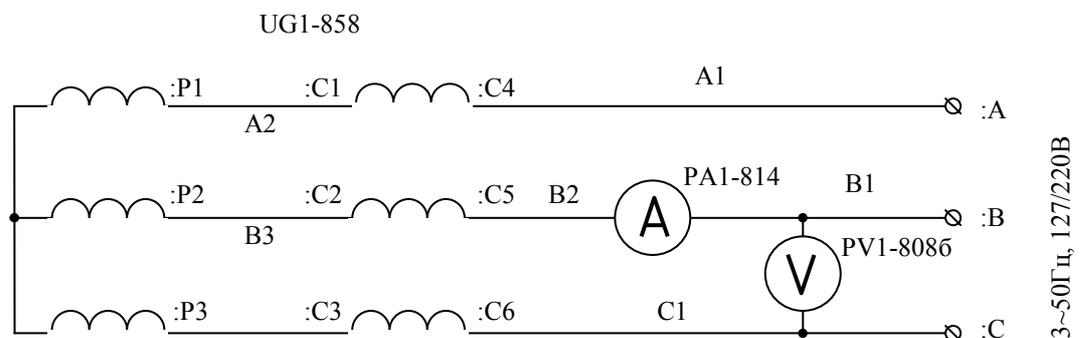


Рис. 3. Принципиальная схема исследования регулируемой реактивной катушки

15. Записываем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
16. Устанавливаем заданное значение угла поворота ротора α .
17. Записываем показания приборов.
18. Рассчитываем и заносим в таблицу расчётные данные.
19. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 2

п/п	α , град	U_1 , В	I_1 , А	X $=U_1/I_1$ (Ом)	$L=X/$ $2\pi f$ (Гн)
	-120				
	-90				
	-60				
	-30				
	0				
	30				
	60				
	90				
	120				

20. Строим график зависимости $L=f(\alpha)$

2.10 Лабораторная работа №20 (2 часа).

Тема: «Трёхфазный асинхронный электродвигатель в однофазном режиме»

2.10.1 Цель работы:

Ознакомиться со схемами подключения трёхфазного асинхронного двигателя к однофазной сети, с порядком пуска и реверсирования, принципами образования вращающего момента при пуске и в рабочем режиме, степенью использования номинальной мощности.

2.10.2 Задачи работы:

Исследовать работу трёхфазного асинхронного электродвигателя в однофазном режиме

2.10.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.10.4 Описание (ход) работы:

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в экспериментальной установке оборудования и его размещением на стенде
2. Знакомство осуществить по перечню элементов универсального лабораторного стенда, составленному на вводном занятии
3. Определяем сопротивление фазной обмотки электродвигателя при рабочей температуре (75оС)

4. Методом вольтметра-амперметра определяем сопротивление фазной обмотки электродвигателя при комнатной температуре $R_{1\Phi}$ (Сеть постоянного тока 25 В; амперметр постоянного тока на панели 809; вольтметр постоянного тока на панели 810а)
5. Пересчитываем сопротивление на рабочую температуру
 $R_{1\Phi 75} = 310R_{1\Phi} / (235 + t) = 5,61 \text{ Ом}$
6. Собираем схему экспериментальной установки

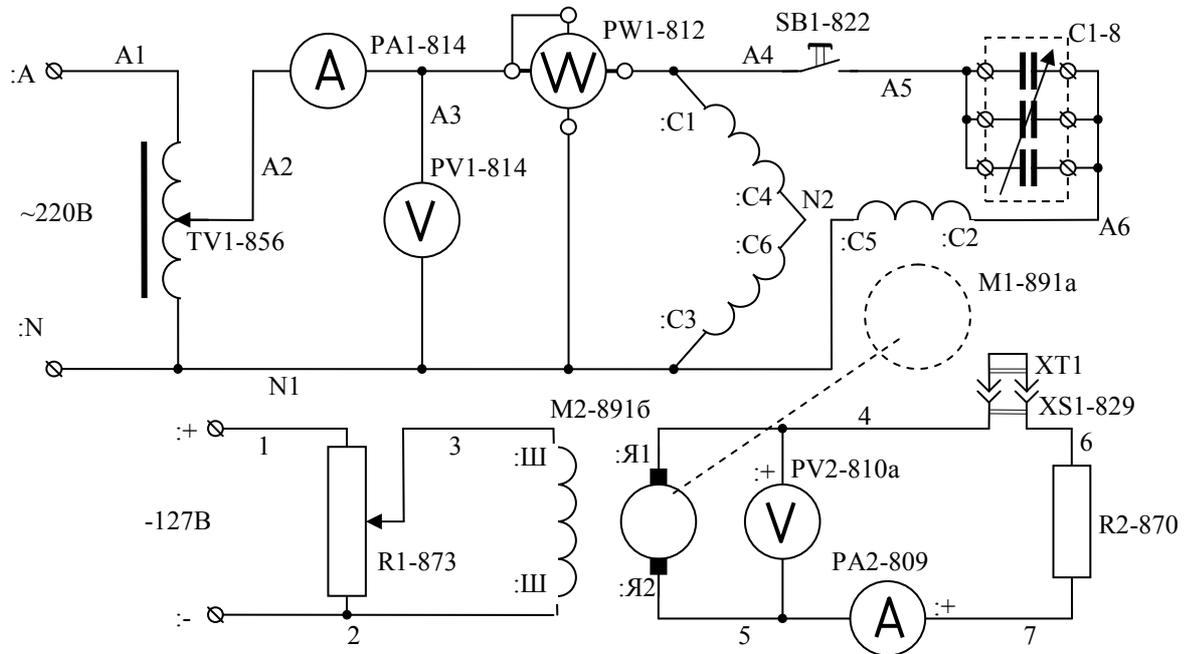


Рис. 1. Принципиальная схема установки для испытания двигателя

7. Рассчитываем необходимую ёмкость конденсатора для собранной схемы включения электродвигателя

Данные для расчёта: $I_{\Phi.NOM} = 4 \text{ А}$; $U_{\Phi.NOM} = 220 \text{ В}$. $C_P = \text{формула} = \text{расчёт} = \text{ответ}$ мкФ; $C_N = \text{формула} = \text{расчёт} = \text{ответ}$ мкФ.

8. Проводим опыт короткого замыкания и определяем сопротивление ротора $R'2$
9. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 1

Опытные данные			Расчётные данные		
U К, В	I К, А	PK Вт	RK=PK /(IK) ² , Ом	R'2=RK- R1 =RK-2R1Φ 75, Ом	Cosφк= PK/ UK IK

10. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
 - Устанавливаем напряжение на выходе автотрансформатора близким к нулю.
 - Подаём напряжение на вход автотрансформатора и при отключенной пусковой обмотке (кнопка отпущена) увеличиваем напряжение на выходе автотрансформатора пока ток в обмотке электродвигателя не станет равным номинальному.
 - Снимаем и рассчитываем показатели.
 - Заполняем таблицу

11. Проводим опыт холостого хода и строим зависимости $I_x = f(U)$;
 $P_x = f(U)$; $\cos \varphi_x = f(U)$

12. Разделить потери мощности холостого хода на потери в обмотке статора $\Delta P_{эл}$, в стали ΔP_{M1} и механические $\Delta P_{мех}$.

13. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

14. Распределяются исполнители

Таблица 2

Параметры ↓	Опытные данные									
U, В	40	30	20	10	00	90	80	70	60	50
I _x , А										
P _x , Вт										
Расчётные данные										
cosφ _x = P _x /U I _x										
ΔP _{Э1} = I _{2x} ² * R _{1Ф 75} , Вт										
ΔP _{Э2} = (Γ ₂ обр) ² R ₂ = (I _x /2) ² * R _{1Ф 75} , Вт										
ΔP _M +ΔP _{MEX} = (P _x -ΔP _{Э1} -ΔP _{Э2}), Вт										
U ₂ , В ₂										
Последующие параметры рассчитываются после построения зависимости (ΔP _M +ΔP _{MEX})=f(U ₂) и выделения механических потерь										
ΔP _M , Вт										

Примечание: Так как намагничивающая сила обмотки статора пульсирующая, то ток обратной последовательности Γ₂ обр будет в два раза меньше тока холостого хода I_x, а приведённое сопротивление обмотки ротора R₂ определено выше и примерно равно сопротивлению обмотки статора. R_{1Ф 75}.

15. Осуществляем пробный пуск электродвигателя.

— Устанавливаем ёмкость конденсатора, равную пусковой ёмкости, рассчитанной выше.

— С помощью короткозамкнутой вилки ХТ1 разрываем цепь якоря генератора постоянного тока, с целью исключения возможности возникновения тока якоря за счёт остаточного намагничивания полюсов генератора М2;

— Устанавливаем движок автотрансформатора на напряжение 220В;

— Удерживая нажатой кнопку SB1, подаём напряжение на зажимы автотрансформатора;

— Сразу же после разгона электродвигателя отпускаем кнопку;

— Отключаем электродвигатель.

— Меняем местами выводы пусковой или рабочей обмотки асинхронного электродвигателя и повторяем пуск;

— Убеждаемся, что электродвигатель вращается в обратном направлении;

— Передаём установку для снятия характеристик холостого хода

— Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Выполнение действий осуществляется назначенными в таблице исполнителями.
- Устанавливаем заданное в таблице напряжение.
- Снимаем и записываем показания приборов.

16. Рассчитываем: коэффициент мощности, электрические потери в статорной обмотке $\Delta P_{\Sigma 1}$, электрические потери в обмотке ротора $\Delta P_{\Sigma 2}$, сумму магнитных и механических потерь $\Delta P_M + \Delta P_{MECH}$, квадрат напряжения холостого хода U_2 .

17. Совместно с остальными исполнителями принимаем участие в построении графика $(\Delta P_M + \Delta P_{MECH}) = f(U_2)$ (на доске и в тетради).

18. Продолжает полученную прямую до пересечения с осью ординат и получаем значение механических потерь в двух машинах, не зависящих от напряжения ΔP_{MECH} . Механические потери в асинхронной машине M_1 ориентировочно принимаем в два раза меньше, чем в машине постоянного тока M_2 ($\Delta P_{MECH.2} = 2\Delta P_{MECH.1}$).

19. Определяем магнитные потери при заданном напряжении ΔP_M .

20. Строим предусмотренные заданием графики

21. Проводим опыты и получаем данные для построения рабочих характеристик двигателя Π , $\cos\phi$, $\eta = f(P_2)$ при $U_1 = U_{ном}$.

22. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 3

Параметры ↓	Опытные данные							
	1	1	2	2	3	3	4	4
$I_{1\phi}$, А	,2	,6	,2	,5	,0	,5	,0	
U_1 , В	20	20	20	20	20	20	20	20
P_1 , Вт								
U_Y , В								
I_Y , А								
	Расчётные данные							
$\cos\phi = P_1 / (U_1 I_{1\phi})$								
Определение мощности на валу через потери в электродвигателе (M_1)								
$\Delta P_{\Sigma 1} = I_{21\phi}^2 * 2R_{1\phi} 75$, Вт								
$P_{ЭМ} = P_1 - (\Delta P_{\Sigma 1} + \Delta P_M)$, Вт								
$\Delta P_{\Sigma 2} \approx \Delta P_{\Sigma 1}$, Вт								
$\Delta P_{ДОБ} = 0,005 * P_{1H} [I_{1\phi} / I_{1\phi.НОМ}]^2$, Вт, где P_{1H} – мощность при токе $I_{\phi.НОМ}$								
$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\Sigma 2} + \Delta P_{\Sigma 1} + \Delta P_{ДОБ} + \Delta P_M$								
+ $\Delta P_{MECH.1}$, Вт								
$P'_{В} = P_2 Д = P_1 Г = P_1 - \Sigma \Delta P$, Вт								
Определение мощности на валу через потери в генераторе (M_2)								
$P_2 Г = U_Y I_Y$, Вт								
$\Delta P_{\Sigma} = I_2 Y R_Y + I_Y * \Delta U_{Щ}$								
$\Delta P_{ДОБ} = 0,01 U_Y I_Y.НОМ (I_Y / I_Y.НОМ)$								
$\Delta P_M = \Delta P_M$.								

НОМУ2Я/У2Я.НОМ							
$\Sigma\Delta P = \Delta P_{\Sigma} + \Delta P_{ДОБ} + \Delta P_{М} + \Delta P_{МЕ}$							
X.2, Вт							
$P'`B = P1Г = P2Д = P2Г + \Sigma\Delta P$, Вт							
$PВ = (P'`B + P'`B)/2$							
$\eta = PВ / P1$							

23. Осуществляем пробный пуск электродвигателя.

24. Пуск по ниже перечисленным пунктам осуществляет очередной назначенный исполнитель

- Устанавливаем в розетку короткозамкнутую вилку;
- Запускаем электродвигатель в порядке, указанном выше;
- Устанавливаем потенциометр R1 на минимум выходного напряжения;
- Подаём на потенциометр напряжение постоянного тока;
- Передаём установку для снятия характеристик.
- Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек

характеристики:

- Действия выполняет каждый из назначенных в таблице исполнителей
- Изменяя ток возбуждения машины M2 устанавливаем заданный в таблице ток статора машины M1;
- Снимаем показания приборов;
- Осуществляем расчёт и заполнение таблицы.

25. Строим предусмотренные заданием графики

2.11 Лабораторная работа №21, 22 (4 часа).

Тема: «Асинхронный генератор»

2.11.1 Цель работы:

Ознакомиться с генераторным режимом асинхронной машины. Рассчитать ёмкость конденсатора, необходимого для самовозбуждения. Опытным путём оценить характеристики асинхронного генератора в режиме самовозбуждения.

2.11.2 Задачи работы:

— Снять зависимость напряжения холостого хода асинхронного генератора в режиме самовозбуждения от ёмкости конденсаторов $U_{XX} = f(C)$ при постоянной частоте вращения ротора.

— Построить зависимости I_1 , I_C , $I_{НАГ}$, U , $\eta = f(P_1)$ при заданной частоте вырабатываемого тока (47 Гц).

2.11.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.11.4 Описание (ход) работы:

1. Снять зависимость напряжения холостого хода асинхронного генератора в режиме самовозбуждения от ёмкости конденсаторов $U_{XX} = f(C)$ при постоянной частоте вращения ротора.

2. Опытным или расчетным путём определяем ток холостого хода
3. Включить электродвигатель в сеть и измерить ток.
4. Рассчитываем необходимую ёмкость конденсатора

- Расчёт осуществляем по формуле (2). (Работу выполняет очередной исполнитель.)
5. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
 6. Собираем схему экспериментальной установки

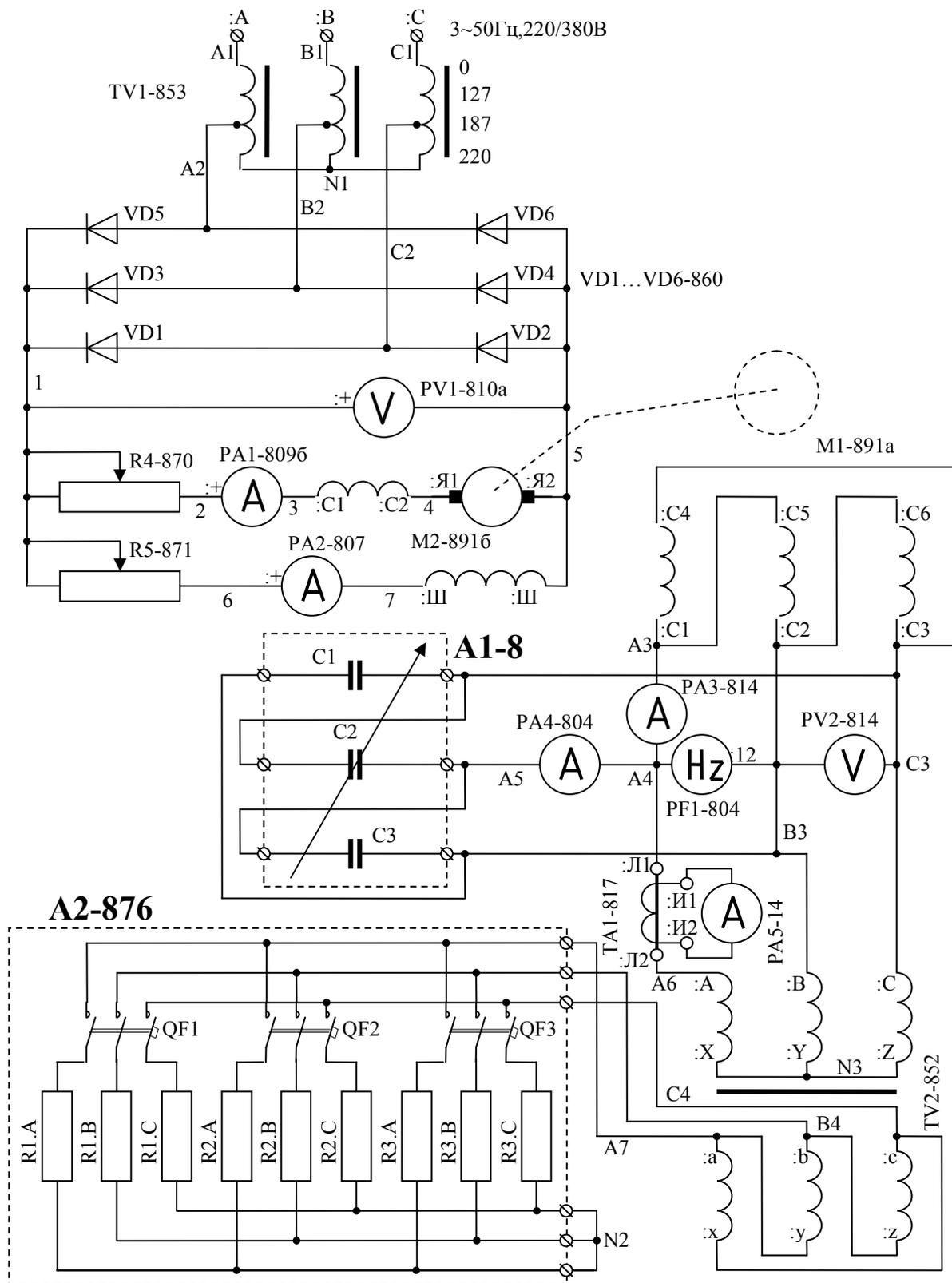


Рис. 1. Принципиальная схема установки для испытания асинхронного генератора

7. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 1

п/п	C, мкФ	, Гц	n = 60f, об/мин	I _C , А	I _B , А	U _{XX} , В
	1	0	3000			
	2	0	3000			
	2	0	3000			
	2	0	3000			
	3	0	3000			
	3	0	3000			

8. Порядок запуска установки

— Добавочное сопротивление в цепи якоря, чтобы уменьшить пусковой ток, устанавливаем на максимум.

— Регулировочный реостат R2 в цепи возбуждения электродвигателя M2 устанавливаем на минимальное сопротивление, чтобы обеспечить максимальный магнитный поток, а следовательно, больший пусковой момент при меньшем пусковом токе.

— Автоматические выключатели QF1...QF3 размыкаем.

— Подаём напряжение на вход трёхфазного автотрансформатора 220/380В.

— Медленно уменьшаем добавочное сопротивление до нуля, следя за тем, чтобы ток якоря не превышал 10 А.

— Записываем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

— Устанавливаем заданное значение ёмкости C.

— Регулировочным реостатом R2, меняя ток возбуждения, устанавливаем заданную частоту тока (50Гц), вырабатываемого асинхронной машиной M1.

— Заносим в таблицу показания приборов.

9. Строим предусмотренный заданием график

10. Построить зависимости I_л, I_C, I_{НАГ}, U, η = f(P1) при заданной частоте вырабатываемого тока (47 Гц).

11. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 2

Параметры ↓	Опытные данные									
	0	2	0	0	0	0	0	0	0	
F1	ТКЛ	О	КЛ.	В	ТКЛ	КЛ.	ТКЛ	КЛ.	ТКЛ	КЛ.
F2	ТКЛ	О	ТКЛ	С	КЛ.	КЛ.	ТКЛ	ТКЛ	КЛ.	КЛ.

F3	O		C		ТКЛ	ТКЛ	КЛ.	КЛ.	КЛ.	КЛ.
	ТКЛ		ТКЛ							
f, Гц	7	4	7	4	7	7	7	7	7	7
IЯ=I1, А										
I2, А										
I3, А										
I4, А										
I5, А										
UЯ=U1, В										
U2, В										
Расчётные данные										
РЯ ДВ=UЯ*IЯ, Вт										
ΔРЭ=IЯ(РЯ+RС)+IЯ*ΔUЩ										
ΔРДОБ=0,01UЯIЯ.НОМ(IЯ/IЯ.НОМ)										
ΔРМ+ΔРМЕХ=UЯIЯ.XX										
ΣΔР =ΔРЭ+ΔРДОБ+ΔРМ+ΔРМЕХ, Вт										
Р2 ДВ=Р1 Г =РЯ ДВ -ΣΔР, Вт										
Р2 Г=1,73U2I5Cosφ, Вт (Cosφ=1)										
ηГ= Р2 Г/Р1 Г										

Примечание: Сопротивление якоря РЯ=1 Ом

Сопротивление последовательной обмотки возбуждения RС=0,3 Ома

Ток холостого хода IЯ.XX =1,5 А

Падение напряжения под парой щёток ΔUЩ=1 В

12. Записываем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

— После запуска установки в порядке, описанном выше, подключаем заданное в таблице сопротивление нагрузки.

— Снимаем и рассчитываем показатели.

— Заполняем таблицу

13. Строим предусмотренные заданием графики

2.12 Лабораторная работа №23, 24 (4 часа).

Тема: «Исследование АД с КЗР в режимах холостого хода и короткого замыкания»

2.12.1 Цель работы:

Овладеть техникой и методикой проведения опытов холостого хода и короткого замыкания АД.

2.12.2 Задачи работы:

— Провести опыт холостого хода и построить зависимости $I_x = f(U)$;
 $P_x = f(U)$; $\cos \varphi_x = f(U)$. Разделить потери мощности холостого хода на потери в обмотке статора $\Delta P_{эл1}$, в стали ΔP_{M1} и механические ΔP_{MEX} .

— Провести опыт короткого замыкания и построить зависимости $I_K=f(U)$; $P_K=f(U)$; $\text{Cos}\varphi_K=f(U)$.

2.12.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.12.4 Описание (ход) работы:

1. Провести опыт холостого хода и построить зависимости $I_X = f(U)$; $P_X = f(U)$; $\text{Cos}\varphi_X = f(U)$. Разделить потери мощности холостого хода на потери в обмотке статора $\Delta P_{эл1}$, в стали ΔP_{M1} и механические ΔP_{MEX} .
2. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
3. Собираем схему экспериментальной установки

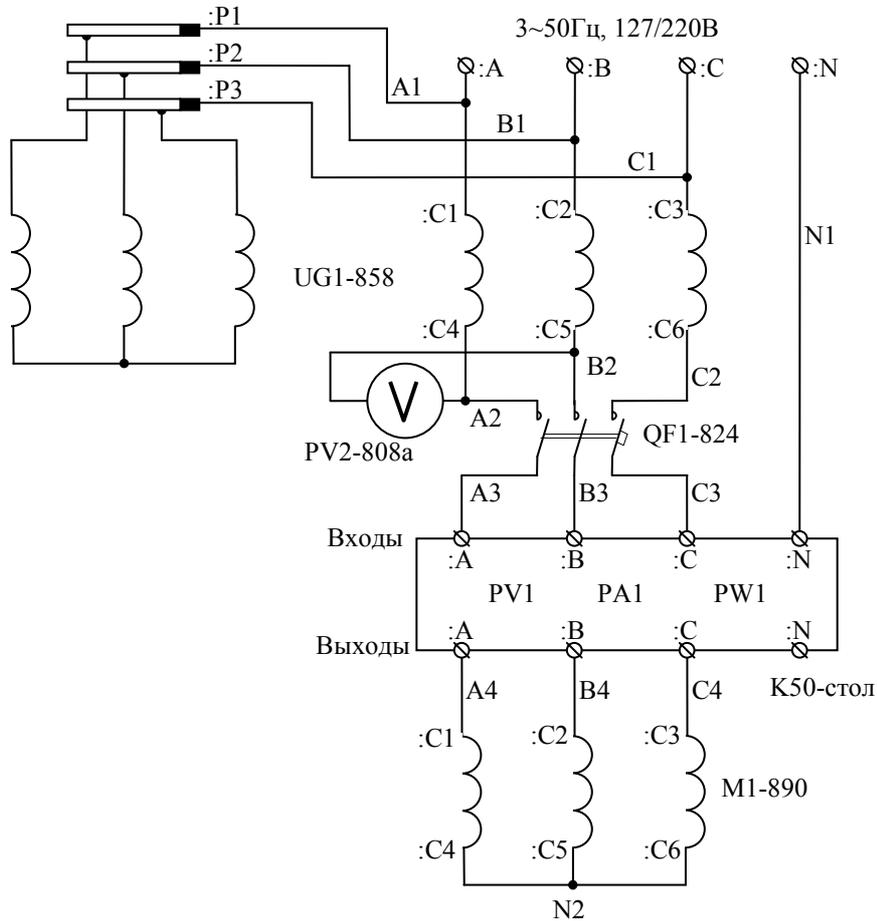


Рис. 1. Принципиальная схема установки для проведения опыта холостого хода

Таблица 1

Параметры ↓	Опытные данные						
UA, В	30	20	00	80	60	40	20
UB, В							
UC, В							

IA, A							
IB, A							
IC, A							
PA, Вт							
PB, Вт							
PC, Вт							
Расчётные данные							
$R1\ 75=310R1/(235+t)$							
$UX=(UA+UB+UC)/3, В$							
$IX=(IA+IB+IC)/3, А$							
$PX=(PA+PB+PC), Вт$							
$\cos\varphi_x = PX/(UX*IX)$							
$\Delta P\ \text{Э1}=3IX^2 * R1\ 75, Вт$							
$\Delta PМ+\Delta PМEX=(PX-\Delta P\ \text{Э1}), Вт$							
U2, В2							
Последующие параметры рассчитываются после построения зависимости $(\Delta PМ+\Delta PМEX)=f(U2)$ по пунктам							
$\Delta PМEX, Вт$							
$\Delta PМ, Вт$							

Примечание: t – температура, при которой производилось измерение сопротивления обмотки электродвигателя R1. Для используемого в работе электродвигателя оно равно 1,1 Ома.

4. Записываем и выполняем действия по запуску электродвигателя
 - Отключаем автоматический выключатель QF1;
 - Устанавливаем предел измерения напряжения измерительного комплекта К50 300 В, а предел измерения тока 25 А;
 - Подаём напряжение на вход индукционного регулятора UG1;
 - Устанавливаем напряжение на выходе UG1 220 В;
 - Замыкаем QF1.
 - Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
 - Устанавливаем соответствующие измеряемым току и напряжению пределы измерения этих величин
 - Устанавливаем заданное в таблице напряжение.
 - Записываем показания приборов.
5. Осуществляет расчёт: сопротивления фазной обмотки электродвигателя R1 75, мощность холостого хода PX, средние по фазам ток холостого хода IX и напряжение UX, коэффициент мощности при холостом ходе $\cos\varphi_x$, электрические потери в статорной обмотке $\Delta P\ \text{Э1}$, сумму магнитных и механических потерь $\Delta PМ+\Delta PМEX$, квадрат напряжения холостого хода UX2.
6. Строим график $(\Delta PМ+\Delta PМEX)=f(UX2)$ (на доске и в тетради).
Продолжаем полученную прямую до пересечения с осью ординат и получаем значение механических потерь, не зависящих от напряжения $\Delta PМEX$.

- Определяем магнитные потери при заданном напряжении ΔPM .
7. Строим предусмотренные заданием графики
 8. Провести опыт короткого замыкания и построить зависимости $IK=f(U)$; $PK=f(U)$; $\cos\varphi_k=f(U)$.
 9. Корректируем схему экспериментальной установки

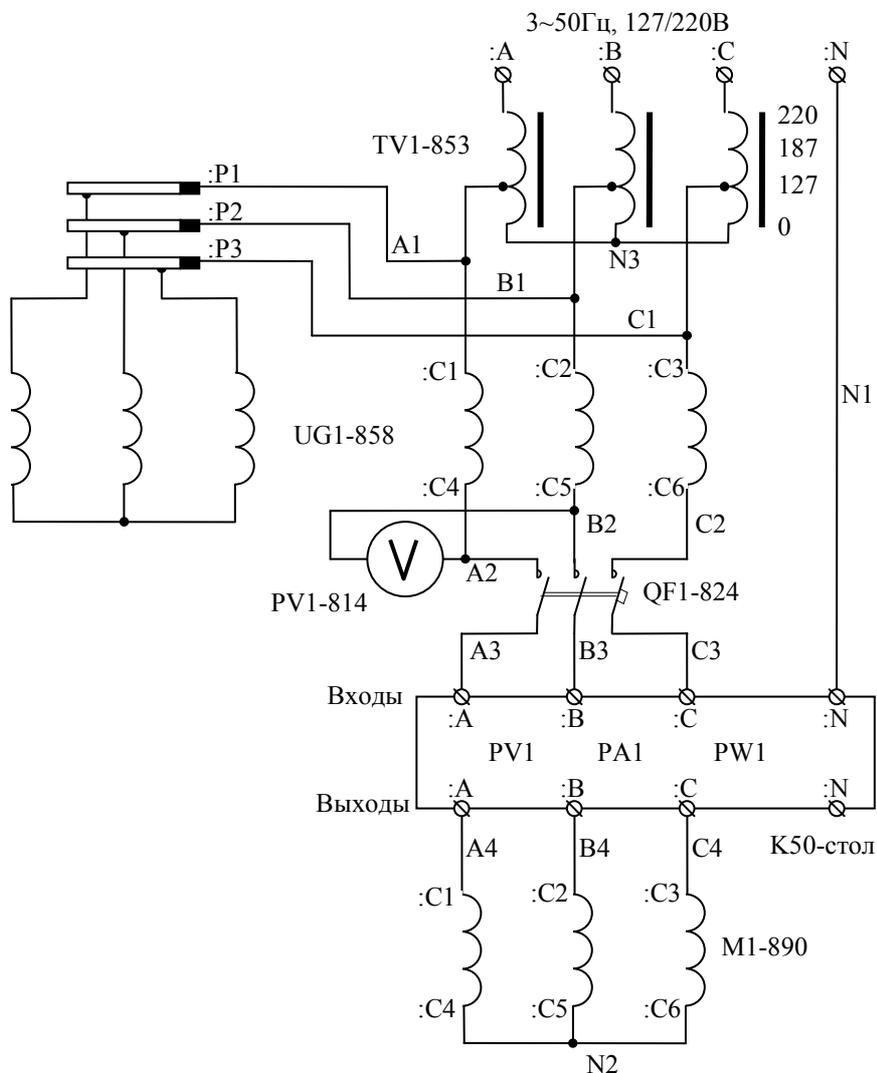


Рис. 4. Принципиальная схема установки для проведения опыта короткого замыкания.

Таблица 2

IA, A	,3	,5	,6	,0	,5	,0	,5	,0	,5	,0
UA, В										
PA, Вт										
IB, A										
UB, В										
PB, Вт										
IC, A										
UC, В										
PC, Вт										
UK=(UA+UB+										

- Регулировочные $I=f(I_B)$ при $\cos\varphi=1$ и $\cos\varphi=0,7$;
- Трёхфазного короткого замыкания $I^{(3)}_{кз}=f(I_B)$.

2.13.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

2.13.4 Описание (ход) работы:

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде

1	G	Синхронный генератор: тип ЕС52-4М101 с самовозбуждением $I_{в.ном}=4,3A$, 1500 об/мин, 5 кВт, $I_{\Phi.ном}=9A$; $I_{Л.ном}=15,7A$; $U_{\Phi.ном}=133 В$; $U_{Л.ном}=230 В$; 106 кг (При $U_B=17,6В$ и $I_B=9A$; $U_{\Phi}=162 В$)		
---	---	---	--	--

2. Собираем схему экспериментальной установки

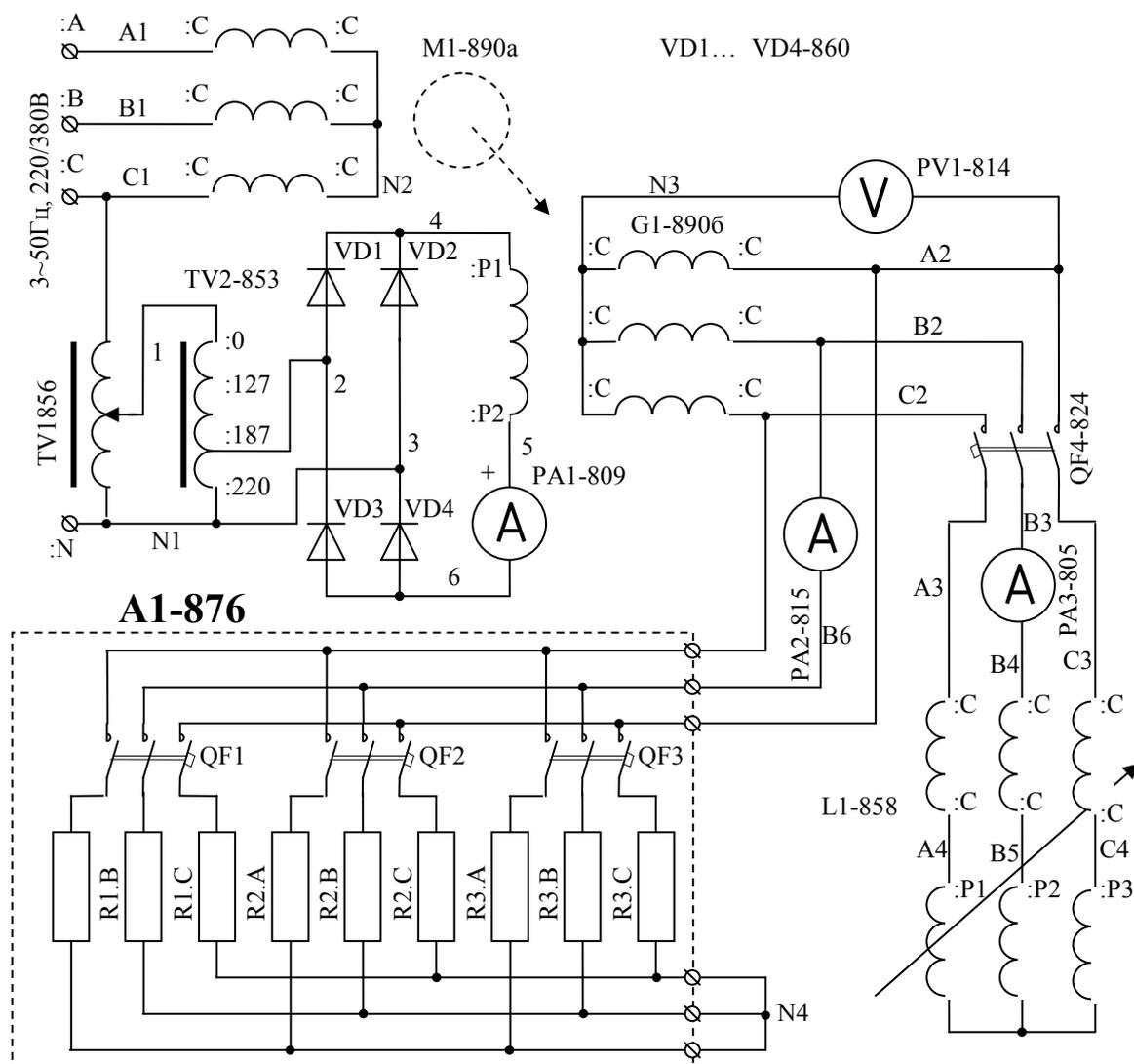


Рис. 1. Принципиальная схема испытания синхронного генератора.

3. Снимаем характеристику холостого хода
4. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений для снятия характеристики холостого хода

Таблица 1

	Положение выключателя QF1...QF4	Активный ток IA=IP A2, А	Реактивный ток IP=IP A3, А	Ток возбуждения IB=IP A1, А	Фазное напряжение UФ=UPV1, В	Полный ток нагрузки IN=1.41IA, А	UФ*=UФ/UФ.Н ОМ	I*B= IB/IBO	I*N= IN/INOM
Характеристика холостого хода при увеличении тока возбуждения									
	0	0	0	1		0			0
/0/0/0	0	0	0	2		0			0
/0/0/0	0	0	0	3		0			0
/0/0/0	0	0	0	4		0			0
/0/0/0	0	0	0	5		0			0
/0/0/0	0	0	0	6		0			0
/0/0/0	0	0	0	7		0			0
/0/0/0	0	0	0	8		0			0
Характеристика холостого хода при снижении тока возбуждения									
	0	0	0	8		0			0
/0/0/0	0	0	0	7		0			0
/0/0/0	0	0	0	6		0			0
/0/0/0	0	0	0	5		0			0
/0/0/0	0	0	0	4		0			0
/0/0/0	0	0	0	3		0			0
/0/0/0	0	0	0	2		0			0
/0/0/0	0	0	0	1		0			0

5. Запускаем установку в следующем порядке:

- Работу выполняет назначенный исполнитель
- Устанавливаем автотрансформатор в нулевое положение;

- Отключаем QF1 по QF4;
 - Подаём напряжение;
 - Передаём установку для снятия характеристики.
 - Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики
 - Работу выполняют ответственные за каждую точку характеристики
 - Устанавливаем заданные в таблице независимые параметры (величину тока возбуждения подводим к требуемой обязательно снизу для восходящей ветви и сверху - для нисходящей)
 - Снимаем и заносим в таблицу зависимые параметры
 - Определяем расчётные данные
6. Строим восходящую и нисходящую ветви характеристики холостого хода в относительных единицах

7. Снимаем индукционную нагрузочную характеристику
 8. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 2

Положение выключателей QF1... QF4	Активный ток IA=IPA2, A	Реактивный ток IP=IPA3, A	Ток возбуждения IB=IPA1, A	Фазное напряжение UФ=UPV1, В	Полный ток нагрузки IH=IP, A	UФ*=UФ/UФ.Н OM	I*B= IB/IBo	I*N= IH/IHoM
0/0/0/1	0	0	0,0	0	0	0		
0/0/0/1	0	0	0,5	0	0	0		
0/0/0/1	0	0	0,0	0	0	0		
0/0/0/1	0	0	0,4	0	0	0		

9. Запускаем установку в порядке, указанном выше
 10. Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики
11. Работу выполняют ответственные за каждую точку характеристики
 12. Устанавливаем заданные в таблице независимые параметры
 13. Снимаем и заносим в таблицу зависимые параметры

14. Определяем расчётные данные
15. Строим характеристику в относительных единицах
Характеристика строится на том же графике, что и характеристика холостого хода
16. Снимаем внешние характеристики при активной и активно-индуктивной нагрузках
17. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений для снятия характеристик

Таблица 3

Положение выключателей QF1...QF4	Активный ток $I_A=I_{PA2}, A$	Реактивный ток $I_P=I_{PA3}, A$	Ток возбуждения $I_B=I_{PA1}, A$	Фазное напряжение $U_{\Phi}=U_{PV1}, B$	Полный ток нагрузки I_N, A	$U_{\Phi}^*=U_{\Phi}/U_{\Phi.N}$ OM	$I^*B= I_B/I_{B0}$	$I^*N= I_N/I_{N0M}$
/0/0/0			,3					
/1/0/0			,3					
/0/0/0			,3					
/0/1/0			,3					
/1/0/0			,3					
/1/1/0			,3					
/0/1/0			,3					
/1/1/0			,3					
/0/1/0			,4					
/1/1/0			,4					
/1/0/0			,4					
/0/1/0			,4					
/1/0/0			,4					
/0/0/0			,4					
/0/0/0			,4					
IA=IP								
/0/0/0			,3					

0								
/1/0/1			,3					
1								
/0/0/1			,3					
0								
/0/1/1			,3					
1								
/1/0/1			,3					
0								
/1/1/1			,3					

Примечание: $I_H = \sqrt{I_A^2 + I_P^2}$

18. Запускаем установку в порядке, указанном выше
19. Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики
20. Работу выполняют ответственные за каждую точку характеристики
21. Устанавливаем заданные в таблице независимые параметры
22. Снимаем и заносим в таблицу зависимые параметры
23. Определяем расчётные данные
24. Строим внешние характеристики в относительных единицах
25. Снимаем регулировочную характеристику
26. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений для снятия характеристики

Таблица 4

	Положение выключателей QF1...QF4	Активный ток IA=IPA2, А	Реактивный ток IP=IPA3, А	Ток возб-я IB=IPA1, А	Фазное напряжение UФ=UPV1, В	Полный ток нагрузки IH, А	UФ*=UФ/UФ.Н	I*B= IB/IBO	I*N= IH/IНОМ
Регулировочная характеристика при чисто активной нагрузке									
	0	0	0		33	1			
	/0/0/0				33	1			
	1		0		33	1			
	/0/0/0				33	1			
	0		0		33	1			
	/0/1/0				33	1			
	1		0		33	1			
	/1/0/0				33	1			
	0		0		33	1			
	/1/1/0				33	1			
	1		0		33	1			
	/0/1/0				33	1			
Регулировочная характеристика при активно-индуктивной нагрузке (Cosφ=0.7)									

Регулируя индуктивность реактивной катушки, устанавливаются равные токи								
		IA=IP						
	0	0	0		1			
	/0/0/0				33			
	0				1			
	/1/0/1				33			
	1				1			
	/0/0/1				33			
	0				1			
	/0/1/1				33			
	1				1			
	/1/0/1				33			
	0				1			
	/1/1/1				33			
	1				1			
	/0/1/1				33			

27. Запускаем установку в порядке, указанном выше

28. Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики

- Устанавливаем заданные положения выключателей QF1...QF4
- Устанавливаем заданное в таблице напряжение
- Регулируя индуктивность, добиваемся равенства активного и реактивного

ТОКОВ

- Снимаем и заносим в таблицу установленные параметры
- Определяем расчётные данные
- Строим характеристики в относительных единицах

29. Снимаем характеристику короткого замыкания

30. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 5

Положение выключателей QF1...QF4	Активный ток IA=IPA2, A	Реактивный ток IP=IPA3, A	Ток возб-я IB=IPA1, A	Фазное напряжение UФ=UPV1, В	Полный ток нагрузки IH, A	UФ*=UФ/UФ.Н Ом	I*B= IB/IBO	I*N= IH/ IHOM
0	0	2		0		0		
/0/0/1								
0	0	3		0		0		
/0/0/1								
0	0	4		0		0		
/0/0/1								
0	0	5		0		0		
/0/0/1								
0	0	6		0		0		
/0/0/1								

0	0	7	0	0		
/0/0/1						
0	0	8	0	0		
/0/0/1						
0	0	9	0	0		
/0/0/1						
0	0	1	0	0		
/0/0/1	0					

31. Закорачиваем выводы реактивной катушки С1, С2, С3
 32. Запускаем установку в порядке, указанном выше
 33. Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики
 34. Работу выполняют ответственные за каждую точку характеристики
 35. Устанавливаем заданный в таблице ток трёхфазного короткого (это реактивный ток)
 36. Снимаем и заносим в таблицу ток возбуждения, при котором этот ток устанавливается
 37. Определяем расчётные данные
 38. Строим характеристику в относительных единицах
 39. Определяем отношение короткого замыкания
- $OK3 = I(3)_k (I_b^* = 1) / I_H =$

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

3.1 Практическое занятие №1 (2 часа).

Тема: «Решение задач по основам теории электротехники»

3.1.1 Задание для работы:

Задача 1.1.

Определить эквивалентное сопротивление цепи между зажимами a и b при разомкнутом и замкнутом ключе K методом эквивалентных преобразований (рис. 1.1, a).

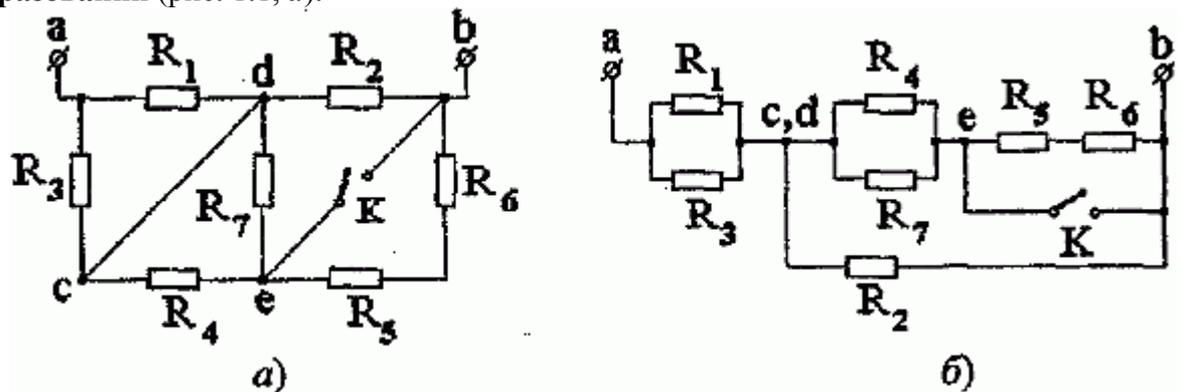


Рис. 1.1

Задача 1.2.

Определить методом эквивалентных преобразований сопротивление цепи между зажимами a и b при разомкнутом и замкнутом ключе K для схемы, изображенной на рис. 1.2.

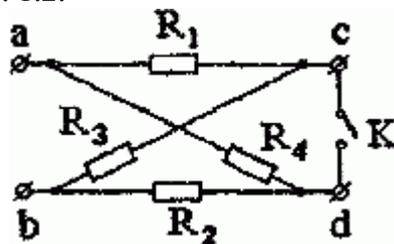


Рис. 1.2

Задача 1.3.

Найти сопротивление между зажимами a и b для схемы, изображенной на рис. 1.4.

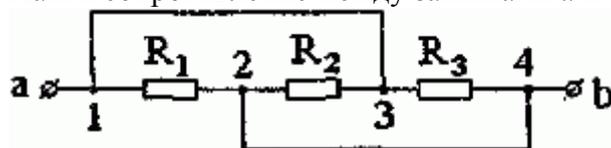


Рис. 1.4

Задача 1.4.

Найти сопротивление R_{13} , R_{14} , R_{17} между различными парами вершин куба, ребра которого имеют заданное сопротивление R (рис. 1.6).

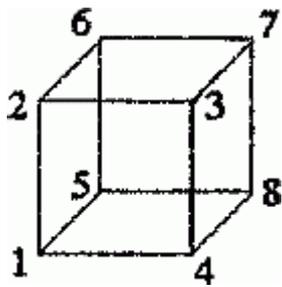


Рис. 1.6

Задача 1.5.

Определить методом эквивалентных преобразований токи в ветвях цепи (рис. 1.10, а) и показание вольтметра, включенного между точками c и d , считая, что его сопротивление во много раз превышает сопротивление каждого из элементов цепи.

Чему равно показание амперметра, включенного между точками c и d , сопротивление которого считать равным нулю?

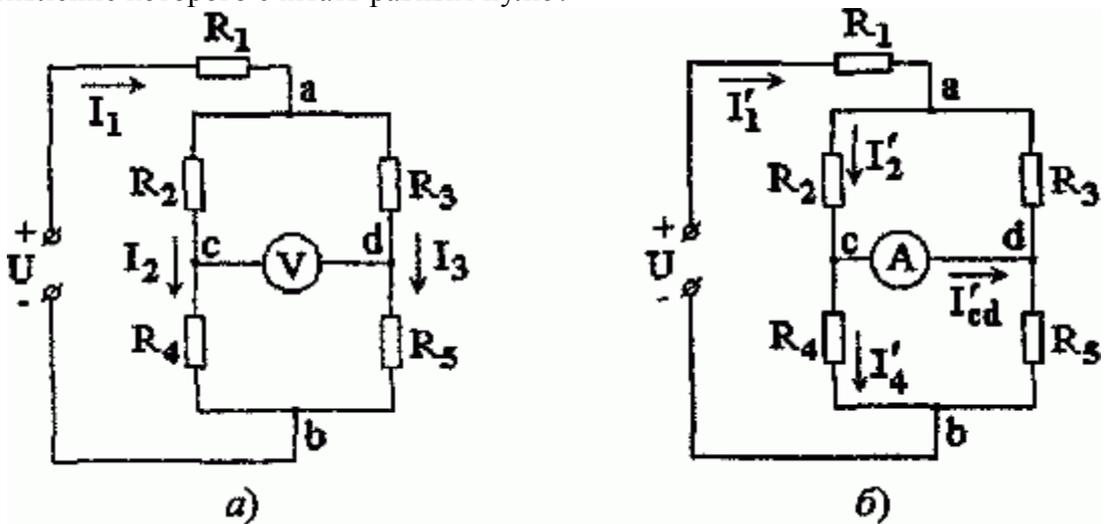


Рис. 1.10

Сопротивления элементов цепи: $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = R_3 = R_5 = 25$ Ом и $R_4 = 50$ Ом, а приложенное к ней напряжение $U = 120$ В.

Задача 1.6.

В схеме рис. 1.11 заданы сопротивления приемников, величины ЭДС и источника тока отдельных ветвей. Рассчитать неизвестные токи, ЭДС E_2 и сопротивление R_5 , пользуясь законами Кирхгофа.

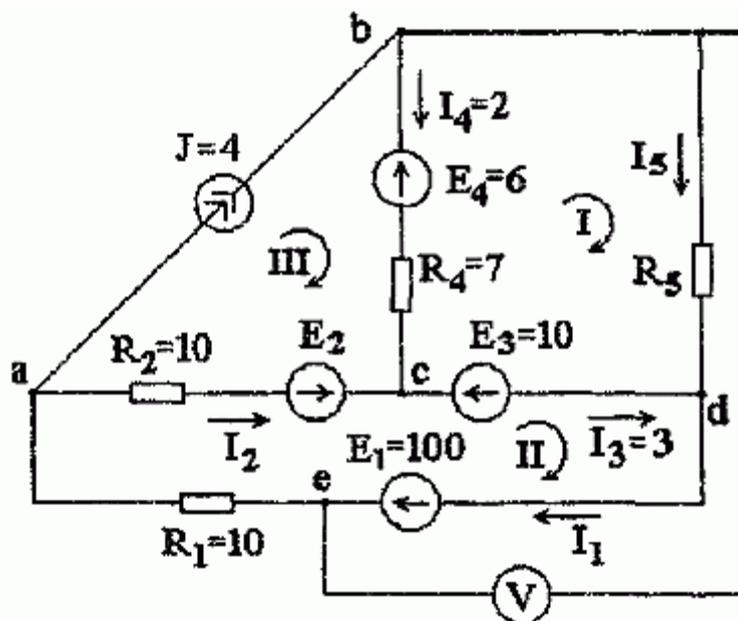


Рис. 1.11

Правильность решения проверить по балансу мощностей. Для наружного контура построить потенциальную диаграмму и определить показание вольтметра.

3.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

Решение задач занимают важное место в курсе электротехники, так как в процессе их решения проверяется степень усвоения теоретического материала, и приобретаются навыки, необходимые для приложения теории к практике.

На примерах решения задач по электротехнике представлены основные разделы современной теории электрических машин, составляющие предмет теоретических основ электротехники (ТОЭ).

Объем теоретического материала курса электротехники, представленный в виде кратких физических схем и подробно изложенных алгоритмов, позволяет непосредственно перейти к решению как типовых, так и задач, выходящих за рамки курса электротехники.

Реализуется естественный принцип выборочного прочтения и быстрого нахождения нужной информации.

Решение задач по электротехнике делится на разделы, каждый из которых содержит краткое описание *методов* и *алгоритмов* решения задач по электротехнике.

Общие рекомендации при решении задач ТОЭ:

- заданные условия задачи должны быть тщательно проанализированы. Для этого их необходимо прочесть, как минимум, дважды: сначала бегло, схватывая смысл задания в целом, а затем медленно, стараясь подметить мелкие и, на первый взгляд, незначительные детали;

- не стоит решать задачу по схеме, изображенной в расчетной работе, билете. Схему следует перерисовать в привычном для себя виде;

- краткие условия задачи желательно приводить справа от расчетной схемы. На схеме должны быть обозначены все необходимые токи и напряжения, причем, желательно, все величины, относящиеся к одной ветви, обозначать одинаковым индексом: E_1 , U_1 , I_1 , R_1 . В расчетах не должно быть величин, которые не были бы обозначены на схеме;

- полученный результат (результаты) расчета должен быть проверен, будь это баланс мощностей, *векторная диаграмма*, отдельное уравнение по одному из *законов Кирхгофа* или просто логическое рассуждение.

3.1.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.2 Практическое занятие №2 (2 часа).

Тема: «Решение задач по основам теории машин постоянного тока»

3.2.1 Задание для работы:

Задача 2.1.

На рис. 2.2 изображен разрез трех катушек, по которым проходят токи $I_1 = 8$ А, $I_2 = 10$ А и $I_3 = 5$ А.

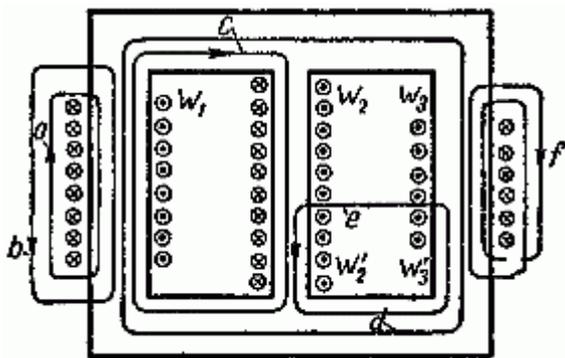


Рис. 2.2

Катушки размещены на стальном сердечнике. Первая катушка (левая) w_1 имеет 8 витков, вторая (средняя) w_2 – 10 витков и третья (правая) w_3 – 6 витков. Определить полную магнитодвижущую силу (м. д. с.) по замкнутым контурам a, b, c, d, e, f, показанным на рис. 2.2. Контур e охватывает катушки w'_2 с 4 витками и w'_3 с 2 витками.

Изменится ли результат решения задачи, если при тех же данных катушки разместить на сердечнике из другого магнитного материала?

Задача 2.2.

Определить магнитодвижущую силу (прямая задача расчета одноконтурной магнитной цепи), необходимую для получения магнитного потока в $5,9 \cdot 10^{-4}$ Вб в кольцеобразном сердечнике, сечением $S = 5$ см². Длина средней линии магнитной индукции $l = 25$ см.

Определить H (напряженность магнитного поля в сердечнике) и $\mu_{рп}$ (относительная магнитная проницаемость материала сердечника). Материал сердечника – слаболегированная электротехническая листовая сталь Э11.

Задача 2.3.

На рис. 2.3 изображен электромагнит, сердечник которого изготовлен из слаболегированной листовой электротехнической стали Э11, а якорь – из литой стали.

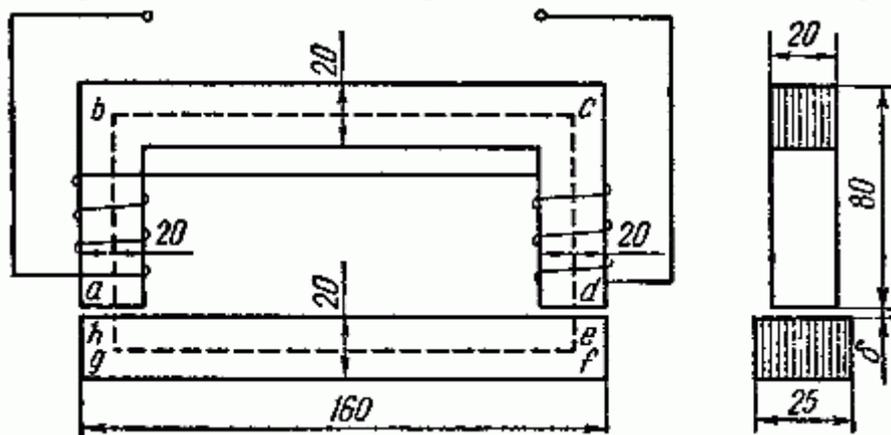


Рис. 2.3

Какой ток должен быть пропущен через обмотку электромагнита (прямая задача расчета одноконтурной магнитной цепи), состоящую из $w = 500$ витков, для того, чтобы в якоре была создана магнитная индукция в $0,84 \text{ Вб/м}^2$. Размеры на рис. 2.3 даны в миллиметрах. Длина воздушного зазора $\delta\delta = 1 \text{ мм}$. Площадь сечения воздушного зазора считать равной площади сечения сердечника (пренебрегаем потоком рассеяния). Чему равна статическая индуктивность электромагнита?

Задача 2.4.

Найти магнитную индукцию в якоре электромагнита (обратная задача расчета одноконтурной магнитной цепи), изображенном на рис. 2.3, если на электромагнит намотано $w = 250$ витков, по которым проходит ток $I = 4,4 \text{ А}$. Сердечник изготовлен из листовой электротехнической стали Э11, а якорь – из литой стали. Размеры сердечника и якоря те же, что и в предыдущей задаче. Длина воздушного зазора $0,5 \text{ мм}$. Площадь сечения воздушного зазора считать равной площади сердечника.

Задача 2.5.

Найти магнитную индукцию в воздушном зазоре тороида (обратная задача расчета одноконтурной магнитной цепи), изготовленного из литой стали (рис. 2.6), если на тороид намотано $w = 400$ витков, по которым проходит ток $I = 4 \text{ А}$. Воздушный зазор = 2 мм . Размеры тороида на рисунке даны в мм.

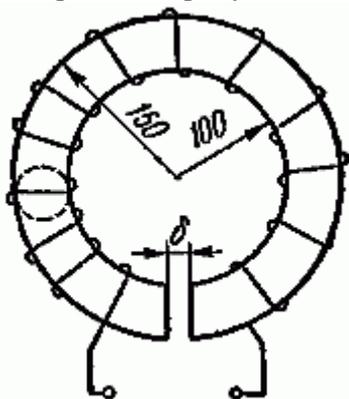


Рис. 2.6

Решение

Задача 2.6.

Определить все магнитные потоки и ток, проходящий через катушку, расположенную на среднем стержне сердечника, если в левом стержне имеется магнитная индукция в $0,95 \text{ Вб/м}^2$. Размеры магнитопровода на рис. 2.8 даны в миллиметрах. Материал сердечника – листовая сталь Э11. Число витков катушки $w = 500$.

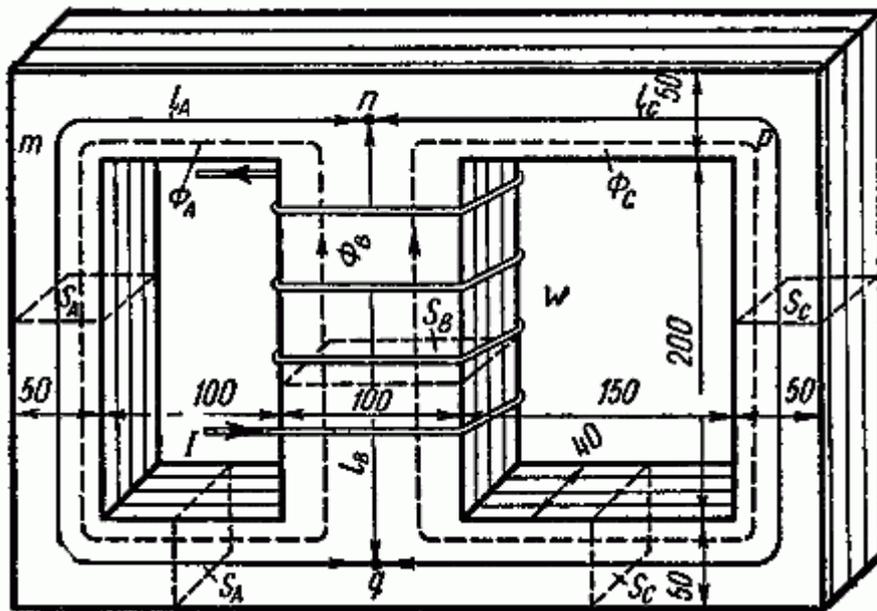


Рис. 2.8

Задача 2.7.

Магнитная цепь изготовлена из листовой электротехнической стали Э11. На средний стержень сердечника намотана катушка, содержащая $w = 930$ витков, по которым проходит ток $I = 1$ А (рис. 2.8). На всем участке А сечение магнитной цепи считать $S_A = 20$ см², на участке В – $S_B = 40$ см², на участке С – $S_C = 20$ см². Длины средних линий магнитной индукции каждого из участков считать равными: $l_A = 55$ см, $l_B = 25$ см, $l_C = 80$ см.

Найти значения магнитной индукции во всех стержнях.

Задача 2.8.

Сердечник собран из листов электротехнической стали марки Э11. Форма и размеры сердечника (в мм) указаны на рис. 2.10.

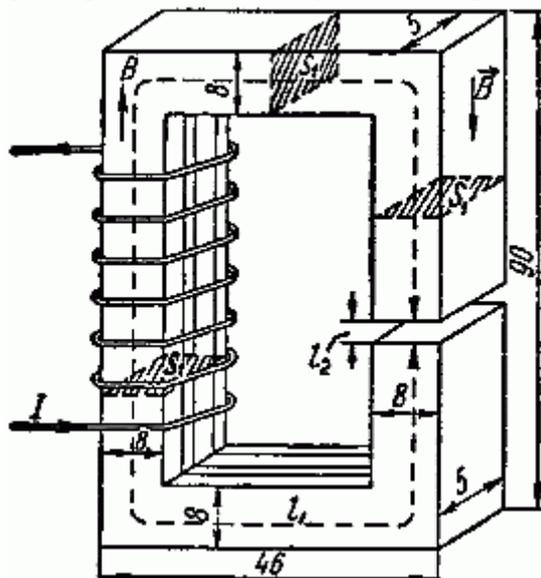


Рис. 2.10

Обмотка имеет $w = 400$ витков, по которым проходит ток $I = 3,5$ А. Длина воздушного зазора составляет 1 мм. Определить магнитный поток в сердечнике. При расчете следует считать, что сечение воздушного зазора равно сечению сердечника.

Задачу решить следующими аналитическими методами: а) линейной аппроксимации, б) кусочно-линейной аппроксимации, в) дробно-линейной аппроксимации.

Результаты, полученные для каждого из случаев, сравнить с теми, какие получаются при решении задачи обычным способом.

3.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

Расчет магнитных цепей при постоянных токах

Основанием к расчету магнитных цепей служат: первый закон Кирхгофа для магнитных цепей и закон полного тока – второй закон Кирхгофа для магнитных цепей.

Первый закон Кирхгофа для магнитных цепей гласит: алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитной цепи равна нулю.

Закон полного тока применяется к замкнутому контуру, образованному средними магнитными линиями магнитной цепи и имеет вид:

$$\int \vec{H} \cdot d\vec{l} \rightarrow = \sum I \cdot w, \int \vec{H} \rightarrow \cdot d\vec{l} \rightarrow = \sum I \cdot w,$$

где

$$\int \vec{H} \cdot d\vec{l} \rightarrow = \sum H \cdot l \quad \int \vec{H} \rightarrow \cdot d\vec{l} \rightarrow = \sum H \cdot l -$$

падение магнитного напряжения $U_M = H \cdot l$ в контуре;

$$F = \sum I \cdot w \quad F = \sum I \cdot w - \text{магнитодвижущая сила контура (м. д. с.).}$$

Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей сформулируем следующим образом: алгебраическая сумма магнитных напряжений $U_M = H \cdot l$ в замкнутом контуре магнитной цепи ($\sum U_M = \sum H \cdot l$) ($\sum U_M = \sum H \cdot l$) равна алгебраической сумме магнитодвижущих сил $F = I \cdot w$ в том же контуре ($\sum F = \sum I \cdot w$) ($\sum F = \sum I \cdot w$):

$$\sum U_M = \sum F \quad \sum U_M = \sum F$$

или

$$\sum H \cdot l = \sum I \cdot w \quad \sum H \cdot l = \sum I \cdot w.$$

Задачи на расчет магнитной цепи могут быть двух видов: прямая задача на расчет магнитной цепи – когда задан поток и требуется рассчитать магнитодвижущую силу (м. д. с.) и обратная задача на расчет магнитной цепи – когда по заданной м. д. с. требуется рассчитать магнитный поток.

В обоих случаях должны быть известны геометрические размеры магнитной цепи и заданы кривые намагничивания ее материалов.

Алгоритм прямой задачи расчета неразветвленной магнитной цепи

Дана конфигурация и геометрические размеры неразветвленной магнитной цепи, кривая (или кривые) намагничивания магнитного материала и магнитный поток или индукция магнитного поля в каком-либо сечении. Требуется найти магнитодвижущую силу, ток или число витков намагничивающей обмотки.

Расчет проводим в соответствии с алгоритмом:

1. Разбиваем магнитную цепь на **однородные** (из одного магнитного материала) **участки постоянного сечения** и определяем длины l_k и площади поперечного сечения S_k участков. Длины участков (в метрах) берем по средней силовой линии.

2. Исходя из постоянства потока вдоль всей неразветвленной магнитной цепи, по заданному магнитному потоку Φ и сечениям S_k участков находим магнитные индукции на каждом участке:

$$B_k = \Phi S_k \quad B_k = \Phi S_k.$$

Если задана магнитная индукция на каком-либо участке магнитной цепи, то магнитный поток вдоль всей неразветвленной цепи

$$\Phi = B_k \cdot S_k.$$

3. По найденным магнитным индукциям B_k участков цепи и кривой намагничивания материала k -го участка цепи (например, рис. 2.1, табл. 2.1) определяем напряженности поля H_k на каждом участке магнитной цепи.

Напряженность поля в воздушном зазоре находим по формуле

$$H_{\text{возд}} = H_{\text{возд}0} = \frac{B_{\text{возд}}}{\mu_0} = \frac{B_{\text{возд}}}{4\pi \cdot 10^{-7}}. H_{\text{возд}} = H_{\text{возд}0} = \frac{B_{\text{возд}}}{4\pi \cdot 10^{-7}}.$$

4. Подсчитаем сумму падений магнитных напряжений $U_{\text{Мк}} = H_{\text{к}} \cdot l_{\text{к}}$ вдоль всей магнитной цепи

$$\sum U_{\text{Мк}} = \sum H_{\text{к}} \cdot l_{\text{к}} \quad \sum U_{\text{Мк}} = \sum H_{\text{к}} \cdot l_{\text{к}}$$

и на основании второго закона Кирхгофа для магнитной цепи приравняем сумме магнитодвижущих сил $F_{\text{к}} = I_{\text{к}} \cdot w_{\text{к}}$ вдоль всей магнитной цепи:

$$\sum H_{\text{к}} \cdot l_{\text{к}} = \sum I_{\text{к}} \cdot w_{\text{к}}. \quad \sum H_{\text{к}} \cdot l_{\text{к}} = \sum I_{\text{к}} \cdot w_{\text{к}}.$$

Основным допущением при расчете является то, что магнитный поток вдоль всей неразветвленной магнитной цепи полагаем неизменным. В действительности не большая часть потока всегда замыкается, минуя основной путь. Этот поток называют потоком рассеяния.

Единицы измерения магнитных величин

B – индукция магнитного поля, Тл (Тесла);

H – напряженность магнитного поля, А/м (Ампер/метр);

Φ – поток индукции магнитного поля, Вб (Вебер);

$F = I \cdot w$ – магнитодвижущая сила (м. д. с.), А (Ампер);

$U_{\text{М}} = H \cdot l$ – магнитное напряжение, А (Ампер!).

3.2.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.3 Практическое занятие №3 (2 часа).

Тема: «Построение механической х-ки ДПТ»

3.3.1 Задание для работы:

Научиться строить механическую характеристику ДПТ.

3.3.2 Краткое описание проводимого занятия:

Для получения механической характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением необходимо найти зависимость угловой скорости вращения от момента двигателя. Это возможно, если учесть, что момент, развиваемый двигателем, связан с током якоря и магнитным потоком зависимостью

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I, \quad (1.1)$$

где C_M – коэффициент машины;

Φ – магнитный поток машины;

I – сила тока в якоре.

Подставив значение тока I , найденное из (1.1), в выражение электромеханической характеристики

$$\omega = \frac{U - I \cdot R}{C_M \cdot \Phi}, \quad (1.2)$$

Получим выражение для механической характеристики

$$\omega = \frac{U}{C_M \cdot \Phi} - \frac{M \cdot (R_a + R_{\text{як}})}{C_M \cdot C_M \cdot \Phi^2}, \quad (1.3)$$

где U – напряжение на зажимах электродвигателя, В;

ω – угловая скорость вала двигателя, с-1;

R_a - сопротивление обмотки якоря, Ом;
 Φ - магнитный поток машины, Вб;
 $R_{доб}$ - добавочное сопротивление, Ом;
 C_e – конструктивная постоянная двигателя.

Для построения механических характеристик (естественной и искусственных) двигателя параллельного возбуждения достаточно знать лишь две её точки, поскольку все механические характеристики теоретически представляют собой прямые линии. Эти две точки могут быть любыми. Однако построение естественной механической характеристики удобно производить по точкам, одна из которых соответствует номинальному моменту двигателя и номинальной скорости, а другая – скорости идеального холостого хода. Естественная характеристика получается при номинальных параметрах: номинальном напряжении, номинальном токе возбуждения, отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря.

Координаты точек определяются следующим образом:

$$1. \quad M_H = \frac{P_H}{\omega_H}; \quad \omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = 0,105 \cdot n_H;$$

$$2. \quad M = 0; \quad \omega_0 = \omega_H \frac{U_H}{U_H - I_H \cdot R_a}.$$

Так как в каталогах внутреннее сопротивление якоря обычно не указывается, то его ориентировочно определяют, приняв, что половина всех потерь в двигателе при номинальной нагрузке связана с потерями в меди якоря:

$$R_a = 0,5 \cdot (1 - \eta_H) \cdot \frac{U_H}{I_H} = 0,5 \cdot (1 - \eta_H) \cdot R_H \quad \text{Ом, (1.4)}$$

где U_H – номинальное напряжение, В;
 I_H – номинальный ток, А;
 η_H – номинальный КПД двигателя;
 R_H – номинальное сопротивление.

При изменении одного из параметров уравнения механической характеристики получают искусственные характеристики. Реостатные характеристики также строятся по точке холостого хода и точке, в которой момент равен номинальному, а угловая скорость, соответствующая номинальному моменту, определяется по соотношению

$$\omega_{\text{н.м.т.}} = \omega_0 \cdot \frac{U_H - I_n \cdot (R_a + R_{доб})}{U_H - I_n \cdot R_a} \quad (1.5)$$

Пример 1

Рассчитать и построить естественную и искусственную механические характеристики и определить их жесткость для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения по следующим справочным данным:

Марка двигателя-П11; $R_H=0,7\text{кВт}=700\text{Вт}$; $I_H=4,3\text{А}$; $\eta_H=0,735$; $U_H=220\text{В}$; $n_H=3000$ об/мин; $R_{доб}=10$ Ом.

Решение

Естественная механическая характеристика ДПТ параллельного возбуждения может быть построена по двум характерным точкам:

- 1) $\omega = \omega_H$; $M = M_H$;
- 2) $\omega = \omega_0$; $M = 0$.

Номинальная угловая скорость:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = 0,105 \cdot n_H = 0,105 \cdot 3000 = 315 \text{ c}^{-1}.$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{700}{315} = 2,22 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

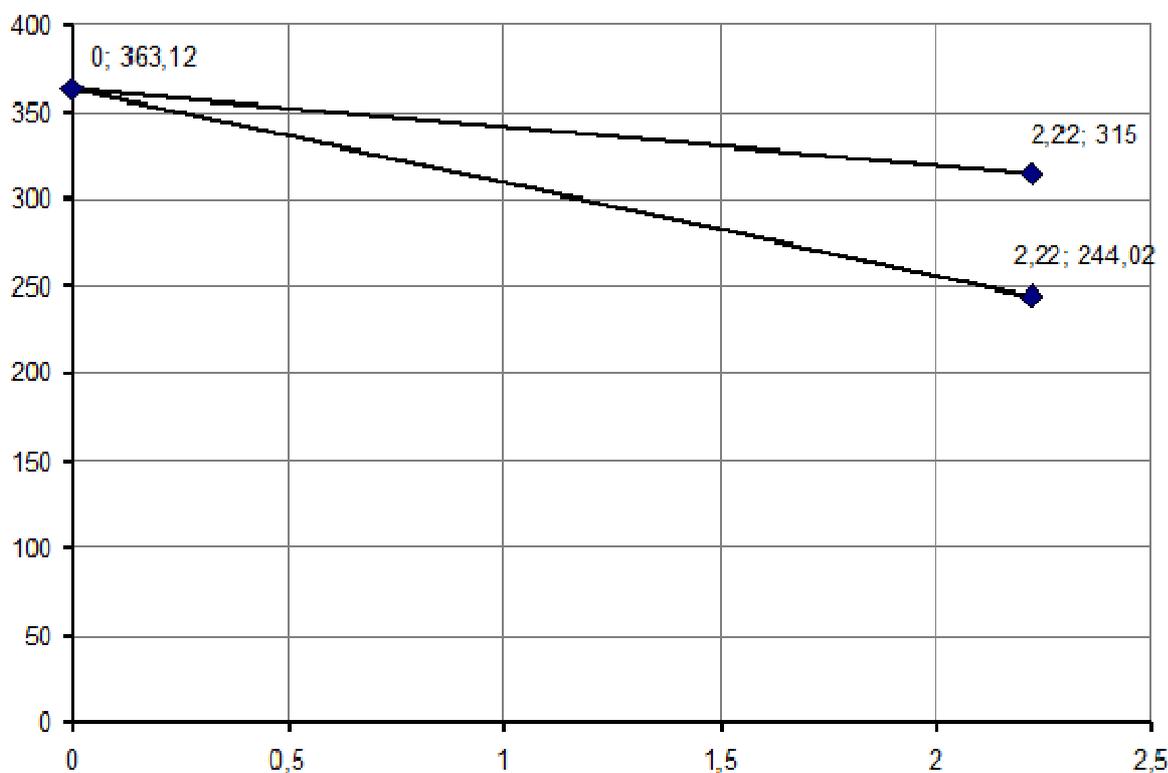
Определим сопротивление якоря:

$$R_a = 0,5 \cdot (1 - \eta_H) \cdot \frac{U_H}{I_H} = 0,5 \cdot (1 - 0,735) \cdot \frac{220}{4,3} = 6,78 \text{ Ом}$$

Скорость идеального холостого хода может быть определена по номинальным параметрам:

$$\omega_0 = \omega_H \frac{U_H}{U_H - I_H \cdot R_a} = 315 \cdot \frac{220}{220 - 4,3 \cdot 6,78} = 363,12 \text{ c}^{-1}.$$

Следовательно, чем больше $R_{доб}$, тем меньше жесткость (β) механической характеристики.



3.3.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.4 Практическое занятие №4 (2 часа).

Тема: «Энергетическая диаграмма ДПТ»

3.4.1 Задание для работы:

Научиться строить энергетическую диаграмму двигателя постоянного тока. Оценить ее назначение.

3.4.2 Краткое описание проводимого занятия:

Все преобразования энергии и потери, которые происходят в асинхронном двигателе, можно иллюстрировать при посредстве так называемой "энергетической" диаграммы.

На рис. 1 показана такая диаграмма в форме "потока энергии", который течет слева направо. Как видно из рис. 1, этот "поток" состоит из ряда "рукавов". Притекающая к статору асинхронного двигателя из сети электрическая энергия P_1 изображена на рис. 1 в виде потока наибольшей ширины. По мере течения направо главное "русло" этого потока делается все уже и уже.

"Рукав" потока V_{Fe} изображает потери железа в двигателе (токи Фуко и гистерезис).

Рукав потока $V_1 = m_1 I_1^2 \cdot r_1$ изображает потери меди в статоре.

Потери меди в роторе $m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2$ изображены рукавом потока V_2 и, наконец, рукав потока V_p изображает механические потери.

Таким образом притекающая к статору мощность P_1 оказывается больше тормозной мощности двигателя P_2 на величину суммарных потерь рис. 1.

На диаграмме рис. 1, кроме того, очень наглядно представлены весьма характерные в теории асинхронных двигателей величины мощности P'_2 и P_s .

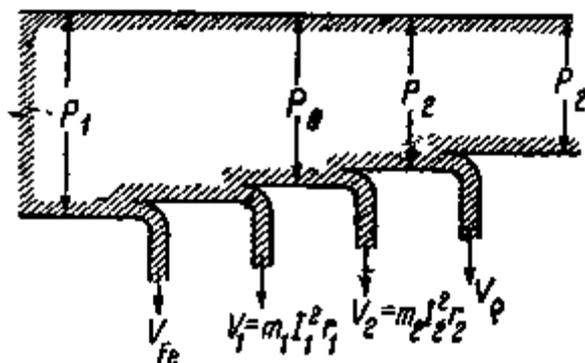


Рис. 1. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

а) Мощность P'_2 есть мощность ротора; эта мощность меньше мощности, подведенной к статору, на величину суммы потерь $V_{Fe} + V_1 + V_2$; если из мощности ротора P_2 вычесть мощность, соответствующую механическим потерям V_p , то получится мощность на валу двигателя W_2 .

б) Мощность P_s носит обычно название мощности вращающегося потока; P_s равно сетевой мощности P_1 за вычетом суммарных потерь в статоре

$$V_{Fe} + V_1.$$

Мощность P_s является, как будет видно ниже, весьма характерной величиной в теории асинхронных двигателей.

3.4.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.5 Практическое занятие №5 (2 часа).

Тема: «Расчёт магнитной цепи трансформатора»

3.5.1 Задание для работы:

Освоить методы расчета магнитной цепи трансформатора

3.5.2 Краткое описание проводимого занятия:

Расчет магнитной цепи трансформатора

Расчет магнитной цепи производится с целью определения намагничивающего тока и магнитных потерь. Расчет реактивной составляющей намагничивающего тока можно выполнить двумя методами.

Первый метод

Первый метод аналогичен методу расчета магнитной цепи машины постоянного тока (смотрите статью "Метод расчета магнитной цепи машины постоянного тока"). При этом магнитная цепь вдоль средней магнитной линии (рисунок 1) разбивается на участки (стержни, ярма и воздушные зазоры или щели между ними), в пределах которых магнитные индукции $B_{ст}$, $B_{я}$, B_{δ} можно считать постоянными. Задаваясь амплитудой потока стержня $\Phi_{ст}$, определяют амплитуды индукции $B_{ст}$, $B_{я}$, $B_{\delta} = B_{ст}$ и затем по кривым намагничивания стали находят $H_{ст}$ и $H_{я}$. Тогда намагничивающая сила однофазного трансформатора (рисунок 1, а)

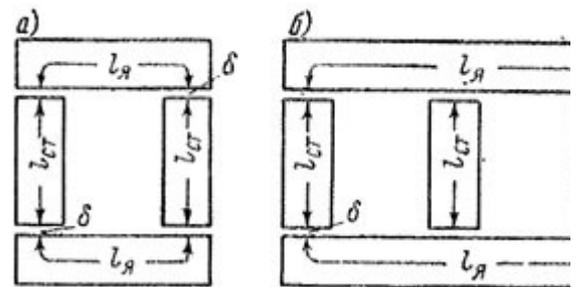


Рисунок 1. Магнитная цепь однофазного (а) и трехфазного стержневого (б) трансформатора

$$F = 2H_{ст}l_{ст} + 2H_{я}l_{я} + 4\frac{B_{ст}}{\mu_0}\delta, \quad (1)$$

где δ – величина зазора, которая для шихтованных магнитопроводов равна 0,003 – 0,005 см, а для стыковых магнитопроводов больше этого значения на толщину изоляционной прокладки в стыке.

Магнитная цепь трехстержневого трансформатора несколько несимметрична, и длины магнитных линий для крайних фаз несколько больше, чем для средней. Поэтому намагничивающая сила и намагничивающие токи крайних фаз также несколько больше. На практике этим различием пренебрегают и рассчитывают среднюю намагничивающую силу F для одной фазы. Тогда (рисунок 1, б)

$$F = H_{ст}l_{ст} + \frac{2}{3}H_{я}l_{я} + n_{\phi}\frac{B_{ст}}{\mu_0}\delta. \quad (2)$$

Здесь n_{ϕ} – среднее число стыков или зазоров на фазу. Для трехстержневого трансформатора с шихтованным магнитопроводом (смотрите рисунок 2, б) $n_{\phi} = 7/3$ и со стыковым магнитопроводом $n_{\phi} = 2$.

Действующее значение основной гармоники реактивной составляющей намагничивающего тока

$$I_{0r} = \frac{F}{\sqrt{2}kw}, \quad (3)$$

где w – число витков обмотки и k – коэффициент, учитывающий наличие в намагничивающем токе высших гармоник. При $B_{ст} = 1$ Т и $B_{ст} = 1,4$ Т соответственно $k = 1,5$ и $k = 2,2$.

Магнитная характеристика $\Phi_{ст} = f(i_{0r})$ имеет вид, показанный на рисунке 1, в статье "Явления, возникающие при намагничивании магнитопроводов трансформаторов".

Второй метод

Второй метод основан на вычислении энергии магнитного поля магнитопровода или его намагничивающей (реактивной) мощности.

Допустим, что В и Н представляют собой амплитуды индукции и напряженности магнитного поля, изменяющихся синусоидально во времени. Тогда максимум магнитной энергии в единице объема поля

$$W'_{\text{макс}} = BH / 2 ,$$

реактивная мощность на единицу объема

$$Q' = \omega W'_{\text{макс}} = \pi f BH ,$$

а реактивная мощность магнитопровода с объемом V или массой G

$$Q = Q'V = \frac{Q'G}{\gamma} = \frac{\pi f BH}{\gamma} G = q_c G , \quad (4)$$

где γ – плотность стали магнитопровода, а

$$q_c = \frac{\pi f BH}{\gamma} = \frac{\pi f B^2}{\mu \gamma} \quad (5)$$

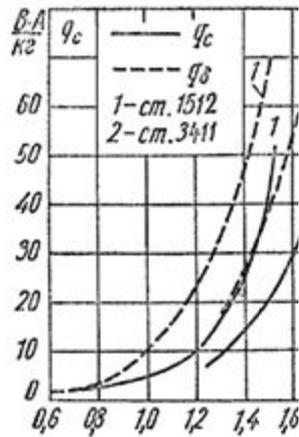


Рисунок 2. Кривые удельной реактивной мощности магнитопровода и зазора

увеличивается, вследствие чего q_δ зависит также от марки стали. Кривые $q_c = f(B)$ и $q_\delta = f(B)$ представлены на рисунке 2

Так как реактивная намагничивающая мощность трансформатора

$$Q_0 = mEI_{0r} ,$$

где m – число фаз, то

$$I_{0r} = \frac{Q_0}{mE} = \frac{q_{c\text{ст}}G_{\text{ст}} + q_{c\text{я}}G_{\text{я}} + nq_\delta S_\delta}{mE} . \quad (6)$$

Здесь $G_{\text{ст}}$ и $G_{\text{я}}$ – массы стержней и ярем трансформатора, а $q_{c\text{ст}}$ и $q_{c\text{я}}$ – удельные мощности q_c для стержня и ярма.

Обычно пользуются вторым методом расчета.

Магнитные потери в магнитопроводе $p_{\text{мг}}$ легко вычислить, зная удельные потери $p = f(B)$ для используемой марки стали:

$$p_{\text{мг}} = p_{\text{ст}}G_{\text{ст}} + p_{\text{я}}G_{\text{я}} . \quad (7)$$

Активная составляющая намагничивающего тока

$$I_{0a} = \frac{p_{\text{мг}}}{mE} = \frac{p_{\text{ст}}G_{\text{ст}} + p_{\text{я}}G_{\text{я}}}{mE} , \quad (8)$$

а полный намагничивающий ток, или ток холостого хода,

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad (9)$$

Ток I_0 в силовых трансформаторах относительно мал и составляет при нормальном напряжении 0,5 – 4% от номинального тока, причем второе число относится к трансформаторам малой мощности (10 – 20 кВ×А). Малое значение тока I_0 объясняется наличием замкнутого стального магнитопровода.

3.5.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.6 Практическое занятие №6 (2 часа).

Тема: «Построение внешней характеристики трансформатора»

3.6.1 Задание для работы:

Для трёхфазного трансформатора, параметры которого приведены в табл.1, определить коэффициент мощности $\cos \varphi_2$, сопротивление первичной и вторичной обмоток R_1, X_{d1}, R_2, X_{d2} , расчётные сопротивления $\Pi \parallel \Pi \parallel \Pi$, угол магнитных потерь δ . построить векторную диаграмму трансформатора для нагрузки $\beta = 0.8$ и $\cos \varphi_2 = 0.75$. Построить внешнюю характеристику $U_2 = f(\beta)$ и зависимость КПД от нагрузки $\eta = f(\beta)$ для $\cos \varphi_2 = 0.75$. начертить Т-образную схему замещения.

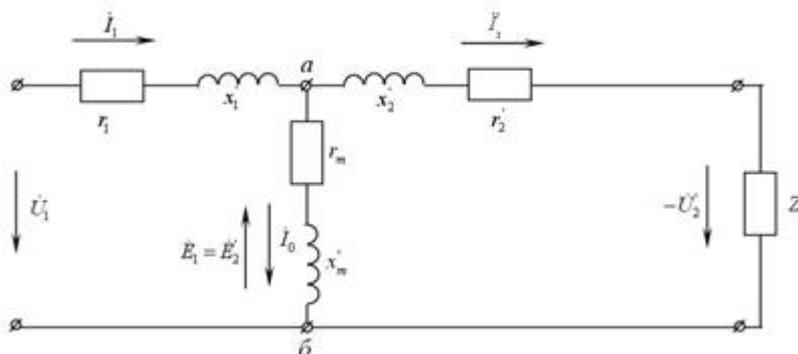


Рис. 1 Схема замещения трансформатора

3.6.2 Краткое описание проводимого занятия:

Внешняя характеристика трансформатора представляет собой зависимость между вторичным током и напряжением при изменении нагрузки, неизменном значении первичного напряжения U_1 и заданном коэффициенте мощности $\cos \varphi_2$ во вторичной цепи.

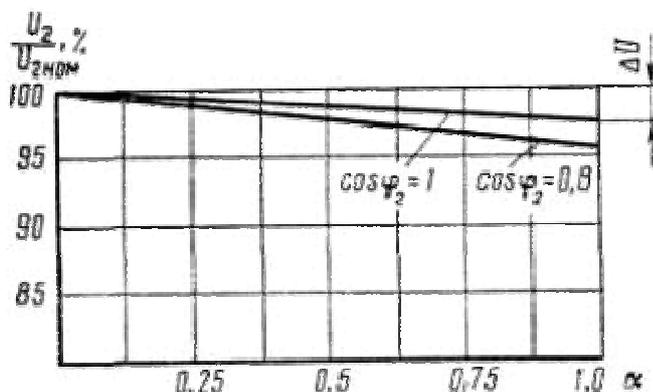


Рис. 1. Внешняя характеристика трансформатора

Вторичное напряжение U_2 при нагрузке отличается от напряжения холостого хода на величину изменения напряжения, которое зависит от величины нагрузки.

Внешняя характеристика может быть построена как по расчетным данным активного и индуктивного падений напряжения (расчетная внешняя характеристика), так и по опытным данным (внешняя характеристика конкретного трансформатора). Построение внешней характеристики показано на рис. 6.3. По оси ординат откладывается вторичное напряжение U_2 , а по оси абсцисс — величина нагрузки α (в % или долях от номинальной мощности). Начальная точка внешней характеристики начинается от ординаты, равной $U_{2НОМ}$, а другой ее конец, против абсциссы $\alpha = 1$ (т. е. при номинальной нагрузке), будет опущен против начала на величину ΔU — изменения напряжения.

Так как изменение напряжения пропорционально нагрузочному току I_2 (см. § 6.1), то внешняя характеристика практически представляет прямую линию. На рис. 6.3 построены две внешние характеристики — для $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Положения характеристик зависят от мощности и характера нагрузки трансформатора и при малой мощности они могут поменяться местами (при активной и активно-индуктивной нагрузках).

3.6.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.7 Практическое занятие №7 (2 часа).

Тема: «Расчёт режима КЗ трансформатора»

3.7.1 Задание для работы:

Освоить методику расчета токов короткого замыкания для трансформаторов

3.7.2 Краткое описание проводимого занятия:

Режимом короткого замыкания трансформатора называется такой режим, когда выводы вторичной обмотки замкнуты токопроводом с сопротивлением, равным нулю ($ZН = 0$). Короткое замыкание трансформатора в условиях эксплуатации создает аварийный режим, так как вторичный ток, а следовательно, и первичный увеличиваются в несколько десятков раз по сравнению с номинальным. Поэтому в цепях с трансформаторами предусматривают защиту, которая при коротком замыкании автоматически отключает трансформатор.

В лабораторных условиях можно провести испытательное короткое замыкание трансформатора, при котором накоротко замыкают зажимы вторичной обмотки, а к первичной подводят такое напряжение U_k , при котором ток в первичной обмотке не превышает номинального значения ($I_k < I_{1НОМ}$). При этом выраженное в процентах напряжение U_k , при $I_k = I_{1НОМ}$ обозначают u_k и называют напряжением короткого замыкания трансформатора. Это характеристика трансформатора, указываемая в паспорте.

Таким образом (%):

$$u_k = \frac{U_k \cdot 100}{U_{1НОМ}}$$

где $U_{1НОМ}$ — номинальное первичное напряжение.

Напряжение короткого замыкания зависит от высшего напряжения обмоток

трансформатора. Так, например, при высшем напряжении 6—10 кВ $u_K = 5,5\%$, при 35 кВ $u_K = 6,5 \div 7,5\%$, при 110 кВ $u_K = 10,5\%$ и т. д. Как видно, с повышением номинального высшего напряжения увеличивается напряжение короткого замыкания трансформатора.

При напряжении U_K составляющем 5—10% от номинального первичного напряжения, намагничивающий ток (ток холостого хода) уменьшается в 10—20 раз или еще более значительно. Поэтому в режиме короткого замыкания считают, что

$$\dot{I}'_1 = -\dot{I}'_2$$

Основной магнитный поток Φ также уменьшается в 10—20 раз, и потоки рассеяния обмоток становятся соизмеримыми с основным потоком.

Так как при коротком замыкании вторичной обмотки трансформатора напряжение на ее зажимах $U_2 = 0$, уравнение э. д. с. для нее принимает вид

$$\dot{E}'_2 = R'_2 \cdot \dot{I}'_2 + jX'_2 \cdot \dot{I}'_2$$

а уравнение напряжения для трансформатора записывается как

$$\dot{U}_H = R_H \cdot \dot{I}_1 + jX_H \cdot \dot{I}_1$$

Этому уравнению соответствует схема замещения трансформатора, изображенная на рис. 1.

Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании соответствующая уравнению и схеме рис. 1, показана на рис. 2. Напряжение короткого замыкания имеет активную и реактивную составляющие. Угол φ_K между векторами этих напряжений и тока зависит от соотношения между активной и реактивной индуктивной составляющими сопротивления трансформатора.

$$\varphi_K = \arctg\left(\frac{X_K}{R_K}\right)$$

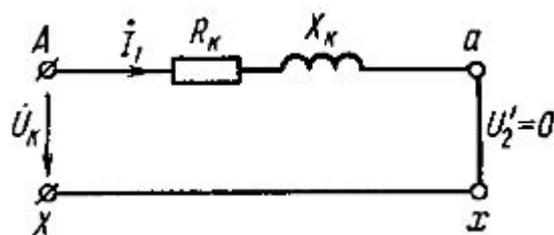


Рис. 1. Схема замещения трансформатора при коротком замыкании

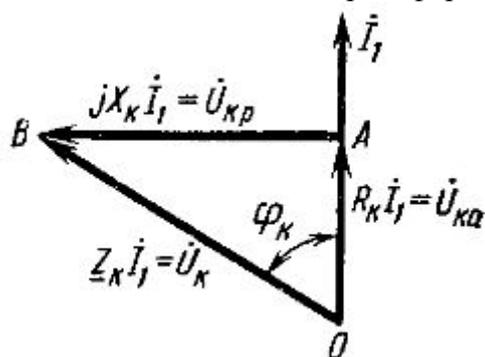


Рис. 2. Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании

У трансформаторов с номинальной мощностью 5—50 кВА $X_K/R_K = 1 \div 2$; с номинальной мощностью 6300 кВА и более $X_K/R_K = 10$ и более. Поэтому считают, что у трансформаторов большой мощности $U_K = U_{Kp}$, а полное сопротивление $Z_K = X_K$.

Опыт короткого замыкания.

Этот опыт, как и опыт холостого хода, проводят для определения параметров

трансформатора. Собирают схему (рис. 3), в которой вторичная обмотка замкнута накоротко металлической перемычкой или проводником с сопротивлением, близким к нулю. К первичной обмотке подводится такое напряжение U_K , при котором ток в ней равен номинальному значению $I_{ном}$.

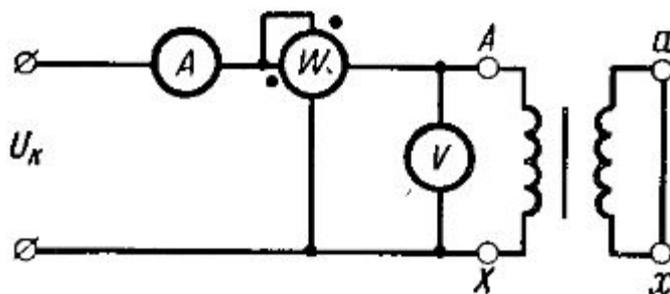


Рис. 3. Схема опыта короткого замыкания трансформатора
По данным измерений определяют следующие параметры трансформатора.
Напряжение короткого замыкания

$$U_K = \frac{U_K \cdot 100}{U_{1ном}}$$

где U_K — измеренное вольтметром напряжение при $I_1 = I_{ном}$. В режиме короткого замыкания U_K очень мало, поэтому потери холостого хода в сотни раз меньше, чем при номинальном напряжении. Таким образом, можно считать, что $P_{по} = 0$ и измеряемая ваттметром мощность — это потери мощности $P_{пк}$, обусловленные активным сопротивлением обмоток трансформатора.

При токе $I_1 = I_{ном}$ получают номинальные потери мощности на нагрев обмоток $P_{пк.ном}$, которые называются электрическими потерями или потерями короткого замыкания.

Из уравнения напряжения для трансформатора, а также из схемы замещения (см. рис. 1) получаем

$$U_K = Z_K \cdot I_1$$

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$$

где Z_K — полное сопротивление трансформатора.

Измерив U_K и I_1 можно вычислить полное сопротивление трансформатора

$$Z_K = \frac{U_K}{I_1}$$

Потери мощности при коротком замыкании можно выразить формулой

$$P_{пк} = I_1^2 \cdot R_K$$

поэтому активное сопротивление обмоток трансформатора

$$R_K = \frac{P_{пк}}{I_1^2}$$

находят из показаний ваттметра и амперметра. Зная Z_K и R_K , можно вычислить индуктивное сопротивление обмоток:

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

Зная Z_K , R_K и X_K трансформатора, можно построить основной треугольник напряжений короткого замыкания (треугольник OAB на рис. 2), а также определить активную и индуктивную составляющие напряжения короткого замыкания:

$$U_{ка} = U_k \cdot \cos \varphi_k$$

$$U_{кр} = U_k \cdot \sin \varphi_k$$

3.7.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.8 Практическое занятие №8, 9 (4 часа).

Тема: «Расчёт переходных режимов»

3.8.1 Задание для работы:

Изучить причины возникновения переходных режимов в работе трансформаторов.

3.8.2 Краткое описание проводимого занятия:

Переходные процессы получаются при переходе от одного установившегося режима работы к другому. Такой переход не совершается мгновенно, так как энергия магнитных и электрических полей, связанных с цепями, различна при различных установившихся режимах, а для конечного изменения энергии полей необходимо некоторое время. Изменение энергии полей сопровождается возникновением так называемых свободных полей и соответствующих им токов и напряжений, накладывающихся на токи и напряжения установившегося режима.

При переходных процессах результирующие токи, а также напряжения на отдельных частях обмоток могут значительно превышать те же величины при установившихся режимах, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации трансформаторов и электрических машин.

а) Включение трансформатора.

Будем рассматривать переходный процесс при включении ненагруженного трансформатора. Для этого случая можем написать:

$$i_1 r_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt} = u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \psi), \quad (2-169)$$

где Φ — полный поток сцепляющийся со всеми витками первичной обмотки, а ψ — угол, определяющий мгновенное значение напряжения в момент включения трансформатора (при $t = 0$). Так как в трансформаторе со стальным сердечником поток Φ и ток i_1 связаны сложной зависимостью, то приходится искать приближенное решение.

Можем заменить:

$$i_1 = \frac{w_1 \Phi}{L_1}, \quad (2-170)$$

где L_1 — статическая индуктивность, являющаяся функцией потока Φ . Теперь уравнение (2-169) примет вид:

$$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{r_1}{L_1} \Phi = \frac{\sqrt{2} U_1}{w_1} \sin(\omega t + \psi). \quad (2-171)$$

Второй член левой части количественно в обычных случаях значительно меньше, чем первый член; поэтому примем, что L_1 не зависит от потока и представляет собой постоянную величину. Тогда получаем уравнение с постоянными коэффициентами, которое решается обычным способом. Его решение состоит из двух слагаемых:

$$\Phi = \Phi' + \Phi'', \quad (2-172)$$

где Φ' — мгновенное значение установившегося потока, а Φ'' — мгновенное значение свободного потока.

Установившийся поток

$$\Phi' = \Phi_M \sin(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}) = -\Phi_M \cos(\omega t + \psi). \quad (2-173)$$

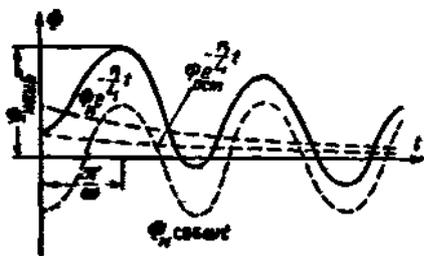


Рис. 2-69. Изменение потока при наихудших условиях включения трансформатора. Свободный поток определяется из уравнения

$$\frac{d\Phi''}{dt} + \frac{r_1}{L_1} \Phi'' = 0, \quad (2-174)$$

интеграл которого имеет вид:

$$\Phi'' = C e^{-\frac{r_1}{L_1} t}, \quad (2-175)$$

Постоянная интегрирования C находится из начальных условий. Рассмотрим случай, когда в момент включения в сердечнике трансформатора имел место поток остаточного магнетизма $\pm\Phi_{ост}$. Тогда при $t=0$ согласно (2-172) и (2-173)

$$\Phi_{(t=0)} = \Phi' + \Phi'' = -\Phi_M \cos\psi + C = \pm\Phi_{ост}, \quad (2-176)$$

откуда

$$C = \Phi_M \cos\psi \pm \Phi_{ост}$$

и

$$\Phi'' = (\Phi_M \cos\psi \pm \Phi_{ост}) e^{-\frac{r_1}{L_1} t}. \quad (2-177)$$

Подставляя найденные значения Φ' и Φ'' в (2-172), получим:

$$\Phi = -\Phi_M \cos(\omega t + \psi) + \Phi_M \cos\psi e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \pm \Phi_{ост} e^{-\frac{r_1}{L_1} t}. \quad (2-178)$$

Наиболее благоприятные условия получаются при включении, когда $\psi = \frac{\pi}{2}$ (при $u_1 = \sqrt{2}U_1$) и $\Phi_{ост} = 0$. В этом случае имеем:

$$\Phi = -\Phi_M \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \Phi_M \sin \omega t, \quad (2-179)$$

т. е. с первого же момента устанавливается нормальный поток, а следовательно, и ток холостого хода.

Наихудшие условия включения получим при $\psi = 0$ (при $u_1 = 0$) и при $\Phi_{ост}$ направленном против Φ' . В этом случае

$$\Phi = -\Phi_M \cos\omega t + \Phi_M e^{-\frac{r_1}{L_1} t} + \Phi_{ост} e^{-\frac{r_1}{L_1} t}. \quad (2-180)$$

Поток Φ достигает наибольшего значения, спустя приблизительно полпериода после включения, т. е. при $\omega t \approx \pi$. Если принять $\Phi_{ост} = 0,5\Phi_M$, то для наибольшего значения потока можем, следовательно, написать (рис. 2-69):

$$\Phi_{наиб} \approx \Phi_M (1 + 1,5 e^{-\frac{r_1 \pi}{\omega L_1}}). \quad (2-181)$$

Найдя кривую изменения потока, можно при помощи кривой намагничивания трансформатора (рис. 2-70) построить кривую намагничивающего тока.

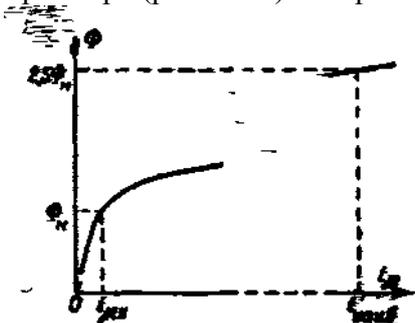


Рис. 2-70. К определению «броска тока» при включении по кривой намагничивания трансформатора.

Мы видим, что при наиболее неблагоприятном случае ток холостого хода достигает весьма большого значения, в десятки раз превышающего максимальное значение установившегося тока холостого хода. Такой «бросок тока» следует иметь в виду, например, при опыте холостого хода: токовые цепи прецизионных измерительных приборов во избежание поломки стрелок нужно до включения трансформатора шунтировать

Приведенное решение, как отмечалось, является приближенным, так как не были учтены поле рассеяния, действие вихревых токов и непостоянство L_1 . Однако опыт подтверждает, что броски тока при включении трансформатора достигают указанных значений.

б) Внезапное короткое замыкание.

Наибольшие токи в обмотках трансформатора получаются при трехфазном коротком замыкании. Мы ранее нашли, что установившийся ток короткого замыкания

$$\text{равен } I_k = \frac{U}{z_k}$$

При $U = U_n$ он достигает весьма большого значения. Оно может быть найдено из следующего соотношения:

$$I_k = \frac{U_n}{z_k} \cdot \frac{I_n}{I_n} \cdot \frac{100}{100} = I_n \frac{100}{u_k}, \quad (2-182)$$

$$u_k = \frac{I_n z_k}{U_n} \cdot 100\%$$

где u_k – номинальное напряжение короткого замыкания.

Задача определений тока для переходного процесса достаточно точно решается при пренебрежении током холостого хода. Мы в этом случае в дифференциальных уравнениях напряжений обмоток

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + i_1 r_1 = u_1 = \sqrt{2} U_{1n} \sin(\omega t + \psi); \quad (2-183)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + i_2 r_2 = 0, \quad (2-184)$$

приняв $w_1 = w_2$ можем положить $i_1 = -i_2$.

Тогда, вычитая (2-184) из (2-183) и исключая i_2 при помощи равенства $i_1 = -i_2$, получим:

$$u_1 - (L_1 + L_2 - 2M) \frac{di_1}{dt} - i_1 (r_1 + r_2) = 0. \quad (2-185)$$

Так как $L_1 + L_2 - 2M = (L_1 - M) + (L_2 - M) = L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} = L_k$; $r_1 + r_2 = r_k$, где L_k и r_k — индуктивность и активное сопротивление при коротком замыкании, то (2-185) можем переписать в следующем виде:

$$L_k \frac{di_1}{dt} + r_k i_1 = u_1. \quad (2-185a)$$

Таким образом, переходный ток здесь определяется так же, как для реактивной катушки, включенной на синусоидальное напряжение.

Он состоит из установившегося тока и свободного, затухающего в соответствии с

$$T = \frac{L_k}{r_k}.$$

постоянной времени

Если пренебречь затуханием свободного, тока, то в самом неблагоприятном случае мгновенное значение тока короткого, замыкания i_m будет в 2 раза, а с учетом затухания свободного тока — в $1,5 \div 1,8$ раза больше амплитуды установившегося тока, т. е.

$$i_m = (1,5 \div 1,8) \sqrt{2} I_k = (1,5 \div 1,8) \frac{\sqrt{2} \times 100}{u_k} I_n. \quad (2-186)$$

$$\frac{i_m}{\sqrt{2} I_n} = (1,5 \div 1,8) \times 16,7 \approx 25 \approx 30.$$

Если, например, $u_k = 6\%$, то

Такие токи в обмотках трансформатора создают очень большие электромагнитные силы, опасные в отношении механической прочности обмоток. При конструировании обмоток их необходимо принимать во внимание, особенно в случае мощных трансформаторов, где эти силы на единицу длины обмотки иногда получаются настолько большими, что приходится для таких трансформаторов брать повышенные значения u_k , чтобы уменьшить ток короткого замыкания. Кроме того, следует по возможности выполнять трансформаторы с обмотками одинаковой высоты. Если высоты обмоток неодинаковы, то возникают большие аксиальные силы, которые могут привести к разрушению изоляции с последующим пробоем ее.

в) Перенапряжения в трансформаторах.

Перенапряжения, возникающие в трансформаторах, могут быть вызваны различными причинами. Из них главнейшие: процессы при включении и выключении трансформатора; короткие замыкания и повторные заземляющие дуги на линии передачи, к которой присоединен трансформатор; грозовые разряды вблизи линии. Наибольшие перенапряжения в обмотках трансформатора получаются при грозовых разрядах. Они называются атмосферными перенапряжениями.

В большинстве случаев грозовые разряды создают в линии апериодические электрические импульсы большой амплитуды и малой продолжительности действия. Примерная форма такого импульса показана на рис. 2-71.

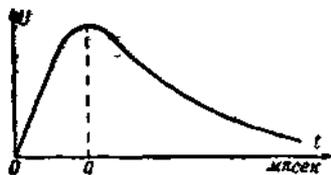


Рис. 2-71. Примерная форма кривой электрического импульса при грозовых разрядах.

Здесь время подъема напряжения от нуля до максимума, достигающего пяти-шестикратного значения амплитуды фазного напряжения, измеряется иногда десятными долями микросекунды (отрезок \overline{Oa}). Соответствующая часть кривой называется фронтом волны. Она может рассматриваться как четверть периода периодического процесса весьма высокой частоты. При такой частоте мы можем считать, что ток будет проходить только

по емкостным связям между витками отдельных катушек и между катушками обмотки высшего напряжения, а также между катушками и сталью. Обмотку низшего напряжения при этом приближенно можно принять заземленной, так как она соединена со сталью большими емкостями (т. е. малыми емкостными сопротивлениями). Токами по индуктивным и активным сопротивлениям катушек мы пренебрегаем: при очень высокой частоте они малы по сравнению с емкостными токами.

В этом случае обмотка высшего напряжения, обычно состоящая из последовательно соединенных катушек, может быть заменена цепочкой емкостей, показанной на рис. 2-72,а, где C_3 — емкости между катушками и землей; C_k — емкости между катушками.

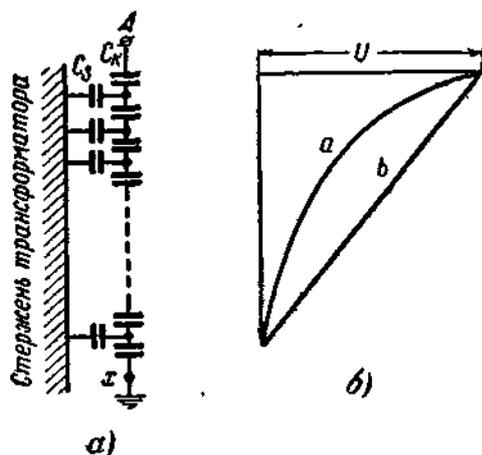


Рис. 2-72. Приближенная схема замещения трансформатора при высокочастотных процессах (а); кривые распределения напряжения вдоль обмотки (б).

Распределение напряжения вдоль обмотки получается неравномерным (кривая а на рис. 2-72,б), так как токи, проходящие по емкостям C_k , будут неодинаковы. Они больше вблизи линейного конца и меньше вблизи заземленной нейтрали. Показанное распределение напряжения называется емкостным.

После затухания свободных полей получим равномерное распределение напряжения вдоль обмотки (кривая б на рис. 2-72,б). Теперь оно будет обусловлено только индуктивными и активными сопротивлениями катушек и будет соответствовать установившемуся режиму работы при нормальной частоте тока.

Кривая а на рис. 2-72,б показывает, что при начальном распределении напряжения большая его часть приходится на первые катушки, и, следовательно, их изоляция подвергается наибольшей опасности. Опыт это подтверждает, так как пробой изоляции чаще всего имеют место именно на первых катушках, поэтому их часто выполняют с усиленной изоляцией.

Переход от начального распределения напряжения к установившемуся (от кривой а к кривой б) сопровождается колебательными процессами и перенапряжениями резонансного характера, так как здесь вступают в действие не только емкостные, но и индуктивные связи между катушками. Опытные исследования этих процессов показывают, что высокие градиенты электрического поля получаются также для средних и нижних катушек, но все же наибольшие значения они имеют для начальных катушек.

В крупных трансформаторах на напряжения 115, 220 кВ и выше применяется так называемая емкостная компенсация. Сущность ее заключается в применении добавочных емкостей, выполненных в виде особой формы экранов, окружающих обмотку высшего напряжения (рис. 2-73,а).

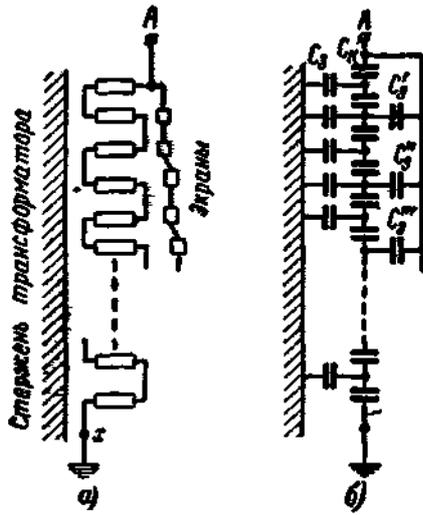


Рис. 2-73. Частичная емкостная компенсация катушечной обмотки (а); соответствующая схема замещения (б).

При этом получается схема замещения, показанная на рис. 2-73,б. Емкости $C'_1, C''_2, C'''_3, \dots$ можно подобрать таким образом, чтобы токи по емкостям C_k были приблизительно одинаковы хотя бы на протяжении 40 — 50% длины обмотки. Тогда начальное распределение становится более равномерным и перенапряжения между катушками будут значительно снижены.

3.8.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.9 Практическое занятие №9, 10 (4 часа).

Тема: «Построение векторной диаграммы АД»

3.9.1 Задание для работы:

Научиться строить векторную диаграмму асинхронного двигателя

3.9.2 Краткое описание проводимого занятия:

На основе уравнений напряжений и уравнения токов, которые мы еще раз напишем:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1;$$

$$0 = E_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' \frac{r_2'}{s} = E_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2' - \dot{I}_2' r_2' \frac{1-s}{s};$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_{0c},$$

могут быть построены векторные диаграммы асинхронной машины, приведенной к работе трансформатором.

На рис. 1 представлена диаграмма, соответствующая работе машины двигателем.

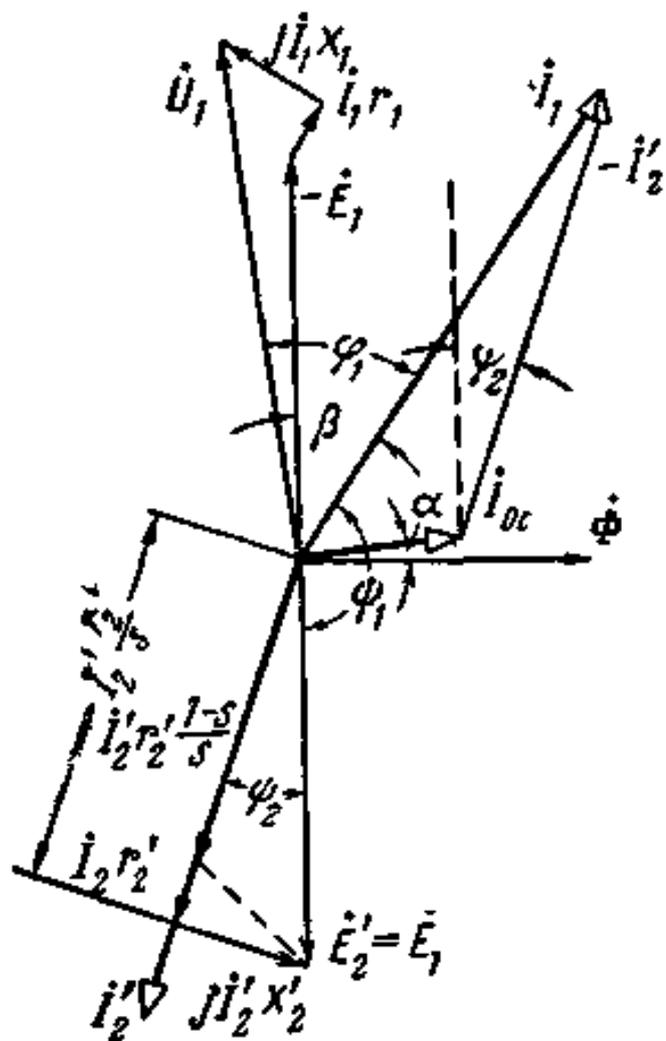


Рис. 1. Векторная диаграмма асинхронного двигателя (приведенного к работе трансформатором).

Она аналогична векторной диаграмме трансформатора, имеющего чисто активную нагрузку. К первичной (статорной) обмотке подведено напряжение \dot{U}_1 . На зажимах, приведенной вторичной (роторной) обмотки, получается напряжение

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s} = \dot{E}'_2 - j \dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2$$

Мощность, отдаваемая вторичной обмоткой, равна:

$$m_1 U'_2 I'_2 = m_1 I_2'^2 r'_2 \frac{1-s}{s} = m_2 I_2'^2 r_2 \frac{1-s}{s},$$

т. е. той механической мощности P'_2 , которую развивал бы ротор машины при работе ее двигателем со скольжением s [см. уравнение (3-70а)].

Из диаграммы на рис. 1 мы можем также получить выражение для электромагнитной мощности $P_{эм}$, передаваемой полем со статора ротору. Для этого спроектируем векторы напряжений обмотки статора на направление вектора \dot{I}_1 . Будем иметь:

$$U_1 \cos \varphi_1 = E_1 \cos \beta + I_1 r_1.$$

Умножим полученное уравнение на $m_1 I_1$;

$$m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = m_1 E_1 I_1 \cos \beta + m_1 I_1^2 r_1.$$

Из диаграммы следует, что

$$I_1 \cos \beta = I_2' \cos \psi_2 + I_{0c} \sin \alpha$$

Подставляя (3-103) в (3-102), получим:

$$m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = m_1 E_1 I_2' \cos \psi_2 + m_1 E_1 I_{0c} \sin \alpha + m_1 I_1^2 r_1$$

а отсюда, учитывая, что $m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = P_1$, $m_1 E_1 I_{0c} \sin \alpha = P_{c1}$, $m_1 I_1^2 r_1 = P_{\text{эл}}$, будем иметь:

$$m_1 E_1 I_2' \cos \psi_2 = P_1 - P_{\text{эл}} - P_{c1} = P_{\text{эм}},$$

или

$$m_1 E_1 I_2' \cos \psi_2 = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2 = P_{\text{эм}}$$

3.9.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.10 Практическое занятие №12, 13 (4 часа).

Тема: «Построение круговой диаграммы АД»

3.10.1 Задание для работы:

Научиться строить круговую диаграмму асинхронного двигателя

3.10.2 Краткое описание проводимого занятия:

Круговая диаграмма асинхронной машины представляет собой геометрическое место концов вектора тока \dot{I}_1 , изменяющегося при изменении скольжения s в пределах от $+\infty$ до $-\infty$, если при этом напряжение на зажимах статора машины и все ее параметры сохраняют постоянные значения. Ее называют также диаграммой тока. Она дает наглядное представление о важных зависимостях между величинами, характеризующими работу асинхронной машины.

Обратимся к схеме замещения. Введем обозначение:

$$i_2'' = -\frac{I_2'}{C_1}$$

Тогда в соответствии со схемой замещения и уравнениями можем написать:

$$\dot{U}_1 = i_2'' (C_1 r_1 + C_1^2 \frac{r_2'}{s}) + j i_2'' (C_1 x_1 + C_1^2 x_2')$$

Комплексный коэффициент C_1 согласно равен:

$$C_1 = \frac{Z_1 + Z_{12}}{Z_{12}} = \frac{r_1 + r_{12} + j(x_1 + x_{12})}{r_{12} + jx_{12}} = c_1 e^{j\gamma_1} = c_1 (\cos \gamma_1 + j \sin \gamma_1) \quad (3-171)$$

где

$$c_1 = \sqrt{\frac{(r_1 + r_{12})^2 + (x_1 + x_{12})^2}{r_{12}^2 + x_{12}^2}} \quad (3-172)$$

и

$$\text{tg} \gamma_1 = \frac{r_{12} x_1 - r_1 x_{12}}{r_{12} (r_1 + r_{12}) + x_{12} (x_1 + x_{12})} \quad (3-173)$$

Подставив в (3-170) значение C_1 по (3-171), будем иметь:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_2'' e^{j2\gamma_1} (c_1 r_1 e^{-j\gamma_1} + c_1^2 \frac{r_2'}{s}) + j \dot{I}_2'' e^{j2\gamma_1} (c_1 x_1 e^{-j\gamma_1} + c_1^2 x_2') = \\ &= \dot{I}_2'' e^{j2\gamma_1} [c_1 r_1 (\cos \gamma_1 - j \sin \gamma_1) + c_1^2 \frac{r_2'}{s}] + j \dot{I}_2'' e^{j2\gamma_1} [c_1 x_1 (\cos \gamma_1 - j \sin \gamma_1) + c_1^2 x_2'], \end{aligned}$$

что после преобразований дает:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_2'' r_{дс} e^{j2\gamma_1} + j \dot{I}_2'' x_{д} e^{j2\gamma_1}, \quad (3-174)$$

где

$$r_{дс} = c_1 [r_1 (\cos \gamma_1 - x_1 \sin \gamma_1) + c_1^2 \frac{r_2'}{s}]; \quad (3-175)$$

$$x_{д} = c_1 [x_1 (\cos \gamma_1 - r_1 \sin \gamma_1) + c_1^2 x_2']. \quad (3-176)$$

Разделив (3-174) на $j x_{д} e^{j2\gamma_1}$, получим:

$$-j \frac{\dot{U}_1}{x_{д}} e^{-j2\gamma_1} = \dot{I}_2'' - j \dot{I}_2'' \frac{r_{дс}}{x_{д}}. \quad (3-177)$$

Три вектора полученного уравнения токов образуют при токе \dot{I}_2'' , соответствующем некоторому скольжению s , прямоугольный треугольник A_cAD , представленный на рис. 3-53, где вектор \dot{U}_1 направлен по вертикали. В этом треугольнике катеты $\overline{A_cA} = \dot{I}_2''$ и $\overline{AD} = -j \dot{I}_2'' \frac{r_{дс}}{x_{д}}$, и гипотенуза $\overline{A_cD} = -j \frac{\dot{U}_1}{x_{д}} e^{-j2\gamma_1}$ (в соответствии с обычными соотношениями между параметрами асинхронной машины принято, что угол γ_1 имеет отрицательное значение).

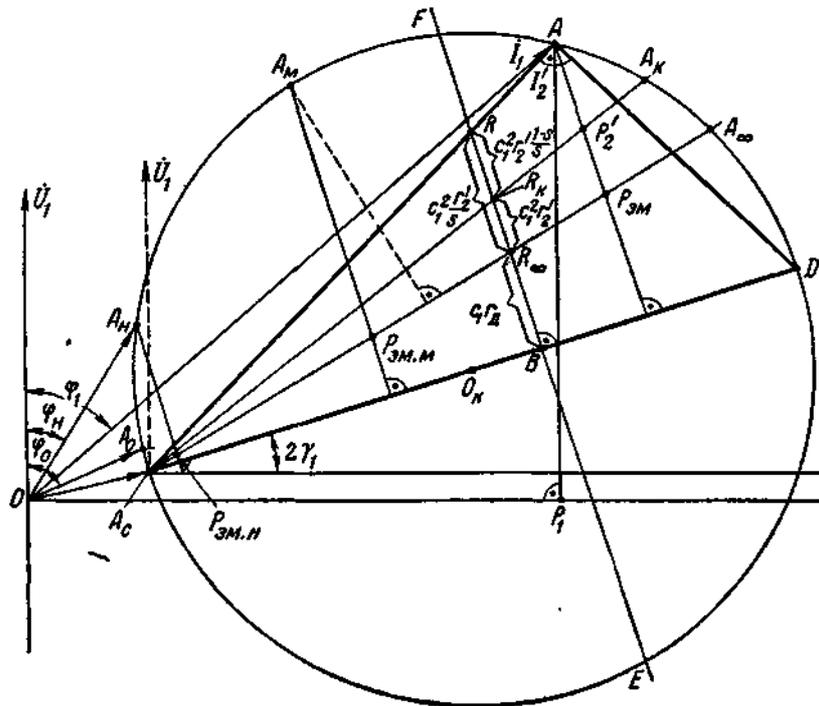


Рис. 3-53. Круговая диаграмма асинхронной машины.

При $\dot{U}_1 = \text{const}$ отрезок $\overline{A_cD} = \text{const}$. Поэтому конец вектора \dot{I}_2'' (вершина прямого угла A) при изменении скольжения s опишет окружность, имеющую диаметр

$$\overline{A_cD} = \frac{U_1}{x_{д}}. \quad (3-178)$$

Прибавив к вектору \dot{I}_2'' постоянный вектор $\overline{0A_c} = \dot{I}_2$ получим вектор первичного тока $\dot{I}_1 = \overline{0A}$. Отсюда следует, что конец вектора тока \dot{I}_1 при изменении s будет скользить по той же окружности, что и вектор \dot{I}_2'' .

Отложим в произвольном масштабе $\overline{A_cB} = x_d$; тогда в том же масштабе $\overline{BR} = r_{д.с}$, так как треугольник сопротивлений A_cBR и треугольник токов A_cAD подобны. Отрезок $\overline{A_cR}$ в масштабе сопротивлений, очевидно, равен $z_{д.с} = \sqrt{r_{д.с}^2 + x_d^2}$. Теперь разделим отрезок \overline{BR} на части:

$$\overline{BR_\infty} = c_1(r_1 \cos \gamma_1 + x_1 \sin \gamma_1) = c_1 r_{д.}$$

$$\overline{R_\infty R_k} = c_1^2 r_2'$$

$$\overline{R_k R} = c_1^2 r_2' \frac{1-s}{s} \quad (\overline{R_\infty R} = c_1^2 \frac{r_2'}{s})$$

При уменьшении s точка R будет скользить вверх по прямой EF ; соответствующая точка A будет скользить по окружности влево.

При $s = 0$ точка R уходит в бесконечность, точка A совпадает с точкой A_c , и мы получаем ток синхронизма \dot{I}_c .

При увеличении s точка R смещается вниз и точка A скользит вправо; при $s = 1$ точка R совпадает с точкой R_k , а точка A — с точкой A_k . Режим работы асинхронной машины при $s = 1$ по аналогии с трансформатором называется режимом короткого замыкания. Ток $\dot{I}_k = \overline{0A_k}$ (не показан на рис. 3-53) — ток короткого замыкания.

Дуга A_cAA_k соответствует работе машины двигателем, так как по ней будет скользить ток \dot{I}_1 при изменении s от 0 до 1. При дальнейшем увеличении s от 1 до $+\infty$ точка R перемещается вниз, точка A — вправо и при $s = +\infty$ точка R попадает в точку R_∞ , а точка A — в точку A_∞ . Малая дуга A_kA_∞ соответствует изменению s от 1 до $+\infty$ и, следовательно, работе машины тормозом.

При $s = -\infty$ точка R также совпадает с точкой R_∞ , а точка A — с точкой A_∞ . При отрицательном s и при его уменьшении по абсолютной величине точка R скользит вниз от R_∞ , а точка A — вниз от A_∞ . При $s = 0$, как отмечалось, точка A совпадает с точкой A_c . Дуга $A_\infty EA_c$ с соответствует изменению s от $-\infty$ до 0 и, следовательно, работе машины генератором.

Полученная диаграмма позволяет найти для любого тока I_1 соответствующий ему $\cos \phi_1$. Из диаграммы мы можем также получить ряд других величин, характеризующих работу машины.

Проведем через точку A перпендикулярно оси абсцисс отрезок $\overline{P_1A}$. Пусть при построении круговой диаграммы был выбран масштаб для тока C_1 , А/мм. Тогда $C_1 \overline{P_1A} = I_1 \cos \phi_1$; где $\overline{P_1A}$ измеряется в миллиметрах. Умножив полученный активный ток статора на число фаз m_1 и напряжение U_1 , получим электрическую мощность статора:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1 = m_1 U_1 C_1 \overline{P_1A} = C_p \overline{P_1A}, \quad (3-179)$$

где масштаб для мощности, Вт/мм,

$$C_p = m_1 U_1 C_1. \quad (3-180)$$

Таким образом, перпендикуляр из любой точки диаграммы тока на ось абсцисс, измеренный в масштабе мощности, равен электрической мощности статора. Поэтому ось абсцисс называется линией электрических мощностей P_1 .

Из подобия треугольников A_cRR_k и A_cAP_1' следует:

$$\overline{P_2' A} = \overline{A_c A} \frac{\overline{R_k R}}{\overline{A_c R}}$$

Умножив обе части равенства на масштаб мощности, получим:

$$m_1 U_1 C_1 \overline{P_2' A} = m_1 U_1 C_1 \overline{A_c A} \frac{c_1^2 r_2' \frac{1-s}{s}}{z_d s}$$

или

$$C_p \overline{P_2' A} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} = P_2' \quad (3-181)$$

так как

$$\frac{U_1}{z_{д.с}} = I_2'' = \frac{I_2'}{c_1} \quad C_1 \overline{A_c A} = I_2'' = \frac{I_2'}{c_1}$$

Следовательно, линия $A_c A_\infty$ — линия механических мощностей P_2' , развиваемых ротором.

Аналогично из подобия треугольников $A_c R R_\infty$ и $A_c A P_{эм}$ следует:

$$C_p \overline{P_{эм} A} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = P_{эм} \quad (3-182)$$

Следовательно, линия $A_c A_\infty$ — линия электромагнитных мощностей $P_{эм}$; в то же время это есть линия электромагнитных вращающих моментов M , так как M равен

мощности $P_{эм}$, деленной на синхронную угловую частоту $\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \text{const}$, Дж,

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{C_1}{\omega_1} \overline{P_{эм} A} \quad (3-183)$$

или, кг·м,

$$M = \frac{C_p}{9,81 \omega_1} \overline{P_{эм} A} = C_M \overline{P_{эм} A}$$

где масштаб для момента, кг·м/мм,

$$C_M = \frac{60}{9,812\pi n_1} \cdot C_p = \frac{0,973}{n_1} C_p \quad (3-184)$$

Отрезок $\overline{P_{эм} P_2'}$, измеренный в масштабе мощности, равен электрическим потерям в обмотке ротора:

$$C_p \overline{P_{эм} P_2'} = P_{эм} - P_2' = m_1 I_2'^2 r_2' = P_{э2} \quad (3-185)$$

Согласно (3-69) скольжение

$$s = \frac{P_{э2}}{P_{эм}} = \frac{\overline{P_{эм} P_2'}}{\overline{P_{эм} A}} \quad (3-186)$$

При небольших токах I_1 (например, при $I_1 < \overline{0A_n}$) достаточно точное определение s по (3-186) затруднительно, поэтому для определения s применяют особое построение на диаграмме, рассмотренное в § 3-18,б.

При помощи диаграммы можно определить максимальный момент M_m . Для этого нужно параллельно линии моментов $A_c A_\infty$ провести касательную к окружности и из точки касания A_m — перпендикуляр к диаметру $\overline{A_c D}$ до пересечения с линией $A_c A_\infty$, тогда получим, кг·м,

$$M_M = C_M \overline{P_{эм.М} A_M}$$

Обычно асинхронные двигатели рассчитываются таким образом, чтобы $\cos\varphi_H$ при номинальной нагрузке был равен максимальному (или близок к максимальному). В этом случае ток статора $I_{1H} = \overline{0A_H}$ будет совпадать с касательной к окружности (или будет близок к ней). Номинальный момент $M_H = C_M \overline{P_{эм.Н} A_H}$. Кратность максимального момента (способность к перегрузке)

$$\frac{M_M}{M_H} = \frac{P_{эм.М} A_M}{P_{эм.Н} A_H}$$

Методы построения круговой диаграммы по расчетным или опытным данным и определение с ее помощью рабочих кривых двигателя, характеризующих его рабочие свойства, рассматриваются в § 3-18,б.

При построении рассмотренной круговой диаграммы было принято, что параметры асинхронной машины $r_1, r_2', x_1, x_2', r_{12}, x_{12}$ остаются без изменения, а изменяется только скольжение s . Никаких других допущений не делалось. Поэтому представленная на рис. 3-53 диаграмма называется точной круговой диаграммой.

Для обычных случаев, как отмечалось, комплекс C_1 можно заменить его модулем s_1 и принять, следовательно, $\gamma_1 = 0$. Тогда построение круговой диаграммы упрощается: ее диаметр расположится на линии, параллельной оси абсцисс; отрезки прямых, определяющие мощности и вращающие моменты, будут перпендикулярны к оси абсцисс. Такая упрощенная круговая диаграмма и используется при исследовании асинхронных машин, если угол γ_1 не превышает примерно $2 \div 3^\circ$.

3.10.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.11 Практическое занятие №14, 15 (4 часа).

Тема: «Расчёт рабочих характеристик АД»

3.11.1 Задание для работы:

Освоить методы расчетов рабочих характеристик АД

3.11.2 Краткое описание проводимого занятия:

а) Определение рабочих характеристик опытным путем.

Под рабочими характеристиками или рабочими кривыми асинхронного двигателя обычно понимаются следующие зависимости:

$I_1, \cos\varphi_1, \eta, s = f(P_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $f = \text{const}$ (рис. 3-54).

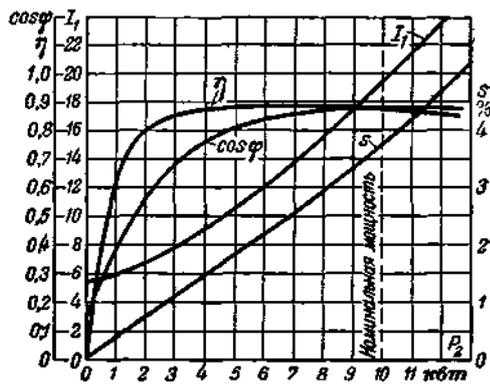


Рис. 3-54. Рабочие характеристики двигателя на 10 кВт, 220/380 В, 1500 об/мин.

Рабочие характеристики двигателей небольшой мощности могут быть найдены путем непосредственного измерения тока I_1 , мощности P_1 , частоты вращения n_2 и момента на валу M_B при различных нагрузках двигателя. Нагрузка двигателя при этом осуществляется с помощью какого-либо тормоза, позволяющего измерить создаваемый им тормозящий момент M_B , кг·м.

При опыте непосредственной нагрузки напряжение U_1 и частоту тока f_1 устанавливают равными номинальным значениям $U_{1н}$ и $f_{1н}$. По данным измерений рассчитывается мощность, Вт,

$$P_2 = 9,81\omega_2 M_B = 9,81 \frac{2\pi n_2}{60} M_B = 1,02nM_B$$

и коэффициенты:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{m_1 U_1 I_1}; \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Определение рабочих характеристик путем непосредственного измерения указанных величин обычно не дает достаточно точных результатов, так как измерения M_B и n_2 практически трудно выполнить с надлежащей точностью. Погрешность при определении P_2 дает примерно ту же погрешность при определении η . Поэтому обычно не рекомендуется определять к.п.д. η электрических машин по данным непосредственного измерения P_1 и P_2 , если значение $\eta > 0,50$. Однако в последнее время вследствие усовершенствования тормозов, позволяющих более точно измерить вращающий момент, метод непосредственного определения к.п.д. используется и в том случае, когда примерно значение $\eta \leq 0,70$. Значение n_2 близко к значению n_1 , поэтому погрешность, допущенная при измерении n_2 , сильно скажется на значении s . Скольжение s значительно более точно

$$s = \frac{f_2}{f_1}$$

определяется по данным измерения частоты f_2 тока ротора — по формуле

Если производится испытание малых машин ($P_n \leq 0,4$ кВт), то обычно используется метод непосредственного определения рабочих характеристик.

б) Определение рабочих характеристик по круговой диаграмме.

Рабочие характеристики могут быть определены при помощи круговой диаграммы. Для построения диаграммы должны быть известны параметры машины, которые могут быть найдены расчетным или опытным путем.

Рассмотрим построение диаграммы по опытным данным, которые получают из опытов холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода машина должна работать двигателем вхолостую. Напряжение на ее зажимах устанавливается равным номинальному: $U_1 = U_{1н}$. При этом нужно измерить ток холостого хода I_0 и мощность P_0 , потребляемую двигателем. По

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m_1 U_1 I_0}$$

данным измерений находят: Активная составляющая тока холостого хода $I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0$ зависит от потерь холостого хода $P_0 = m I_0^2 r_1 + P_{cl} + P_{\text{мех}} + P_{\text{с.д}}$. Практически $I_0 \approx I_c$. Активная составляющая I_{ca} , как указывалось, определяется потерями $m_1 I_c^2 r_1 + P_{cl}$.

На рис. 3-53 показан вектор $\overline{0A_0} = \overline{I_0}$. Точка A_0 лежит выше точки A_c на отрезок $\overline{A_c A_0}$, приблизительно равный в масштабе мощности потерям на трение $P_{\text{мех}}$ и добавочным потерям в зубцах статора и ротора $P_{\text{с.д}}$:

$$C_p \overline{A_c A_0} = P_{\text{мех}} + P_{\text{с.д}}$$

С некоторым приближением можно принять, что точка A_c делит отрезок $\overline{A_a A_0}$ пополам.

Ток холостого хода I_0 асинхронных двигателей определяется главным образом его реактивной составляющей I_{0p} ($I_0 \approx I_{0p}$). Можно считать, что реактивная составляющая I_{0p} идет на создание только основного поля машины, так как поля рассеяния при холостом ходе незначительны. Она может быть определена из расчета магнитной цепи машины. Так как в магнитную цепь входит воздушный зазор между статором и ротором, на который обычно затрачивается наибольшая часть н. с. всей цепи, то I_{0p} имеет относительно большое значение, превышающее в несколько раз I_{0p} трансформаторов. Обычно для нормальных асинхронных двигателей при $U_1 = U_{1н}$ ток $I_0 = (0,25 \div 0,40) I_{1н}$. Он тем больше, чем больше полюсов имеет машина и чем меньше ее мощность.

У тихоходных двигателей (при $2p > 10$) и специальных двигателей, работающих с повышенным насыщением, ток холостого хода часто получается больше $0,4 I_{1н}$; $\cos \varphi_0 = 0,15 \div 0,05$ (тем больше, чем меньше мощность машины и ее число полюсов).

При опыте короткого замыкания машина должна быть неподвижной при замкнутой накоротко обмотке ротора. Напряжение $U_{1к}$ на зажимах статора устанавливаем таким образом, чтобы ток $I'_{1к} \approx I_{1н}$ при этом измеряем $U_{1к}$, $I'_{1к}$ и $P_{1к}$ и затем определяем:

$$I_{1к} = I'_{1к} \frac{U_{1н}}{U_{1к}}; \quad \cos \varphi_{1к} = \frac{P_{1к}}{m_1 U_{1к} I'_{1к}}; \quad r_k \approx \frac{P_{1к}}{m_1 I_{1к}'^2}$$

(здесь приближенно принято $c_1 = 1$).

Для короткозамкнутых двигателей с глубиной роторного паза свыше $2 \div 2,5$ см, при двойной клетке на роторе и для двигателей с контактными кольцами, имеющих на роторе двухслойную стержневую обмотку при глубине роторных пазов свыше 3 см, опыт короткого замыкания следует проводить при пониженной частоте питающего тока ($f_1 = 5 \div 8$ Гц). При этом можно с некоторым приближением считать, что вытеснения тока в

проводниках обмотки ротора (§ 3-19,в) не будет и что его параметры $\frac{f_{1н}}{f_1} x_2$ и r_2 соответствуют тем же параметрам при изменении s от $-s_k$ до $+s_k$ приблизительно в пределах $\pm (0,05 \div 0,16)$.

По данным измерений определяем:

$$r_k = \frac{P_{1к}}{m_1 I_{1к}'^2}; \quad z'_k = \frac{U_{1к}}{I'_{1к}}; \quad x'_k = \sqrt{z_k'^2 - r_k^2}$$

и затем

$$x_k = \frac{f_{1н}}{f_1} x'_k; \quad z_k = \sqrt{x_k^2 + r_k^2}; \quad I_{1к} = \frac{U_{1н}}{z_k}; \quad \cos \varphi_{1к} = \frac{r_k}{z_k}$$

Возьмем на нижней полуокружности любую точку T_c и соединим ее прямой линией с точкой A_c . Через точки T_c и A_∞ проведем прямую линию и на ней отложим отрезок $\overline{T_c T}$, который удобно разделить на 100 частей (например, $\overline{T_c T} = 100$ мм). Проведем линию $T_c A_k$ и затем — параллель $T S_k$ к линии $T_c A_c$ до пересечений с линией $T_c A_k$. Линия $S_k S_0$, проведенная параллельно $T T_c$, может служить шкалой скольжения. Отрезок $\overline{S_0 S_k} = \overline{T_c T}$ соответствует скольжению, равному 1, или 100%. Если теперь провести линию $A_1 T_c$, то полученный при этом на шкале скольжения отрезок $\overline{S_0 S_1}$ (в долях от $\overline{S_0 S_k}$) определит скольжение при токе статора $I_1 = \overline{0 A_1}$, что доказывается следующим образом:

$$\Delta A_c P'_2 P_{эм} \sim \Delta S_k T_c S_0;$$

$$\Delta A_c A_1 P_{эм} \sim \Delta S_1 T_c S_0,$$

так как

$$\angle P'_2 A_c P_{эм} = \angle S_k T_c T; \quad \angle H A_c A_1 = \angle A_1 T_c A_c; \quad \angle H A_c A_k = \angle A_k T_c A_c,$$

как углы, опирающиеся на общие дуги, а

$$\angle H A_c A_1 = \angle A_c A_1 P_{эм}; \quad \angle H A_c P'_2 = \angle A_c P'_2 P_{эм}; \quad \angle S_0 S_k T_c = \angle S_k T_c T$$

как накрест лежащие углы; из подобия треугольников имеем:

$$\frac{\overline{P_{эм} P'_2}}{\overline{A_c P_{эм}}} = \frac{\overline{S_0 T_c}}{\overline{S_0 S_k}}; \quad \frac{\overline{A_c P_{эм}}}{\overline{P_{эм} A_1}} = \frac{\overline{S_0 S_1}}{\overline{S_0 T_c}};$$

перемножая эти равенства и учитывая (3-186), получаем:

$$s = \frac{\overline{P_{эм} P'_2}}{\overline{P_{эм} A_1}} = \frac{\overline{S_0 S_1}}{\overline{S_0 S_k}}.$$

Можно получить более крупный масштаб для определения s . Для этого надо провести линию, параллельную линии $S_0 S_k$, на расстоянии, в a раз большем $\overline{T_c S_0}$ ($\overline{T_c S'_0} = a \overline{T_c S_0}$). Тогда s будет определяться отрезком $\overline{S'_0 S'_1}$.

Таким образом, из диаграммы можно получить все основные величины, характеризующие работу машины:

$$I_1 = C_I \overline{0 A_1}; \quad P_1 = C_p \overline{P_1 A_1}; \quad P_2 \approx C_p \overline{P_2 A_1}; \quad M = C_M \overline{P_{эм} A_1};$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{\overline{0 K}}{100}; \quad s = \frac{\overline{S_0 S_1}}{\overline{S_0 S_k}}; \quad \eta \approx \frac{P_2}{P_1}.$$

Определение к.п.д. η по диаграмме недостаточно точно. Его можно определить точнее путем расчета, взяв из круговой диаграммы I_1 , $\cos \varphi_1$, I'_2 . В этом случае рассчитываем мощность $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi$ и потери в двигателе:

$$\Sigma P = P'_0 + m_1 I_1^2 r_{175} + m_1 I_2'^2 (r_k - r_1)_{75} + P_{доб},$$

где $P'_0 = P_0 - m_1 I_0^2 r_1$; $I'_2 \approx C_I \overline{A_c A_1}$; r_{175} и $(r_k - r_1)_{75}$ — сопротивления обмоток статора и ротора, приведенные к температуре 75° (§ 2-7); $P_{доб} = 0.005 P_1$. После этого определяем к.п.д.:

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}.$$

Круговая диаграмма позволяет, как указывалось, определить максимальный вращающий момент M_M и его кратность $\frac{M_M}{M_H}$.

При токах в обмотках статора и ротора, соответствующих моменту M_H начинается насыщение зубцов от полей пазового и дифференциального рассеяния, что приводит к уменьшению x_1 , и x_2' и, следовательно, к увеличению M_M . Действительное значение M_M , как показывают опыты для нормальных машин, больше найденного из круговой диаграммы примерно в 1,1 ÷ 1,15 раза.

Определение пусковых характеристик (§ 3-19) по круговой диаграмме не может быть точным, так как при больших токах и скольжениях параметры машины перестают быть постоянными и диаграмма тока перестает быть круговой. Она может быть использована только для построения рабочих характеристик и приближенно для определения M_M .

По круговой диаграмме могут быть также найдены основные величины, характеризующие работу генератора. Для этого режима работы имеем:

$$I_1 = C_I \overline{0A_{1(r)}}; P_1 = C_P \overline{P_2 A_{1(r)}}; P_2 = C_P \overline{P_1 A_{1(r)}}; M = C_M \overline{P_{эм} A_{1(r)}};$$

$$\cos \varphi_{1(r)} = \frac{\overline{OK_{1(r)}}}{100}; s_{1(r)} = \frac{\overline{S_0 S_{1(r)}}}{S_0 S_K}; \eta \approx \frac{P_2}{P_1}.$$

в) Определение рабочих характеристик расчетным путем.

С достаточной для практики точностью рабочие характеристики двигателя могут быть определены расчетным путем (без круговой диаграммы), если известны параметры машины, найденные из ее расчета или по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

Необходимые расчетные формулы составляются при помощи схемы замещения, представленной на рис. 3-49, и соответствующей ей векторной диаграммы, изображенной на рис. 3-56.

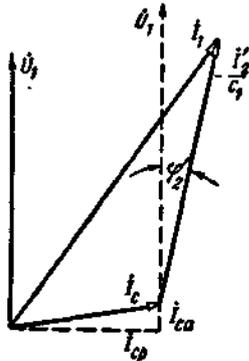


Рис. 3-56. К расчетному определению рабочих характеристик двигателя.

Напишем эти формулы в том порядке, в каком рекомендуется производить расчеты, причем в скобках укажем, как рассчитываются отдельные величины по опытным данным:

$$1) c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}} \cdot (x_1 \approx 0,5x_k; x_{12} \approx \frac{U_1 - I_0 x_1}{I_0 \sin \varphi_0});$$

$$2) z_{k.s} = \sqrt{r_{k.s}'^2 + x_k^2}, \text{ где } r_{k.s}' = r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s}; x_k = x_1 + c_1 x_2'$$

($r_2' \approx r_k - r_1$; r_1 измеряется при постоянном токе; r_k и x_k определяются по данным опыта короткого замыкания);

$$I_2' = \frac{U_1}{z_{к.с}} ; \frac{I_2'}{c_1} = \frac{U_1}{c_1 z_{к.с}} ;$$

$$4) I_{cp} \approx I_{0p} \quad (I_{0p} = I_0 \sin \varphi_0) ;$$

$$5) I_{ca} \approx \frac{P_{c1} + m_1 I_c^2 r_1}{m_1 U_1}$$

(можно принять $P_{c1} \approx \frac{P_0}{2} ; I_c \approx I_0$);

$$6) \cos \varphi_2' = \frac{r'_{к.с}}{z_{к.с}} ; \sin \varphi_2' = \frac{x_{к.с}}{z_{к.с}} ;$$

$$7) \text{ активный ток статора } I_{1a} = I_{ca} + \frac{I_2'}{c_1} \cos \varphi_2' ;$$

$$8) \text{ реактивный ток статора } I_{1p} = I_{cp} + \frac{I_2'}{c_1} \sin \varphi_2' ;$$

$$9) I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} ; \cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} ;$$

$$10) \text{ электрическая мощность статора } P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 ;$$

$$11) \text{ электрические потери в обмотках статора и ротора } P_{\Sigma 1} = m_1 I_1^2 r_1 ; P_{\Sigma 2} = m_1 I_2'^2 r_2' ;$$

$$12) \text{ потери холостого хода за вычетом электрических потерь } P_0' = P_0 - m_1 I_0^2 r_1 = P_{c1} + P_{мех} + P_{с.д} ;$$

$$13) \text{ добавочные потери при нагрузке } P_{доб} = 0,005 P_1 ;$$

$$14) \text{ сумма всех потерь } \Sigma P = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_0' + P_{доб} ;$$

$$15) \text{ мощность на валу } P_2 = P_1 - \Sigma P ;$$

$$16) \text{ к.п.д. } \eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} .$$

При расчете по приведенным формулам нужно задаваться значениями скольжения примерно в пределах $s = (0,2 \div 1,3)$, где номинальное скольжение s_n предварительно может быть взято из кривой рис. 3-57. Достаточно произвести расчеты для пяти-шести значений скольжения, выбирая их приблизительно через равные интервалы.

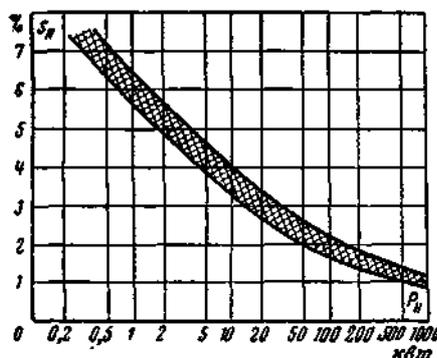


Рис. 3-57. Приближенные кривые зависимости $s_n = f(P_{2H})$

После того как по расчетным точкам построены кривые $I_1, \cos \varphi_1; \eta; s; I_2' = f(P_2)$, определяются номинальные величины, соответствующие номинальной мощности на валу P_{2H} (рис. 3-54).

Расчетным путем можно также определить кратность максимального вращающего момента по соотношению

$$\frac{M_M}{M_H} = \left(\frac{I'_{2M}}{I'_{2H}} \right)^2 \frac{s_H}{s_K},$$

которое получается из равенства

$$M_M = \frac{m_1 I_{2M}'^2 r_2'}{\omega_1 s_K} \quad \text{и} \quad M_H = \frac{m_1 I_{2H}'^2 r_2'}{\omega_1 s_H}.$$

Здесь критическое скольжение [см. (3-130)]

$$s_K = \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1'^2 + x_K^2}};$$

I'_{2M} — приведенный ток ротора, рассчитанный по формулам пп. 1 ÷ 3 для скольжения s_K ; I'_{2H} и s_H берутся из построенных кривых.

3.11.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.12 Практическое занятие №16, 17 (4 часа).

Тема: «Расчёт и построение механической характеристики АД»

3.12.1 Задание для работы:

Научиться строить механическую характеристику асинхронного двигателя

3.12.2 Краткое описание проводимого занятия:

Зависимость электромагнитного момента от скольжения.

Наибольшее значение для оценки свойств асинхронного двигателя имеет *механическая характеристика*, представляющая собой графическую зависимость частоты вращения ротора n_2 от вращающего момента M , т. е. $n_2 = f(M)$ или $M = f(n_2)$. Иногда эта зависимость выражается в виде $M = f(s)$ или $M = f(v)$, где $v = n_2/n_1$ — *относительная частота вращения*. При этом

(4.45)

$$s = (n_1 - n_2)/n_1 = 1 - v.$$

Использование понятий относительной частоты вращения и скольжения придает механической характеристике более общий характер. Для построения механической характеристики можно воспользоваться круговой диаграммой либо формулой

(4.46)

$$M = m_1 U_1^2 R_2' / \omega_1 s [(R_1 + C_1 R_2' / s)^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2],$$

получаемой из формулы

$$M = \Delta P_{э2} / (\omega_1 s) = m_1 I_2'^2 R_2' / \omega_1 s$$

путем подстановки значения тока I_2' из схемы замещения (см. рис. 4.16,а):

$$I_2' = U_1 / \sqrt{(R_1 + C_1 R_2' / s)^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2}$$

Для машин мощностью более 10 кВт величина $C_1 \approx 1$ и формула момента приобретают более простой вид:

(4.46а)

$$M = m_1 U_1^2 R'_2 / \omega_1 s [(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2].$$

Задавая значения s , при известных параметрах двигателя можно определить M и построить искомую механическую характеристику.

Механическая характеристика (рис. 4.21, а и б) имеет максимум момента при частоте вращения $n_2 \approx (0,8 \div 0,9) n_1$; при частоте вращения $n_2 = n_1$ момент вращения $M = 0$, а при $n_2 = 0$ пусковой момент составляет $M_{\text{п}} = (0,3 \div 0,7) M_{\text{max}}$.

Скольжение, при котором момент имеет максимальное значение (критическое скольжение), можно определить из (4.46), взяв производную от момента по скольжению dM/ds и приравняв ее нулю.

Решая уравнение относительно s , получаем критическое скольжение:

(4.47)

$$s_{\text{кр}} = \pm C_1 R'_2 / \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2}.$$



Рис. 1. Механическая характеристика асинхронной машины

В первом приближении, принимая $C_1 = 1,0$ и пренебрегая величиной R_1 в знаменателе [так как $R_1 < (X_1 + X'_2)$], имеем

(4.47а)

$$s_{\text{кр}} = \pm R'_2 / (X_1 + X'_2).$$

Для получения высокого КПД необходимо снижать величину R_2 , вследствие чего максимум момента асинхронного двигателя достигается при относительно высоких частотах вращения. Значение максимального момента получим из (4.46), подставив значение $s_{\text{кр}}$ из (4.47):

(4.48)

$$M_{\text{max}} = \pm m U_1^2 / \{ 2 \omega_1 C_1 [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2}] \},$$

или, приближенно считая $C_1 = 1$ и $R_1 = 0$,

(4.48а)

$$M_{\text{max}} \approx \pm m_1 U_1^2 / [2 \omega_1 (X_1 + X'_2)].$$

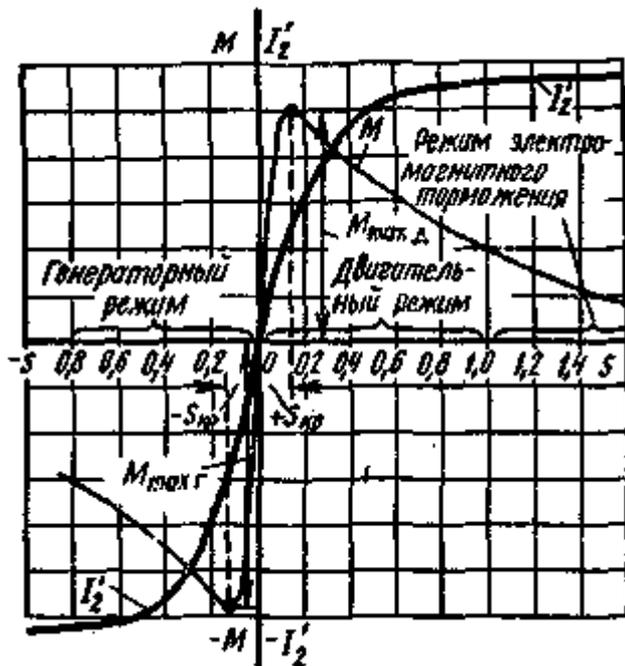


Рис. 2. Зависимость электромагнитного момента и тока ротора от скольжения

Знак «+» относится к двигательному режиму, «-» - к генераторному.

Из уравнения (4.48) и круговой диаграммы видно, что максимальный момент не зависит от активного сопротивления ротора. Это сопротивление определяет лишь скольжение при максимальном моменте.

При увеличении скольжения от $s = 0$ до 1, как следует из круговой диаграммы, ток ротора I_2' монотонно возрастает, в то время как электромагнитный момент M сначала увеличивается с ростом скольжения, достигает максимума при $s = s_{кр}$, а затем уменьшается, несмотря на возрастание тока I_2' (рис. 2).

Физически это объясняется тем, что в формуле момента $M = c_m \Phi_m I_2' \times \cos \psi_2$ при малых скольжениях преобладающее влияние имеет возрастание тока I_2' . При увеличении скольжения свыше $s_{кр}$ ток I_2' возрастает сравнительно мало и преобладающее влияние оказывает уменьшение $\cos \psi_2$, которое происходит вследствие повышения частоты в роторе: $f_2 = s f_1$.

Построение механической характеристики по каталожным данным. На практике широко используют приближенное аналитическое выражение механической характеристики. Согласно (4.21) и (4.32а) электромагнитный момент асинхронного двигателя

(4.49)

$$M = \Delta P_{эл2} / (\omega_1 s) = m_2 I_2'^2 R_2 / (\omega_1 s) = m_2 s E_2'^2 R_2 / [\omega_1 (R_2^2 + s^2 X_2^2)].$$

Принимая приближенно $E_2' \approx \text{const}$, т. е. считая, что магнитный поток машины при изменении нагрузки не изменяется, и приравняв нулю производную dM/ds , полученную из формулы (4.49), можно найти критическое скольжение, соответствующее максимальному моменту, $s_{кр} = \pm R_2 / X_2$ и соответственно максимальный момент

(4.50)

$$M_{max} = \pm m_2 E_2'^2 / (2\omega_1 X_2).$$

Разделив выражение (4.49) на (4.50), после преобразования получим

(4.51)

$$M/M_{max} = 2/(s_{кр}/s + s/s_{кр}).$$

Формула (4.51) является приближенной и, конечно, дает погрешность, так как не учитывает падение напряжения в обмотках статора. Особенно велика погрешность при переходе из двигательного режима в генераторный, где разница в моментах может быть существенной. Однако для исследования одного режима выведенная формула дает приемлемую точность. Это объясняется тем, что в области малых скольжений от $s = 0$ до $s_{кр}$ магнитный поток изменяется незначительно и, следовательно, в этой области формула не может дать большой погрешности, тем более, что точки при $s = 0$ и $s_{кр}$ являются фиксированными.

При скольжениях, близких к единице, формула (4.51), казалось бы, должна давать завышенные значения момента, так как при больших токах сильнее проявляется падение напряжения в статоре. Однако в реальных машинах при скольжениях, близких к единице, уменьшается сопротивление X_2 из-за явления вытеснения тока в проводниках ротора, что ведет к увеличению момента. В результате оказывается, что погрешность, обусловленная пренебрежением падения напряжения в статоре, и погрешность, вызванная изменением параметров ротора, взаимно противоположны, вследствие чего точность приближенной формулы (4.51) достаточна для практических целей

3.12.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.13 Практическое занятие №18, 19 (4 часа).

Тема: «Энергетическая диаграмма АД»

3.13.1 Задание для работы:

Научиться строить энергетическую диаграмму асинхронного двигателя. Оценить ее назначение.

3.13.2 Краткое описание проводимого занятия:

Все преобразования энергии и потери, которые происходят в асинхронном двигателе, можно иллюстрировать при посредстве так называемой "энергетической" диаграммы.

На рис. 1 показана такая диаграмма в форме "потока энергии", который течет слева направо. Как видно из рис. 1, этот "поток" состоит из ряда "рукавов". Притекающая к статору асинхронного двигателя из сети электрическая энергия P_1 изображена на рис. 1 в виде потока наибольшей ширины. По мере течения направо главное "русло" этого потока делается все уже и уже.

"Рукав" потока V_{Fe} изображает потери железа в двигателе (токи Фуко и гистерезис).

Рукав потока $V_1 = m_1 I_1^2 \cdot r_1$ изображает потери меди в статоре.

Потери меди в роторе $m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2$ изображены рукавом потока V_2 и, наконец, рукав потока V_p изображает механические потери.

Таким образом притекающая к статору мощность P_1 оказывается больше тормозной мощности двигателя P_2 на величину суммарных потерь рис. 1.

На диаграмме рис. 1, кроме того, очень наглядно представлены весьма характерные в теории асинхронных двигателей величины мощности P'_2 и P_s .

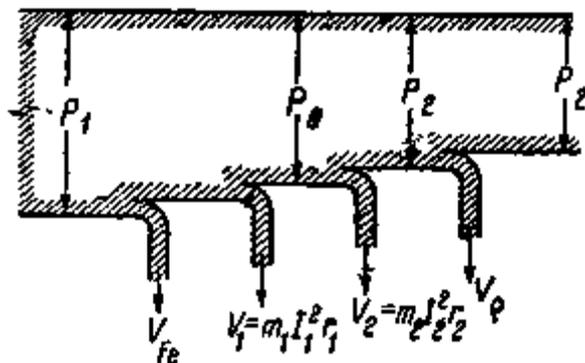


Рис. 1. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

а) Мощность P'_2 есть мощность ротора; эта мощность меньше мощности, подведенной к статору, на величину суммы потерь $V_{Fe} + V_1 + V_2$; если из мощности ротора P_2 вычесть мощность, соответствующую механическим потерям V_p , то получится мощность на валу двигателя W_2 .

б) Мощность P_s носит обычно название мощности вращающегося потока; P_s равно сетевой мощности P_1 за вычетом суммарных потерь в статоре

$$V_{Fe} + V_1.$$

Мощность P_s является, как будет видно ниже, весьма характерной величиной в теории асинхронных двигателей.

3.13.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.14 Практическое занятие №20, 21 (4 часа).

Тема: «Векторная диаграмма СМ»

3.14.1 Задание для работы:

Научиться строить векторную диаграмму синхронной машины.

3.14.2 Краткое описание проводимого занятия:

При анализе работы синхронных генераторов и двигателей обычно используют векторные диаграммы: при качественном — упрощенные диаграммы, справедливые для машин, в которых отсутствует насыщение; при количественном — уточненные диаграммы.

Для цепи якоря неявнополюсного синхронного генератора можно составить уравнение

(6.12)

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a,$$

или

(6.13)

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_a X_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a = \dot{E}_0 + \dot{E}_a - j\dot{I}_a R_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a,$$

где $E_{\sigma a}$ — ЭДС, индуцированная в обмотке якоря потоком рассеяния; $X_{\sigma a}$ — индуктивное сопротивление, обусловленное этим потоком.

Векторная диаграмма неявнополюсной машины (рис. 6.24, а), называемая диаграммой Потье, позволяет определить ЭДС холостого хода E_0 с учетом насыщения, если заданы напряжение, ток нагрузки (по величине и фазе), характеристика холостого

хода и параметры машины. При ее построении по известным падениям напряжения определяют вектор ЭДС

(6.14)

$$\dot{E} = \dot{U} + \dot{I}_a R_a + j \dot{I}_a X_{\sigma a}$$

Так как ЭДС E индуцируется результирующим потоком $\Phi_{рез}$, который создается результирующей МДС $F_{рез} = F_B + k_d F_a$, то по характеристике холостого хода (рис. 6.24, б) по значению $F_{рез}$ можно определить соответствующую ЭДС E . Векторы $F_{рез}$ и $\Phi_{рез}$ совпадают по фазе и оба эти вектора опережают вектор \dot{E} на 90° . Зная $F_{рез}$ и параметры машины, можно найти МДС возбуждения $F_B = F_{рез} - k_d F_a$, а затем по характеристике холостого хода определить ЭДС холостого хода E_0 . Вектор \dot{E}_0 отстает от вектора F_B на 90° . Если требуется перейти от режима холостого хода к режиму нагрузки, построения производят в обратном порядке.

Если машина не насыщена, то векторная диаграмма существенно упрощается, так как в этом случае можно складывать не МДС F_B и $k_d F_a$, а соответствующие им потоки и ЭДС. Упрощенную векторную диаграмму синхронной неявнополюсной машины (рис. 6.25, а) строят по уравнению (6.13).

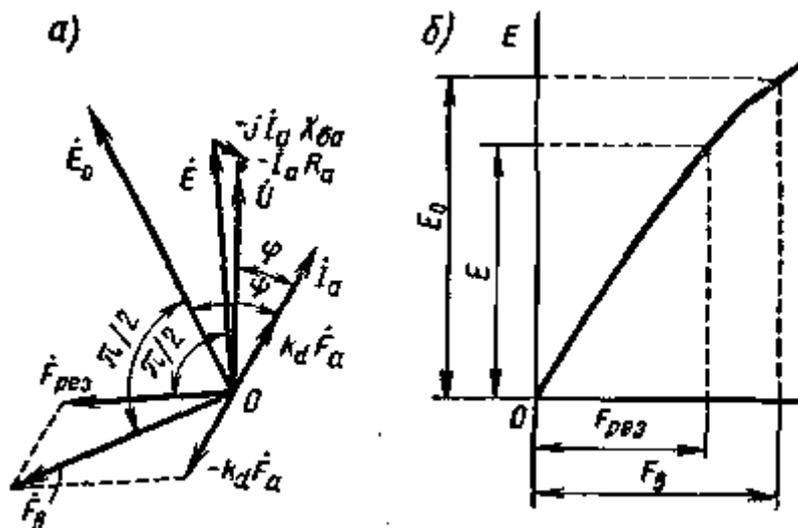
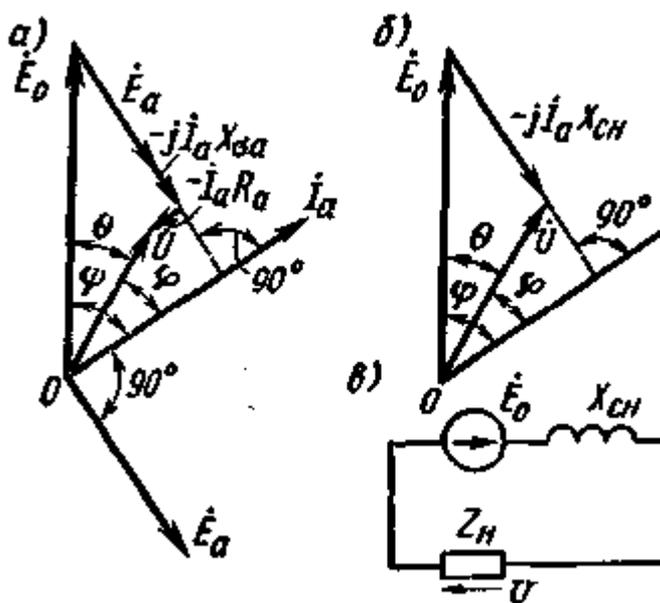


Рис. 6.24. Векторная диаграмма синхронной неявнополюсной машины и характеристика холостого хода

Рис. 6.25. Упрощенные векторные диаграммы и схема замещения синхронной неявнополюсной машины



Поскольку падение напряжения в активном сопротивлении обмотки якоря $I_a R_a$ сравнительно невелико, им можно пренебречь. Заменяя, кроме того, в уравнении (6.13) $\dot{E}_a = -jI_a X_a$, получаем

(6.15)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jI_a X_a - jI_a X_{\sigma a} = E_0 - jI_a X_{cn}.$$

Величину $X_{cn} = X_a + X_{\sigma a}$ называют полным или синхронным индуктивным сопротивлением машины. Упрощенная векторная диаграмма и схема замещения, соответствующие уравнению (6.15), изображены на рис. 6.25, б, в; их широко используют при качественном анализе работы синхронной машины. Необходимо, однако, отметить, что при определении E_0 по упрощенной диаграмме получается несколько большее значение, чем по точной диаграмме (см. рис. 6.24, а), в которой учитывается насыщение.

Угол θ между векторами \dot{U} и \dot{E}_0 называют *углом нагрузки*. При работе синхронной машины в генераторном режиме напряжение U всегда отстает от ЭДС E_0 , в этом случае угол θ считается положительным. Чем больше нагрузка генератора (отдаваемая им мощность), тем больше угол θ .

Явнополюсный генератор. Упрощенную диаграмму синхронной явнополюсной машины можно также построить по общему уравнению (6.12), которое с учетом (6.9) принимает вид

(6.16)

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{\sigma a} - I_a R_a = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - I_a R_a.$$

На рис. 6.26, а приведена векторная диаграмма, соответствующая уравнению (6.16). Если пренебречь малой величиной R_a , то

(6.17)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a}.$$

ЭДС $E_{\sigma a}$, индуцируемую в обмотке якоря потоком рассеяния, можно представить в виде суммы двух составляющих, ориентированных по осям $d-d$ и $q-q$:

(6.18)

$$\dot{E}_{\sigma a} = \dot{E}_{\sigma ad} + \dot{E}_{\sigma aq},$$

где

(6.19)

$$\dot{E}_{\sigma ad} = -jI_d X_{\sigma a}; \quad \dot{E}_{\sigma aq} = -jI_q X_{\sigma a},$$

или

$$E_{\sigma ad} = E_{\sigma a} \sin \psi = I_a X_{\sigma a} \sin \psi = I_d X_{\sigma a};$$

$$E_{\sigma aq} = E_{\sigma a} \cos \psi = I_a X_{\sigma a} \cos \psi = I_q X_{\sigma a}.$$

С учетом (6.18) вместо (6.17) получим

(6.20)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma ad} + \dot{E}_{\sigma aq} = \dot{E}_0 + \dot{E}_d + \dot{E}_q,$$

где

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma ad}; \quad \dot{E}_q = \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma aq}.$$

Векторная диаграмма, построенная по (6.20), приведена на рис. 6.26, б.

Заменяем ЭДС соответствующими индуктивными падениями напряжения:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jI_d X_{ad} - jI_q X_{aq} - jI_d X_{\sigma a} - jI_q X_{\sigma a},$$

или

(6.21)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jI_d X_d - jI_q X_q,$$

где $X_d = X_{ad} + X_{\sigma a}$; $X_q = X_{aq} + X_{\sigma a}$.

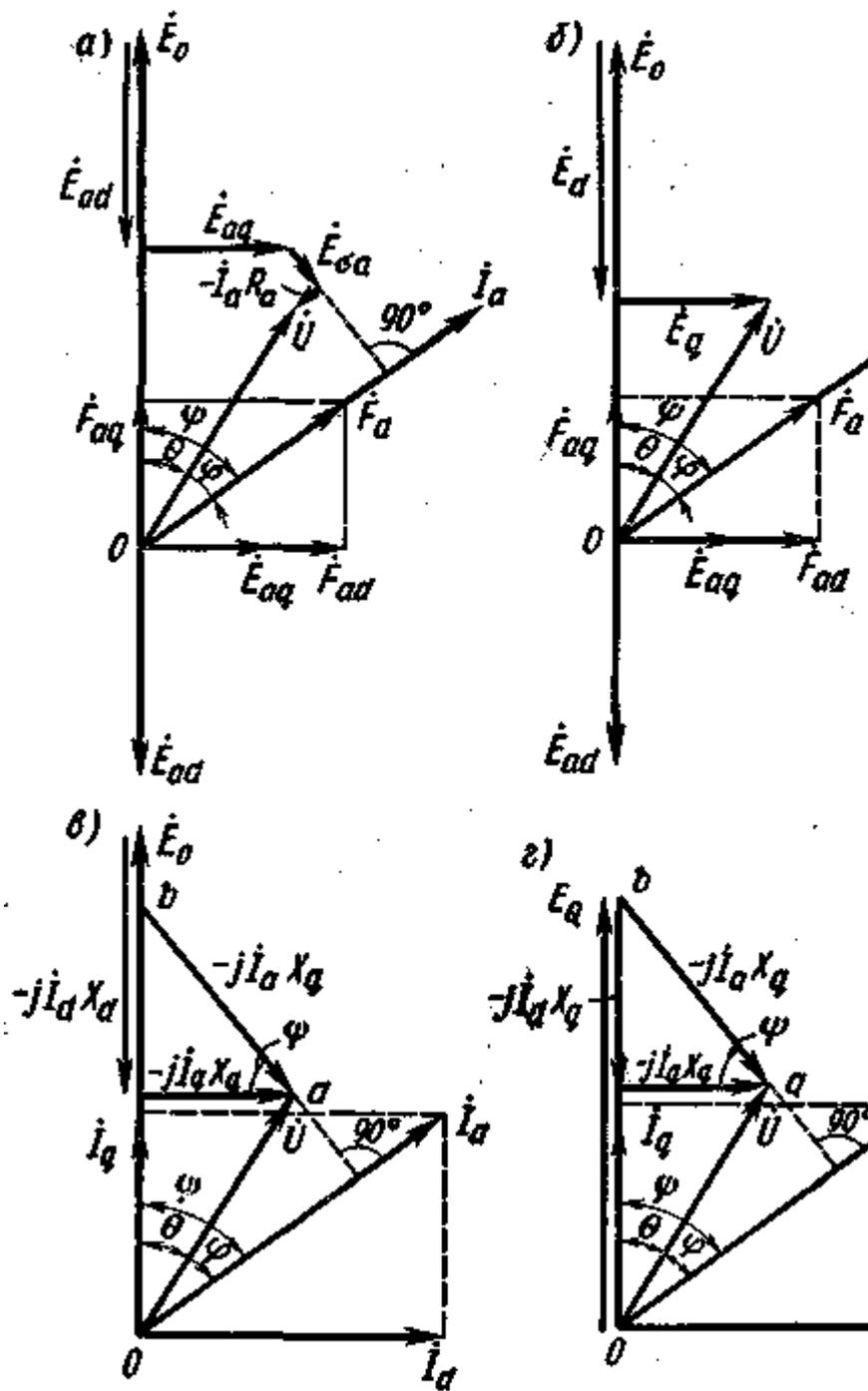


Рис. 6.26.
Упрощенные
векторные
диаграммы
синхронной
явнополюсной
машины

Сопротивления X_d и X_q называют полными или синхронными индуктивными сопротивлениями обмотки якоря по продольной и поперечной осям.

На рис. 6.26, в приведена векторная диаграмма, построенная по (6.21). Если заданы векторы тока \dot{I}_a и напряжения \dot{U} , а угол ψ неизвестен, то его можно определить, проведя из конца вектора напряжения \dot{U} отрезок ab , равный $I_a X_q$ и перпендикулярный вектору тока \dot{I}_a . При этом точка b будет расположена на линии, соответствующей направлению вектора \dot{E}_0 , так как проекция отрезка ab на вектор \dot{E}_q равна модулю этого вектора:

$$\overline{ab} \cos \psi = I_a X_q \cos \psi = I_q X_q = E_q.$$

В некоторых случаях при качественном анализе явнополюсную машину заменяют эквивалентной неявнополюсной, у которой синхронное индуктивное сопротивление по обеим осям равно сопротивлению X_q рассматриваемой явнополюсной машины. Возможность такой замены следует из векторной диаграммы (рис. 6.26, в). Такая

эквивалентная машина имеет вместо ЭДС E_0 эквивалентную ЭДС E_Q (рис. 6.26, г), причем угол нагрузки θ остается одним и тем же.

3.14.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.15 Практическое занятие №22, 23 (4 часа).

Тема: «Построение внешней характеристики СГ»

3.15.1 Задание для работы:

Научиться строить внешнюю характеристику синхронного генератора.

3.15.2 Краткое описание проводимого занятия:

Построение внешних характеристик.

Внешние характеристики синхронного генератора представляют собой зависимости напряжения U от тока нагрузки I_a при неизменных токе возбуждения I_b , угле φ и частоте f_1 (постоянной частоте вращения ротора n_2).

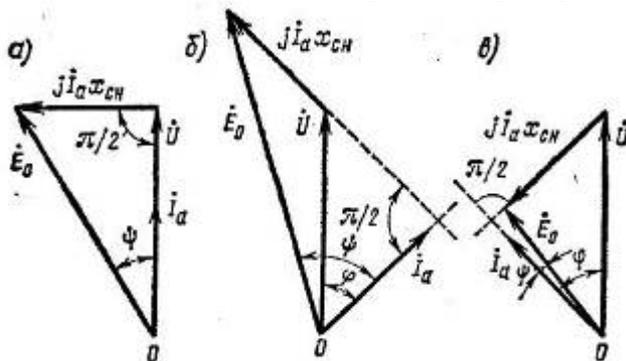


Рис. 1.26 – Упрощенные векторные диаграммы синхронной неявнополюсной машины

Они могут быть построены при помощи векторных диаграмм. Допустим, что при номинальной нагрузке I_a ном генератор имеет номинальное напряжение $U_{ном}$, что достигается соответствующим выбором тока возбуждения. При уменьшении тока нагрузки до нуля напряжение генератора станет равным э.д. с. холостого хода E_0 . Таким образом, векторная диаграмма, построенная при номинальной нагрузке, сразу дает две точки внешней характеристики. Форма внешней характеристики зависит от характера нагрузки, т.е. от угла сдвига фаз φ между \dot{U} и \dot{I}_a , так как в зависимости от этого угла изменяется величина вектора \dot{E}_0 (при заданном значении $U = U_{ном}$).

На рис. 1.26 показаны упрощенные векторные диаграммы генератора с неявно выраженными полюсами для активной (а), активно-индуктивной (б) и активно-емкостной (в) нагрузок. При активной и активно-индуктивной нагрузках $E_0 > U$; при активно-емкостной нагрузке $E_0 < U$. Таким образом, в первых двух случаях при увеличении нагрузки напряжение генератора уменьшается, в третьем – увеличивается. Это объясняется тем, что при активно-емкостной нагрузке имеется продольная намагничивающая составляющая реакции якоря, а в двух других случаях – продольная размагничивающая (при чисто активной нагрузке угол $\psi > 0$).

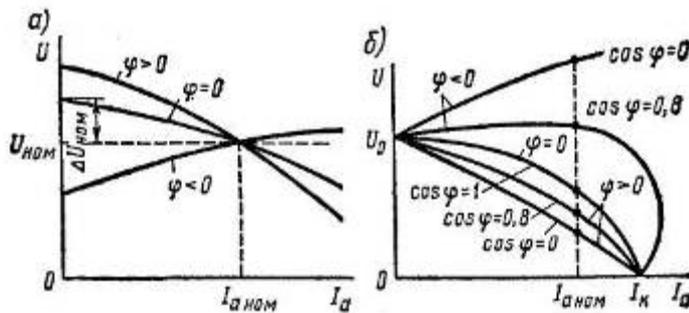


Рис. 1.27 – Внешние характеристики синхронного генератора при различном характере нагрузки

На рис. 1.27 изображены внешние характеристики генератора при различных видах нагрузки, полученные при одинаковом для всех характеристик значении $U_{ном}$ (а) и при одинаковом значении $U_0 = E_0$ (б). Во втором случае при $U = 0$ (короткое замыкание) все характеристики пересекаются в одной точке, соответствующей значению тока короткого замыкания I_K .

Изменение напряжения.

При переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки изменение напряжения характеризуется величиной

$$\Delta u_{\%} = \left[\frac{(U_0 - U_{ном})}{U_{ном}} \right] 100\% \quad (1.24)$$

Обычно генераторы работают с $\cos \varphi = 0,9 \div 0,85$ при отстающем токе. В этом случае $\Delta u\% = 25 \div 35\%$. Чтобы подключенные к генератору потребители работали при напряжении, близком к номинальному, требуется применять специальные устройства, стабилизирующие его выходное напряжение U , например быстродействующие регуляторы тока возбуждения. Чем больше $\Delta u\%$, тем более сложным получается регулирующее устройство, а поэтому желательно иметь генераторы с небольшой величиной $\Delta u\%$. Однако небольшую величину $\Delta u\%$ можно получить, уменьшая синхронное индуктивное сопротивление $x_{сн}$ (в неявнополюсных машинах) или соответственно x_d и x_q (в явнополюсных машинах), т.е. поток якоря, для чего требуется увеличивать воздушный зазор между ротором и статором. При таком способе уменьшения $\Delta u\%$ необходимо увеличивать м.д. с. обмотки возбуждения, что заставляет увеличивать размеры этой обмотки и делать в конечном итоге синхронную машину более дорогой.

В мощных турбогенераторах мощность ограничивается именно размерами ротора, на котором размещена обмотка возбуждения. Поэтому в современных турбогенераторах с повышением мощности машины одновременно возрастает и изменение напряжения $\Delta u\%$.

В гидрогенераторах (по сравнению с турбогенераторами) воздушный зазор обычно имеет гораздо большую величину, поэтому у них относительно слабее проявляется реакция якоря, т.е. они имеют меньшие синхронные индуктивные сопротивления, выраженные в относительных единицах, что обуславливает и меньшее изменение напряжения $\Delta u\%$.

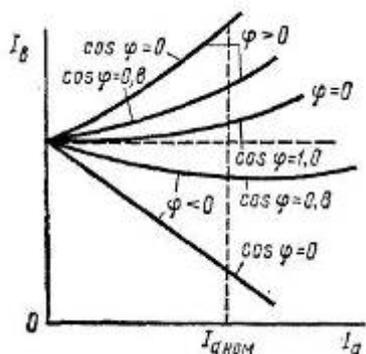


Рис. 1.28 – Регулировочные характеристики синхронного генератора при различном характере нагрузки

Регулировочные характеристики синхронного генератора.

Эти характеристики (рис. 1.28) представляют собой зависимости тока возбуждения $I_{\text{в}}$ от тока нагрузки $I_{\text{а}}$ при неизменных напряжении U , угле φ и частоте f_1 . Они показывают, как надо изменять ток возбуждения генератора, чтобы поддерживать его напряжение неизменным при изменении тока нагрузки. Очевидно, что при возрастании нагрузки необходимо при $\varphi > 0$ увеличивать ток возбуждения, а при $\varphi < 0$ – уменьшать его. Чем больше угол φ по абсолютной величине, тем в большей степени требуется изменять ток возбуждения.

3.15.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.

3.16 Практическое занятие №24, 25 (4 часа).

Тема: «Параллельная работа СГ с сетью»

3.16.1 Задание для работы:

Изучить особенности параллельной работы синхронного генератора с электрической централизованной сетью.

3.16.2 Краткое описание проводимого занятия:

Особенности работы генератора на сеть большой мощности. Обычно на электростанциях устанавливают несколько синхронных генераторов для параллельной работы на общую электрическую сеть. Это обеспечивает увеличение общей мощности электростанции (при ограниченной мощности каждого из установленных на ней генераторов), повышает надежность энергоснабжения потребителей и позволяет лучше организовать обслуживание агрегатов. Электрические станции, в свою очередь, объединяют для параллельной работы в мощные энергосистемы, позволяющие наилучшим образом решать задачу производства и распределения электрической энергии. Таким образом, для синхронной машины, установленной на электрической станции или на каком-либо объекте, подключенном к энергосистеме, типичным является режим работы на сеть большой мощности, по сравнению с которой собственная мощность генератора является очень малой. В этом случае с большой степенью точности можно принять, что генератор работает параллельно с сетью бесконечно большой мощности т. е. что *напряжение сети U_c и ее частота f_c являются постоянными, не зависящими от нагрузки данного генератора.*

Включение генератора на параллельную работу с сетью. В рассматриваемом режиме необходимо обеспечить возможно меньший бросок тока в момент присоединения генератора к сети. В противном случае возможны срабатывание защиты поломка генератора или первичного двигателя.

Ток в момент подключения генератора к сети будет равен нулю, если удастся обеспечить равенство мгновенных значений напряжений сети u_c и генератора u_{Γ} :

(6.27)

$$U_{cm} \sin(\omega_c t - \alpha_c) = U_{\Gamma m} \sin(\omega_{\Gamma} t - \alpha_{\Gamma}).$$

На практике выполнение условия (6.27) сводится к выполнению трех равенств: значений напряжений сети и генератора $U_{cm} = U_{\Gamma m}$ или $U_c = U_{\Gamma}$; частот $\omega_c = \omega_{\Gamma}$ или $f_c = f_{\Gamma}$; их начальных фаз $\alpha_c = \alpha_{\Gamma}$ (совпадение по фазе векторов \dot{U}_c и \dot{U}_{Γ}). Кроме того, для трехфазных генераторов нужно согласовать порядок чередования фаз.

Совокупность операций, проводимых при подключении генератора к сети, называют синхронизацией. Практически при синхронизации генератора сначала устанавливают номинальную частоту вращения ротора, что обеспечивает приближенное равенство частот $f_c \approx f_r$ а затем, регулируя ток возбуждения, добиваются равенства напряжения $U_c = U_r$. Совпадение по фазе векторов напряжений сети и генератора ($\alpha_c = \alpha_r$) контролируется специальными приборами — *ламповым и стрелочными синхроскопами*.

Ламповые синхроскопы применяют для синхронизации генераторов малой мощности, поэтому обычно их используют в лабораторной практике. Этот прибор представляет собой три лампы, включенные между фазами генератора и сети (рис. 6.32, а). На каждую лампу действует напряжение $\Delta u = u_c - u_r$, которое при $f_c \neq f_r$ изменяется с частотой $\Delta f = f_c - f_r$, называемой *частотой биений* (рис. 6.32, б). В этом случае лампы мигают. При $f_c \approx f_r$ разность Δu изменяется медленно, вследствие чего лампы постепенно загораются и погасают.

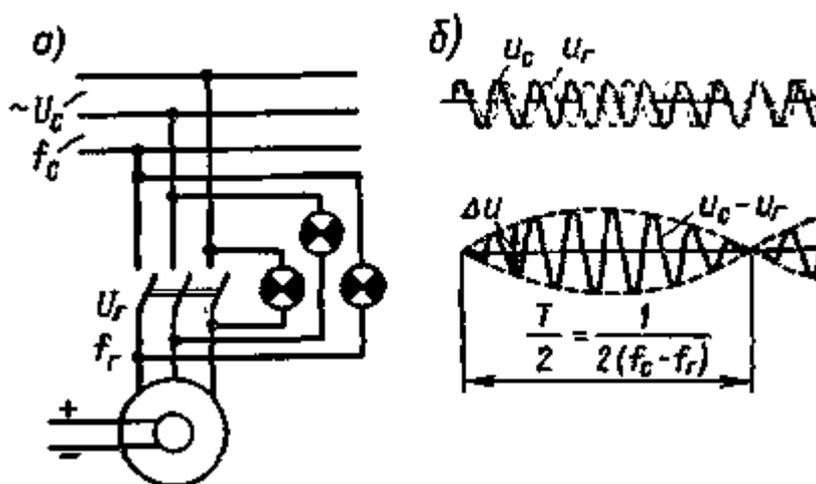


Рис. 6.32. Схема подключения синхронного генератора к сети с помощью лампового синхроскопа (а) и кривые изменения напряжений u_c и u_r перед включением генератора (б)

Обычно генератор подключают к сети в тот момент, когда разность напряжений Δu на короткое время становится близкой нулю, т. е. в середине периода погасания ламп. В этом случае выполняется условие совпадения по фазе векторов \dot{U}_c и \dot{U}_r . Для более точного определения этого момента часто применяют нулевой вольтметр, имеющий растянутую шкалу в области нуля. После включения генератора в сеть дальнейшая синхронизация частоты его вращения, т. е. обеспечение условия $n_2 = n_1$, происходит автоматически.

Генераторы большой мощности синхронизируют с помощью стрелочных синхроскопов, работающих по принципу вращающегося магнитного поля. В этих приборах при $f_c \neq f_r$ стрелка вращается с частотой, пропорциональной разности частот $f_c - f_r$, в одну или другую сторону в зависимости от того, какая из этих частот больше. При $f_c = f_r$ стрелка устанавливается на нуль; в этот момент и следует подключать генератор к сети. На электрических станциях обычно используют автоматические приборы для синхронизации генераторов без участия обслуживающего персонала.

Довольно часто применяют метод самосинхронизации, при котором генератор подключают к сети при отсутствии возбуждения (обмотка возбуждения замыкается на активное сопротивление). При этом ротор разгоняют до частоты вращения, близкой к синхронной (допускается скольжение до 2%), за счет вращающего момента первичного двигателя и асинхронного момента, обусловленного индуцированием тока

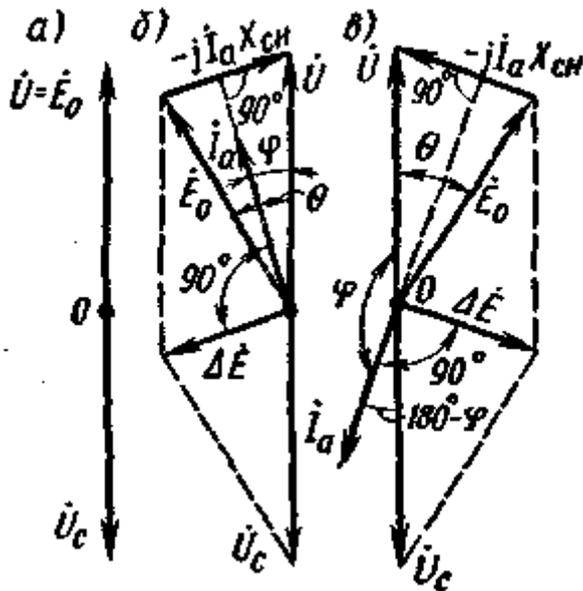


Рис. 6.33. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного генератора при параллельной работе с сетью

в демпферной обмотке. После этого в обмотку возбуждения подают постоянный ток, что приводит к втягиванию ротора в синхронизм. При методе самосинхронизации в момент включения генератора возникает сравнительно большой бросок тока, который не должен превышать $3,5I_{a\text{ном}}$.

Регулирование активной мощности. После включения генератора в сеть его напряжение U установится равным напряжению сети U_c . Относительно внешней нагрузки напряжения U и U_c совпадают по фазе, а по контуру «генератор — сеть» находятся в противофазе, т. е. $\dot{U} = -\dot{U}_c$ (рис. 6.33, а). При точном выполнении указанных трех условий, необходимых для синхронизации генератора, его ток I_a после подключения машины к сети равняется нулю. Рассмотрим, какими способами можно регулировать ток I_a при работе генератора параллельно с сетью на примере неявнополюсного генератора.

Ток, проходящий по обмотке якоря неявнополюсного генератора, можно определить из уравнения (6.23)

$$(6.28)$$

$$\dot{I}_a = (\dot{E}_0 - \dot{U}) / (jX_{ch}) = -j(\dot{E}_0 - \dot{U}) / X_{ch}.$$

Так как $U = U_c = \text{const}$, то силу тока I_a можно изменять только двумя способами — изменяя ЭДС E_0 по величине или по фазе. Если к валу генератора приложить внешний момент, больший момента, необходимого для компенсации магнитных потерь мощности в стали и механических потерь, то ротор приобретает ускорение, вследствие чего вектор \dot{E}_0 смещается относительно вектора \dot{U} на некоторый угол θ в направлении вращения векторов (рис. 6.33, б). При этом возникает некоторая небалансная ЭДС ΔE , приводящая согласно (6.28) к появлению тока I_a . Возникающую небалансную ЭДС $\Delta E' = \dot{E}_0 - \dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{U}_c = j\dot{I}_a X_{ch}$ можно показать на векторной диаграмме (рис. 6.33, б). Вектор тока I_a отстает от вектора ΔE на 90° , поскольку его величина и направление определяются индуктивным сопротивлением X_{ch} .

При работе в рассматриваемом режиме генератор отдает в сеть активную мощность $P = mUI_a \cos \varphi$ и на вал его действует электромагнитный тормозной момент, который уравнивает вращающий момент первичного двигателя, вследствие чего

частота вращения ротора остается неизменной. Чем больше внешний момент, приложенный к валу генератора, тем больше угол θ , а следовательно, ток и мощность, отдаваемые генератором в сеть.

Если к валу ротора приложить внешний тормозной момент, то вектор \dot{E}_0 будет отставать от вектора напряжения \dot{U} на угол θ (рис. 6.33, в). При этом возникают небалансная ЭДС $\Delta\dot{E}$ и ток \dot{I}_a , вектор которого отстает от вектора $\Delta\dot{E}$ на 90° . Так как угол $\varphi > 90^\circ$, активная составляющая тока находится в противофазе с напряжением генератора. Следовательно, в рассматриваемом режиме активная мощность $P = mUI_a \cos \varphi$ забирается из сети, и машина работает двигателем, создавая электромагнитный вращающий момент, который уравнивает внешний тормозной момент; частота вращения ротора при этом снова остается неизменной.

Таким образом, для увеличения нагрузки генератора необходимо увеличивать приложенный к его валу внешний момент (т. е. вращающий момент первичного двигателя), а для уменьшения нагрузки — уменьшать этот момент. При изменении направления внешнего момента (если вал ротора не вращать, а тормозить) машина автоматически переходит из генераторного в двигательный режим.

Регулирование реактивной мощности. Если в машине, подключенной к сети и работающей в режиме холостого хода (рис. 6.34, а), увеличить ток возбуждения I_b , то возрастет ЭДС E_0 (рис. 6.34, б), возникнет небалансная ЭДС $\Delta\dot{E} = -jI_a X_{сн}$ и по обмотке якоря будет проходить ток I_a , который согласно (6.28) определяется только индуктивным сопротивлением $X_{сн}$ машины. Следовательно, ток \dot{I}_a реактивный: он отстает по фазе от напряжения \dot{U} на угол 90° или опережает на тот же угол напряжение сети \dot{U}_c . При уменьшении тока возбуждения ток \dot{I}_a изменяет свое направление: он опережает на 90° напряжение \dot{U} (рис. 6.34, в) и отстает на 90° от напряжения \dot{U}_c . Таким образом, при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока I_a , т. е. реактивная мощность машины Q . Активная составляющая тока I_a в рассматриваемых случаях равна нулю. Следовательно, активная мощность $P = 0$, и машина работает в режиме холостого хода.

При работе машины под нагрузкой создаются те же условия: при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока I_a , т. е. реактивная мощность машины Q . Режим возбуждения синхронной машины с током $I_{в.п}$, при

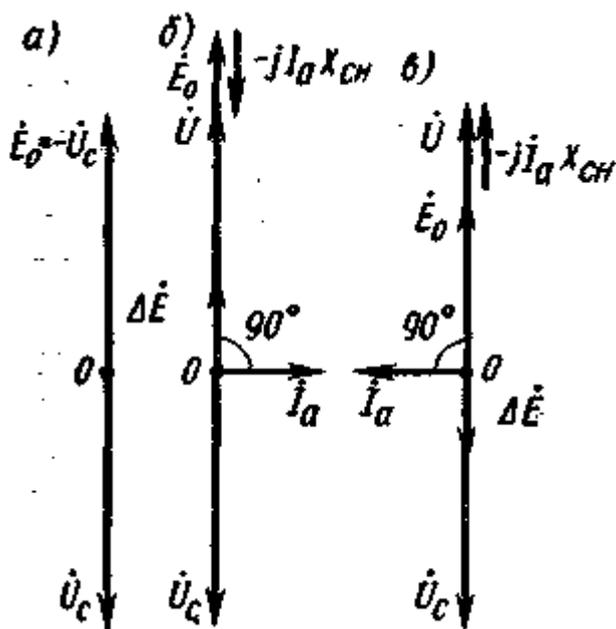


Рис. 6.34. Упрощенные векторные диаграммы неявнополусного синхронного генератора при параллельной работе с сетью и отсутствии активной нагрузки

котором реактивная составляющая тока I_a равна нулю, называют режимом полного или нормального возбуждения. Если ток возбуждения I_b больше тока $I_{b.п}$, при котором имеется режим полного возбуждения, то ток I_a содержит отстающую от U реактивную составляющую, что соответствует активно-индуктивной нагрузке генератора. Такой режим называют режимом перевозбуждения. Если ток возбуждения I_b меньше тока $I_{b.п}$, то ток I_a содержит реактивную составляющую, опережающую напряжение U , что соответствует активно-емкостной нагрузке генератора. Такой режим называют режимом недовозбуждения.

Перевозбужденная синхронная машина, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна емкости. Машину, специально предназначенную для работы в таком режиме, называют синхронным компенсатором и используют для повышения коэффициента мощности электрических установок и стабилизации напряжения в электрических сетях. Недовозбужденная синхронная машина, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна индуктивности.

Возникновение реактивной составляющей тока I_a физически объясняется тем, что при работе синхронной машины на сеть бесконечно большой мощности суммарный магнитный поток сцепленный с каждой из фаз, $\Sigma\Phi = \Phi_{рез} + \Phi_{\sigma} = \Phi_{\delta} + \Phi_a + \Phi_{\sigma}$ не зависит от тока возбуждения и при всех условиях остается неизменным, так как

$$(6.29) \\ \dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_{\sigma a} = -\dot{U}_c = const.$$

Следовательно, если ток возбуждения I_b больше тока, требуемого для полного возбуждения, то возникает отстающая составляющая тока I_a , которая создает размагничивающий поток реакции якоря Φ_a ; если ток I_b меньше тока, необходимого для полного возбуждения, то возникает опережающая составляющая тока I_a , которая создает подмагничивающий поток реакции якоря Φ_a . Во всех случаях суммарный поток машины $\Sigma\Phi$ автоматически поддерживается неизменным.

3.16.3 Результаты и выводы:

Написать отчет и сделать выводы по практическому занятию.