

В. А. СОЛОМИН
Л. Л. ЗАМШИНА
Н. А. ТРУБИЦИНА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 3

Машины переменного тока

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ





РИИПС - РИИЖТ - РГУПС

ISBN 978-5-88814-912-6



9 785888 149126

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

В. А. Соломин, Л. Л. Замшина, Н. А. Трубицина

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебное пособие

Часть 3

МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Утверждено
учебно-методическим советом
университета

Ростов-на-Дону
РГУПС
2021

УДК 621.313(07) + 06

Рецензенты: доктор технических наук, профессор Б. Н. Лобов (ЮРГТУ (НПИ));
кандидат технических наук, доцент Н. А. Попова (РГУПС)

Соломин, В. А.

Электрические машины: учебное пособие : в 3 ч. / В. А. Соломин, Л. Л. Замшина, Н. А. Трубицина ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021.

ISBN 978-5-88814-909-6

Ч. 3 : Машины переменного тока / В. А. Соломин, Л. Л. Замшина, Н. А. Трубицина. – 94 с.

ISBN 978-5-88814-912-6

Содержатся теоретические сведения о машинах переменного тока, их конструкции, принципе действия, основных параметрах и характеристиках. Рассматриваются основные понятия и определения, режимы работы асинхронных и синхронных электрических машин, схемы подключения. Изучаются физические процессы и явления в машинах переменного тока. Приводятся сведения о различных типах асинхронных и синхронных электрических машинах, их конструктивном исполнении, характеристиках.

Для студентов очной и заочной форм обучения по специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» всех специализаций, специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» всех специализаций, по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электромеханика», 15.03.03 «Прикладная механика», профиль «Проектно-конструкторское обеспечение машиностроительных производств», при изучении курсов «Электрические машины», «Электрические машины и аппараты», «Тяговые электрические машины», «Электрический привод», а также для обучающихся магистратуры и аспирантуры.

Одобрено к изданию кафедрой «Электрические машины и аппараты».

ISBN 978-5-88814-912-6 (ч. 3)
ISBN 978-5-88814-909-6

© Соломин В. А., Замшина Л. Л.,
Трубицина Н. А., 2021
© ФГБОУ ВО РГУПС, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ОСНОВЫ ИХ ТЕОРИИ	5
1.1 Классификация машин переменного тока	5
1.2 Вращающееся магнитное поле	7
1.3 Основы теории асинхронных машин при неподвижном роторе	10
1.3.1 Общие сведения	10
1.3.2 Холостой ход асинхронной машины при неподвижном роторе	11
1.3.3 Короткое замыкание асинхронной машины при неподвижном роторе ..	12
1.3.4 Приведенная асинхронная машина при неподвижном роторе	13
1.4 Параметры асинхронной машины при вращающемся роторе	14
2 АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ	15
2.1 Асинхронные двигатели	15
2.1.1 Принцип действия асинхронного двигателя	15
2.1.2 Схемы замещения фазы асинхронного двигателя	17
2.1.3 Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя	18
2.1.4 Вращающий момент асинхронного двигателя	20
2.1.5 Механическая характеристика асинхронной машины	21
2.1.6 Круговая диаграмма асинхронной машины	23
2.1.7 Способы пуска в ход асинхронных двигателей	32
2.1.8 Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя	35
2.1.9 Обмотки статоров машин переменного тока	38
2.1.10 Тормозные режимы работы асинхронной машины	39
2.2 Разновидности асинхронных машин	40
2.2.1 Асинхронный генератор с самовозбуждением	40
2.2.2 Линейные асинхронные двигатели для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта	41
2.2.3 Линейный асинхронный двигатель с повышенными усилиями боковой самостабилизации	47
2.2.4 Регулируемый линейный асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента	50
2.2.5 Шаговые асинхронные двигатели	59
3 СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ	65
3.1 Общие сведения	65
3.2 Конструкция и принцип действия синхронных машин	66
3.3 Реакция якоря синхронного генератора	68
3.4 Реакция якоря СГ при смешанной нагрузке	69
3.5 Уравнение ЭДС синхронного явнополюсного генератора	71
3.6 Векторная диаграмма синхронного явнополюсного генератора при активно-индуктивной нагрузке	72
3.7 Характеристики синхронного генератора	74
3.8 Параллельная работа синхронных генераторов. Условия включения	76
3.8.1 Метод точной синхронизации	77

3.8.2 Включение генератора на параллельную работу с сетью методом самосинхронизации (грубой синхронизации)	79
3.9 Преобразованная векторная диаграмма синхронного генератора	80
3.10 Энергетическая диаграмма мощностей синхронного генератора	81
3.11 Электромагнитные мощность и момент синхронной машины	82
3.12 Работа синхронного генератора при постоянной мощности и переменном возбуждении	83
3.13 Синхронизирующие мощность и момент синхронной машины	85
3.14 Синхронные двигатели. Способы пуска в ход	87
3.15 Внезапное короткое замыкание синхронного генератора	89
3.16 Синхронный компенсатор	91
Библиографический список	93

1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ОСНОВЫ ИХ ТЕОРИИ

1.1 Классификация машин переменного тока

Электрические машины переменного тока, далее называемые машинами переменного тока, безусловно, преобладают в системах производства и преобразования электрической энергии. Общим для всех машин переменного тока является то, что их принцип действия основан на использовании вращающихся магнитных полей, поэтому во многом их теория является общей.

Машины переменного тока бывают синхронными, асинхронными и коллекторными.

У *синхронных машин* (далее – СМ) ротор и магнитное поле вращаются с одинаковой частотой, т. е. в такт – синхронно. СМ применяются в качестве двигателей, генераторов и компенсаторов реактивной мощности. Синхронная машина, как преобразователь энергии индукционного типа, содержит индуктор и якорь. Только у синхронных машин в качестве индуктора используется вращающийся ротор, а в качестве якоря – обмотка неподвижного статора. Основное назначение синхронных машин в настоящее время – это производство электрической энергии. На всех электрических станциях установлены синхронные генераторы, роторы которых приводятся во вращение турбинами, передающими синхронным генераторам (СГ) механическую энергию. Синхронные генераторы различают по типу турбин.

На тепловых и атомных электростанциях установлены высокоскоростные четырех- и двухполюсные СГ с частотами вращения 1500 или 3000 оборотов в минуту, вырабатывающие электроэнергию промышленной частоты и приводимые во вращение *паровыми турбинами*. На гидроэлектростанциях роторы синхронных генераторов приводятся во вращение *водяными турбинами*. Эти машины называют гидрогенераторами, и частота их вращения невелика. Для выработки электроэнергии промышленной частоты тихоходные гидрогенераторы выполняются с большим числом полюсов.

Российская Федерация находится в числе мировых лидеров по производству мощных турбо- и гидрогенераторов. Роторы турбогенераторов выполняются «гладкими», и их называют *неявнополюсными*. Роторы турбогенераторов изготавливают из цельных поковок легированной стали, в которых фрезеруются пазы для укладки обмотки возбуждения. Обмотка возбуждения крепится в пазах при помощи алюминиевых клиньев, в которых имеются каналы для забора охлаждающего газа, обычно водорода. Лобовые части обмотки возбуждения закрывают при помощи стальных конструкций, называемых *каппами*. Длина активной части ротора мощного турбогенератора может достигать 8 метров, а его диаметр – 1,5 метра. Мощность современных турбогенераторов может достигать 1 000 000 кВ·А. Для дальнейшего увеличения мощности турбогенератора нужно или увеличивать его габариты, чего не позволяют возможности современной металлургии, или повысить интенсивность охлаждения активных частей генератора. Развитие криогенных технологий будет способствовать про-

грессу в создании эффективных турбогенераторов. Роторы гидрогенераторов выполняются *явнополюсными*. Полюсы ротора с катушками обмотки возбуждения крепятся на ободе ротора. Чем меньше частота вращения водяной турбины, тем больше полюсов содержит ротор. Ротор мощного синхронного генератора (500 000 кВ·А) может иметь диаметр до 10–12 метров при активной длине его до 2 метров.

Мощные синхронные генераторы выпускаются малыми сериями. Количество таких генераторов определяется числом энергоблоков электростанции. Энергоблок электростанции включает в себя турбину и генератор. Составной частью энергоблока можно считать повышающий трансформатор, питающий линию электропередачи энергии.

Статоры всех машин переменного тока, в том числе и СГ, имеют цилиндрическую форму и содержат трёхфазную обмотку, размещённую в пазах, выполненных во внутренней расточке сердечника, набранного из отдельных пластин электротехнической стали.

Синхронные двигатели (СД) применяются в электрических приводах с постоянной частотой вращения, а синхронные компенсаторы, являющиеся по своей сути СД, работающими в режиме перевозбуждения на холостом ходу, используют в качестве генераторов ёмкостного тока, повышающих коэффициент мощности линий электропередач, предприятий, их цехов и участков.

Асинхронная машина (АМ) содержит статор, который играет роль индуктора, и ротор, выполняющий функцию якоря. Статор содержит сердечник, в пазах которого размещена, как правило, трехфазная обмотка, способная создавать вращающееся магнитное поле. Обмотка вращающейся части АМ (ротора) может быть двух типов: фазной или короткозамкнутой. Если обмотка содержит три фазы, то такой ротор называется *фазным*. Наиболее часто в пазах сердечника ротора размещены электропроводящие стержни, соединённые по обоим торцам цилиндрического ротора электропроводящими кольцами. Такой ротор называют ротором с короткозамкнутой обмоткой или просто *короткозамкнутым*.

В асинхронных машинах ротор и магнитное поле вращаются с неодинаковой скоростью, т. е. не синхронно. Как правило, ротор вращается медленнее, чем магнитное поле. Эти машины используются преимущественно в качестве двигателей. Асинхронные двигатели (АД), главным образом короткозамкнутые, являются самым распространённым типом электродвигателей из-за простоты конструкции, высокой надёжности и низкой стоимости. В качестве генераторов АМ используются редко, поскольку, отдавая в сеть активную мощность, они потребляют из неё индуктивный ток.

Асинхронные двигатели обычно работают от системы трёхфазного тока, значительно реже бывают двух- или однофазными.

Коллекторные машины переменного тока по своей сути являются асинхронными и имеют отдельную теорию, поэтому в общем курсе электрических машин не рассматриваются.

1.2 Вращающееся магнитное поле

Рассмотрим получение вращающегося магнитного поля на примере асинхронной машины с простейшим вариантом двухполюсной трёхфазной обмотки, у которой катушки фаз выполнены одновитковыми, и их оси сдвинуты в пространстве на 120 градусов (рис. 1.1, а). Обмотка статора АМ подключена к источнику трехфазного напряжения. Ротор АМ в нашем случае выполнен короткозамкнутым. Простейшая АМ показана на рисунке 1.1, а, на котором изображены ее поперечное сечение и векторы токов в фазах обмотки при $\omega t = 0^\circ$ (рис. 1.1, б).

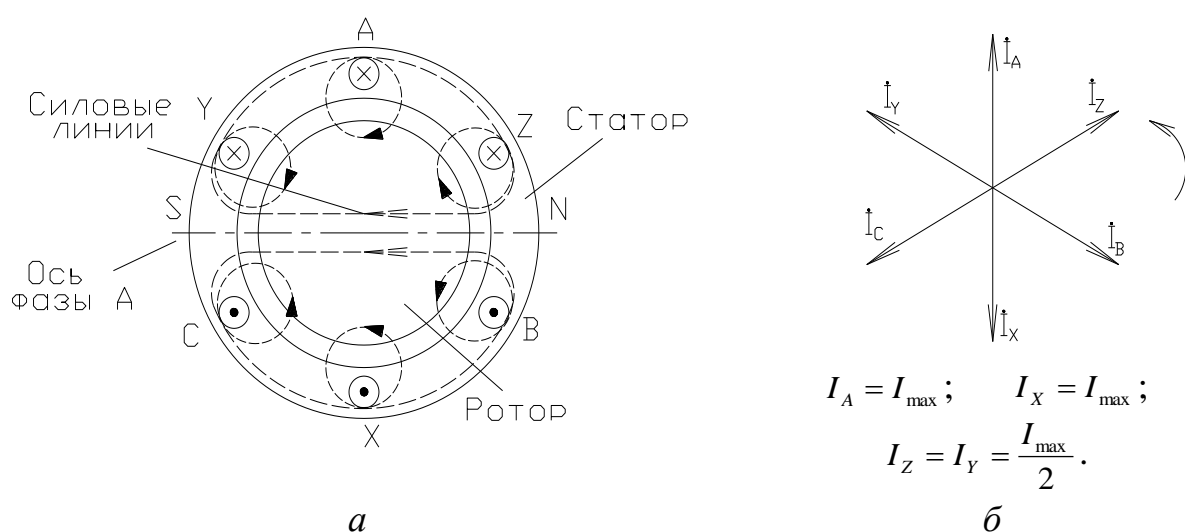


Рис. 1.1. Силовые линии магнитного поля асинхронной машины с двухполюсной трёхфазной обмоткой при $\omega t = 0^\circ$:

а – поперечное сечение асинхронной машины;

б – векторная диаграмма токов

Обозначим на рисунке положительный ток как « \times », а отрицательный – « \cdot ». По правилу буравчика определим направление магнитных потоков, создаваемых токами обмоток. В общей магнитной системе двигателя отдельные магнитные поля сложатся и образуют общее магнитное поле, две средних силовых линии которого обозначены штриховыми линиями.

Видно, что в результате образовались два полюса магнитного поля: северный (N) и южный (S), каждый из которых занимает одно полюсное деление.

Если мысленно цилиндр статора разрезать по образующей и вытянуть в длину, то получим картину распределения токов в обмотке, изображённую на рисунке 1.2.

Определим направление магнитных потоков, созданных токами отдельных фаз, и построим средние силовые линии.

Видно, что магнитное поле при изменении фазы токов на 30 градусов повернулось также на 30 градусов в направлении часовой стрелки. Если рассмотреть момент времени $\omega t = 60^\circ$, то магнитное поле повернётся ещё на 30 граду-

сов т. е. за один период изменения токов в обмотках в двухполюсной машине магнитное поле совершит один полный оборот. При частоте тока 50 Гц за одну секунду в двухполюсной машине магнитное поле совершит 50 полных оборотов, т. е. $n_1 = f_1$, где n_1 – частота вращения магнитного поля (синхронная частота вращения); f_1 – частота тока.

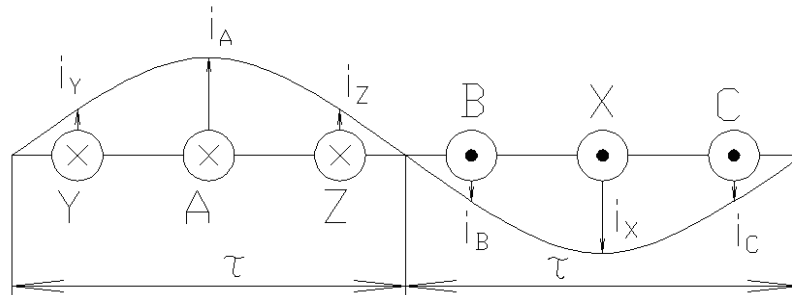


Рис. 1.2. Распределение токов в фазах двухполюсной обмотки

Рассмотрим картину при изменении фазы токов на 30 градусов ($\omega t = 30^\circ$) (рис. 1.3, а и б).

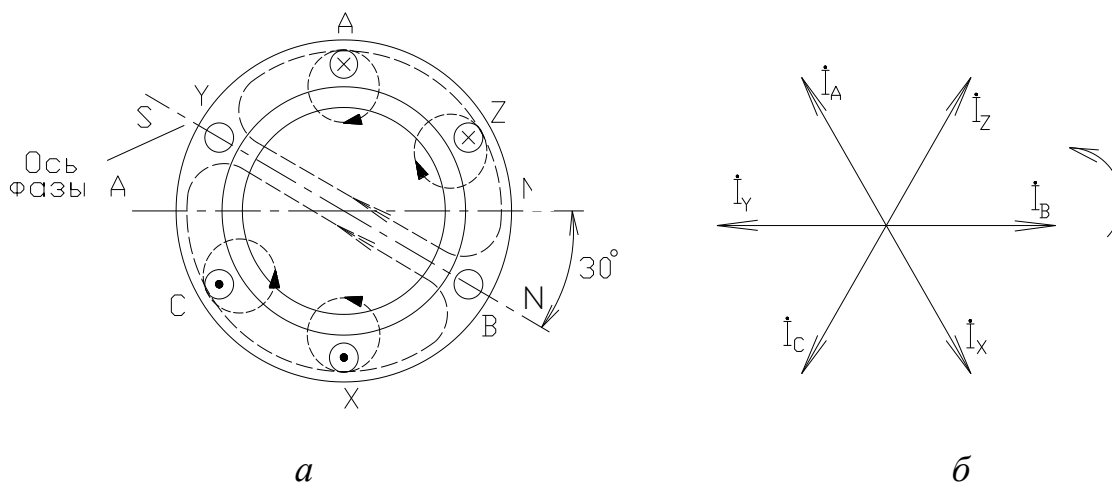


Рис. 1.3. Силовые линии магнитного поля асинхронной машины с двухполюсной трёхфазной обмоткой при $\omega t = 30^\circ$:

а – поперечное сечение асинхронной машины;

б – векторная диаграмма токов

В электромеханике принято выражать частоту вращения в оборотах в минуту, т. е.

$$n_1 = 60 f_1 = 3000 \text{ об/мин.}$$

Два полюсных деления в электрической машине соответствуют 360 электрическим градусам, причём только в двухполюсной машине электрические градусы равны по величине геометрическим.

Для того чтобы получить четырёхполюсную машину, разместим простейшую трёхфазную обмотку только на половине длины окружности статора, а на другой половине расположим ещё одну такую же обмотку.

На рис. 1.4, *а* и *б*, представлено распределение токов по фазам при $\omega t = 0^\circ$. По правилу буравчика определено направление замыкания магнитных силовых линий, образованных соответствующими токами. Видно, что получилась машина с четырьмя полюсами.

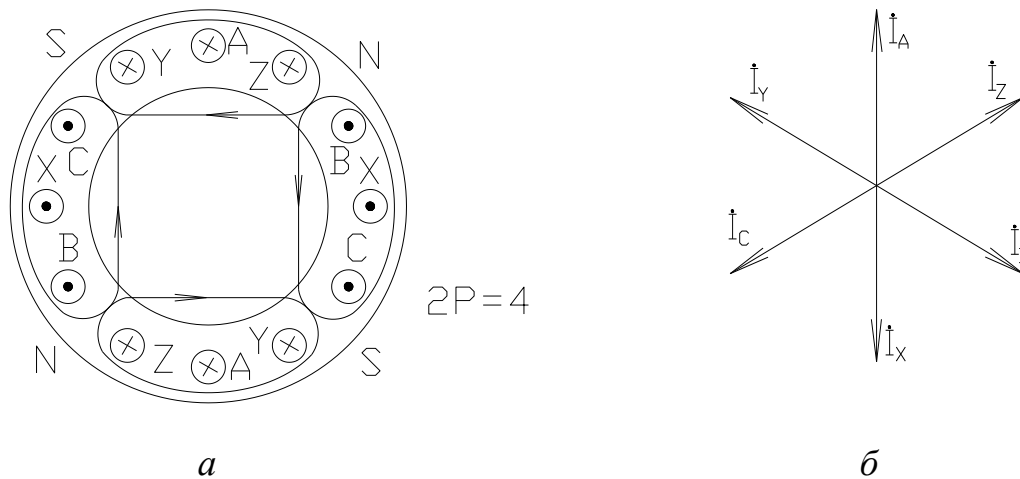


Рис. 1.4. Силовые линии магнитного поля в четырёхполюсной асинхронной машине при $\omega t = 0^\circ$:

а – поперечное сечение асинхронной машины;
б – векторная диаграмма токов

В четырёхполюсной АМ за один период изменения токов в обмотке магнитное поле повернётся только на половину длины окружности статора. Для совершения магнитным полем полного оборота необходим ещё один период изменения тока в обмотке. Поэтому частота вращения магнитного поля в четырёхполюсной машине составит

$$n_1 = \frac{f_1}{2} = 25 \text{ об/с или } n_1 = 1500 \text{ об/мин.}$$

Если разместить на длине окружности статора три простейшие двухполюсные обмотки, то образуется шестиполюсная асинхронная машина, т. е. возможно создание АМ с различным числом полюсов и с разной частотой вращения магнитного поля. В общем случае при любом числе полюсов частота вращения магнитного поля составит

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \text{ об/мин,}$$

где p – число пар полюсов.

В асинхронных машинах один период изменения тока в обмотке соответствует 360 электрическим градусам, которые равны по величине геометрическим градусам только в двухполюсной АМ. В четырёхполюсной машине будет 720 электрических градусов, а в шестиполюсной – 1080.

1.3 Основы теории асинхронных машин при неподвижном роторе

1.3.1 Общие сведения

Рассмотрим асинхронную машину с фазной обмоткой ротора. Обмотку ротора можно замыкать на сопротивление, «закорачивать» или размыкать, что удобно для изучения различных режимов. Вал ротора механически заторможен.

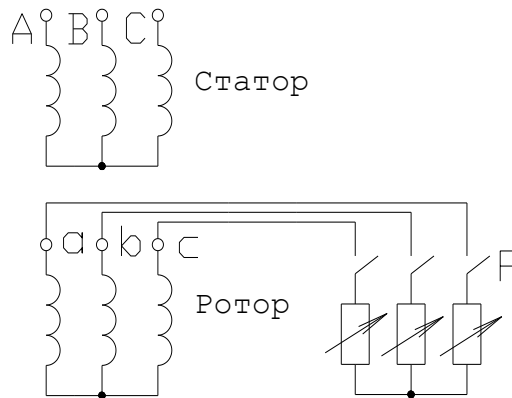


Рис. 1.5. Схема асинхронной машины с фазным ротором

У асинхронной машины при неподвижном роторе имеется близкая аналогия с трансформатором. Трансформатор и АМ имеют по две обмотки. Связь между обмотками статора и ротора АМ осуществляется, как и у трансформатора, электромагнитным путём, посредством общего магнитного поля. Отличие в том, что обмотки АМ распределённые, и у неё имеется воздушный зазор между статором и ротором. При анализе будем рассматривать только первые гармоники токов, напряжений, магнитного потока, магнитодвижущих сил (МДС), ЭДС. При подключении обмотки статора к сети по ней потечёт ток и создаст МДС, F_1 , амплитуда которой на полюс и фазу определяется соотношением:

$$F_1 = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_{\Phi 1} k_{o\Phi 1}}{p} I_1.$$

МДС F_1 создаёт вращающееся магнитное поле статора, пересекающее обмотку ротора и наводящее в ней ЭДС и ток. Ток ротора будет создавать МДС, амплитуда которой на полюс и фазу составит:

$$F_2 = \frac{m_2 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_{\Phi 2} k_{o\Phi 2}}{p} I_2.$$

МДС F_2 создаст вращающееся магнитное поле ротора.

I_1, I_2 – фазные токи статора и ротора;

m_1, m_2 – число фаз статора и ротора;

p – число пар полюсов;

$W_{\Phi 1}, W_{\Phi 2}$ – число витков в фазах обмоток статора и ротора;

$k_{o\Phi 1}, k_{o\Phi 2}$ – обмоточные коэффициенты статора и ротора, учитывающие распределение и укорочение обмотки.

1.3.2 Холостой ход асинхронной машины при неподвижном роторе

В режиме холостого хода (х.х.) рубильник P_1 разомкнут (см. рис. 1.5). К обмотке статора подводится трёхфазное напряжение, под действием которого по ней потечёт ток х.х. i_0 , который создаст МДС:

$$F_0 = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_{\Phi 1} k_{\text{об1}}}{p} I_0.$$

Под действием F_0 будет создаваться вращающийся магнитный поток, который будет пересекать обмотки статора, ротора и индуцировать в них ЭДС. Причём часть вращающегося магнитного поля будет сцепляться только с обмоткой статора, и индуцировать в ней ЭДС рассеяния. Процессы, протекающие при х.х. асинхронной машины, могут быть описаны уравнениями, аналогичными уравнениям трансформатора (рис. 1.6):

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2;$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0.$$

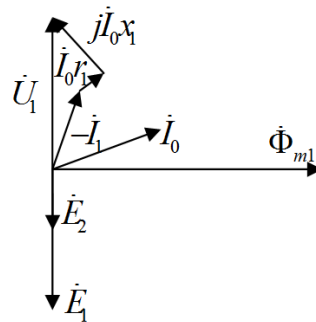


Рис. 1.6. Векторная диаграмма асинхронной машины при холостом ходе:
 x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора

У АМ ток х.х. i_0 может достигать 20–50 % от номинального значения тока статора I_1 . Это объясняется наличием воздушного зазора между статором и ротором. Падения напряжений в цепях статора и ротора могут достигать 8–10 % от напряжения статора U_1 :

$$jI_0 x_1 + I_0 r_1 = I_z = U_1 \cdot (8–10 \%).$$

Тем не менее при инженерных расчётах часто полагают, что $U_1 = E_1$. Действующие значения ЭДС статора и ротора:

$$E_1 = 4,44 f_1 W_{\Phi 1} k_{\text{об1}} \Phi_0;$$

$$E_2 = 4,44 f_1 W_{\Phi 2} k_{\text{об2}} \Phi_0;$$

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_{\Phi 1} k_{\text{об1}}}{W_{\Phi 2} k_{\text{об2}}} \text{ — коэффициент трансформации ЭДС.}$$

1.3.3 Короткое замыкание асинхронной машины при неподвижном роторе

При подаче номинального напряжения на обмотку статора, при замкнутой накоротко обмотке ротора, по обеим обмоткам потекут токи короткого замыкания, которые в 4–7 раз будут превышать их номинальные значения. В таком режиме асинхронная машина может находиться не более одной минуты, после чего, во избежание повреждений, ее следует отключить от сети. У трансформатора в режиме аварийного короткого замыкания (к. з.) значения токов в обмотках будут в 15–20 раз больше номинальных. Меньшие значения токов к. з. у асинхронной машины объясняются наличием воздушного зазора между ротором и статором.

Процессы, протекающие в АМ при КЗ, описываются уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + j\dot{I}_{1K}x_1 + \dot{I}_{1K}r_1; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - j\dot{I}_{2K}x_2 - \dot{I}_{2K}r_2 = 0; \\ \dot{I}_{1K} &= -\dot{I}_{2K} \quad (\dot{I}_0 \approx 0);\end{aligned}$$

r_1, r_2 – активные сопротивления фаз ротора и статора;

x_1, x_2 – индуктивные сопротивления рассеяния фаз ротора и статора.

В режиме к. з. можно без значительной погрешности пренебречь намагничивающим током, что показано и на векторной диаграмме (рис. 1.7).

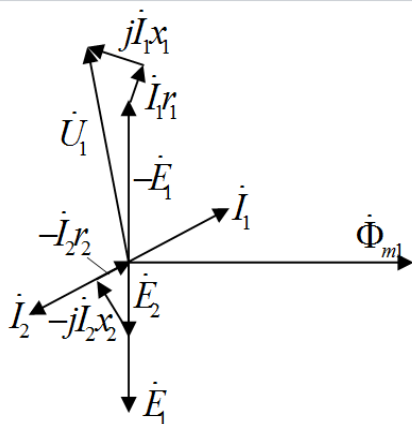


Рис. 1.7. Векторная диаграмма асинхронной машины при к. з.

Так как $i_0 = 0$, то МДС $F_0 = 0$. В этом случае:

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_2 \Rightarrow \dot{F}_1 + \dot{F}_2 = 0 \Rightarrow |F_1| = |F_2|.$$

Представим изменение МДС F_1 и F_2 во времени графически (рис. 1.8).

$$\frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_{\Phi 1} k_{\text{об1}}}{p} I_1 = \frac{m_2 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_{\Phi 2} k_{\text{об2}}}{2} I_2.$$

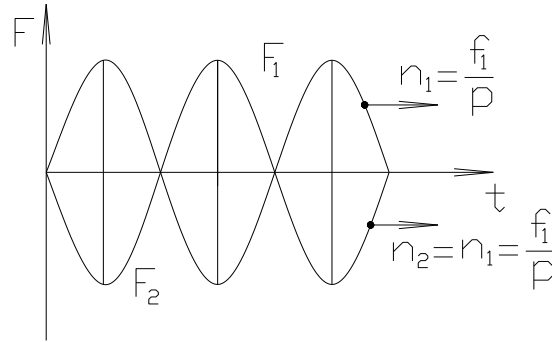


Рис. 1.8. Распределение МДС статора и ротора при опыте к. з.

Коэффициент трансформации по току:

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1 W_{\Phi 1} k_{\text{об1}}}{m_2 W_{\Phi 2} k_{\text{об2}}}.$$

$$I_2 = \frac{m_1 W_{\Phi 1} k_{\text{об1}}}{m_2 W_{\Phi 2} k_{\text{об2}}} \cdot I_1.$$

1.3.4 Приведённая асинхронная машина при неподвижном роторе

Для удобства построения векторных диаграмм и схем замещения асинхронной машины число фаз и число витков обмотки ротора, а также его параметров «приводят» к числу фаз и к числу витков обмотки статора.

Приведённая ЭДС ротора:

$$E'_2 = k_e E_2 = \frac{W_{\Phi 1} k_{\text{об1}}}{W_{\Phi 2} k_{\text{об2}}} E_2.$$

Приведённое напряжение ротора:

$$U'_2 = k_e U_2; \quad k_e = \frac{W_{\Phi 1} k_{\text{об1}}}{W_{\Phi 2} k_{\text{об2}}}.$$

Приведённый ток ротора:

$$I'_2 = \frac{I_2}{k_i} = \frac{m_2 W_{\Phi 2} k_{\text{об2}}}{m_1 W_{\Phi 1} k_{\text{об2}}} I_2.$$

Приведённая асинхронная машина должна иметь такие же энергетические характеристики, что и реальная машина. Поэтому электрические потери в обмотках роторов у реальной и приведённой АМ должны быть одинаковыми:

– у реальной: $m_2 I_2^2 r_2$ (m – число фаз);

– у приведённой: $m_1 (I'_2)^2 r'_2$.

Число фаз обмоток ротора и статора у приведённой АМ одинаковое.

Определим приведённое активное сопротивление ротора:

$$r'_2 = \frac{m_2 I_2^2}{m_1 (I'_2)^2} r_2 = \frac{m_2 I_2^2 m_1^2 W_{\Phi 1}^2 k_{\Phi 061}^2}{m_1 I_2^2 m_2^2 W_{\Phi 1}^2 k_{\Phi 062}^2} r_2 = \frac{W_{\Phi 1} k_{\Phi 061}}{W_{\Phi 2} k_{\Phi 062}} \cdot \frac{m_1 W_{\Phi 1} k_{\Phi 061}}{m_2 W_{\Phi 2} k_{\Phi 062}} r_2 = k_e k_i r_2.$$

Для асинхронных машин с фазным ротором $m_2 = m_1$ всегда, тогда:

$$r'_2 = k_e^2 r_2.$$

Определим приведённое индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора исходя из того, что сдвиг по фазе между током ротора и его ЭДС у реальной и приведённой машин одинаков (рис. 1.9).

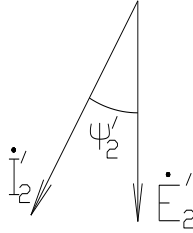


Рис. 1.9. Фазовый сдвиг ЭДС и тока в роторе асинхронной машины

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{x'_2}{r'_2} \Rightarrow x'_2 = x_2 \frac{r'_2}{r_2} = x_2 \frac{k_e k_i r_2}{r_2} \Rightarrow \operatorname{tg} \psi_2 = k_e k_i x_2.$$

Полное приведённое сопротивление ротора:

$$z'_2 = \sqrt{(r'_2)^2 + (x'_2)^2} = k_e k_i z_2.$$

1.4 Параметры асинхронной машины при вращающемся роторе

При вращении ротора частота тока в нём f_2 будет зависеть от скольжения, причём от частоты f_2 будут зависеть величина ЭДС ротора и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора. Активное сопротивление обмотки ротора r_2 при изменении f_2 практически не изменяется, и его значение полагают постоянным.

ЭДС ротора при его вращении:

$$E_{2s} = 4,44 f_2 W_{\Phi 2} k_{\Phi 062} \Phi_m, \quad (n \neq 0).$$

Если ротор неподвижен, то значение его ЭДС составит:

$$E_2 = 4,44 f_1 W_{\Phi 2} k_{\Phi 062} \Phi_m, \quad (n = 0).$$

Известно, что $f_2 = f_1 s$, тогда:

$$E_{2s} = 4,44 f_1 W_{\Phi 2} k_{\Phi 062} \Phi_m s = E_2 s, \quad (n \neq 0).$$

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора при его вращении:

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{\sigma 2},$$

где $L_{\sigma 2}$ – индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора при $n = 0$:

$$x_{2s} = 2\pi f_1 L_{\sigma 2}.$$

Тогда $x_{2s} = x_2 s$ при $r_2 = \text{const}$.

На основании закона Ома ток в обмотке ротора при его вращении:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{E_2 s}{s \sqrt{\frac{r_2^2}{s^2} + x_2^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}.$$

Работа приведённой асинхронной машины при вращении ротора описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1; \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \dot{I}'_2. \end{aligned} \quad (1)$$

2 АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

2.1 Асинхронные двигатели

2.1.1 Принцип действия асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель состоит из статора, сердечник которого выполнен из отдельных пластин электротехнической стали, причём во внутренней расточке статора имеются пазы, в которых уложена трёхфазная обмотка. Статор является индуктором и создаёт вращающееся магнитное поле.

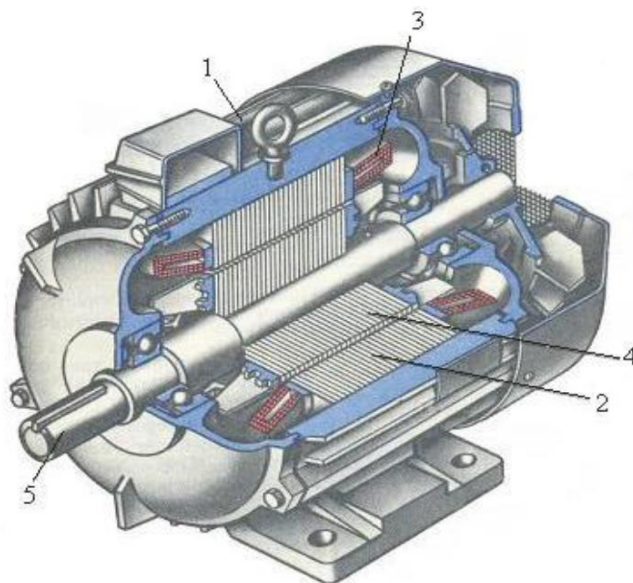


Рис. 2.1. Конструкция асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:
1 – станина; 2 – сердечник статора; 3 – обмотка статора; 4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; 5 – вал

Якорем у асинхронного двигателя является ротор, который состоит из сердечника, набранного из отдельных пластин электротехнической стали, и расположен на валу. На внешней расточке сердечника ротора имеются пазы, в которых расположены короткозамкнутая (рис. 2.1) или трёхфазная (рис. 2.2) обмотки, в которых и происходит процесс преобразования электрической энергии в механическую.

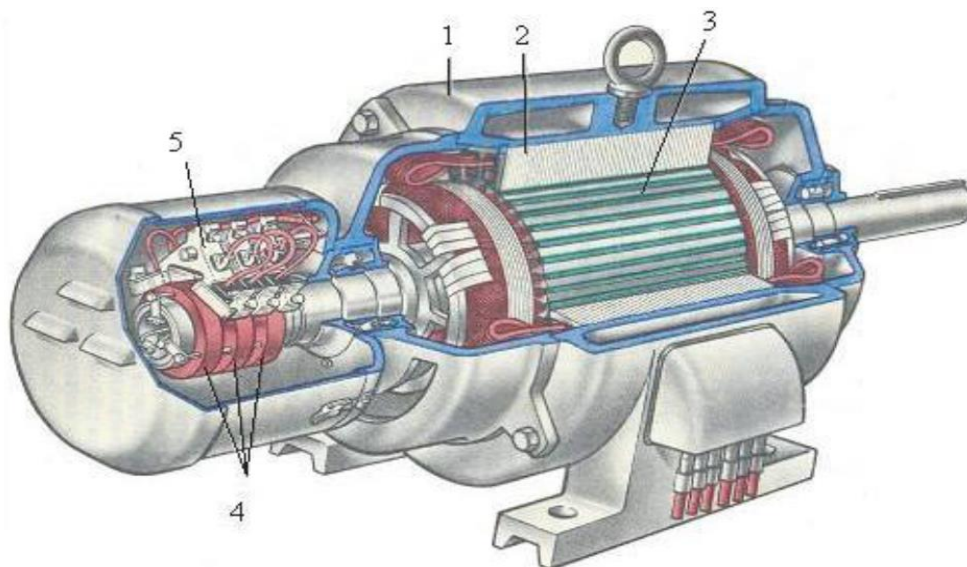


Рис. 2.2. Конструкция асинхронного двигателя с фазным ротором:
1 – станина; 2 – обмотка статора; 3 – ротор; 4 – контактные кольца; 5 – щетки

При подключении обмотки статора к трёхфазной сети создаётся вращающееся магнитное поле, которое пересекает обмотку ротора и индуцирует в ней электродвижущие силы (ЭДС). Под действием ЭДС по обмотке ротора потечёт ток, причём при неподвижном роторе ($n = 0$) частота токов ротора будет равна частоте тока статора ($f_2 = f_1$). Токи ротора создадут своё вращающееся магнитное поле, частота вращения которого будет равна:

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = \frac{f_1}{p} = n_1.$$

Поле статора и поле ротора сложатся и образуют общее вращающееся магнитное поле. При взаимодействии вращающегося магнитного поля с токами ротора будет создаваться момент, под действием которого ротор начнёт вращаться в ту же сторону, что и магнитное поле. При этом частота вращения ротора будет всегда меньше частоты вращения магнитного поля, т. е. ротор, как принято говорить, будет вращаться со скольжением s :

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

где n_1 – частота вращения поля;
 n – частота вращения ротора.

Скольжением называется относительное отставание частоты вращения ротора от частоты вращения магнитного поля. В двигательном режиме величина скольжения всегда будет больше нуля, и диапазон скольжения $0 < s \leq 1$. Скольжение не может стать равным нулю, так как при одинаковых частотах вращения ротора и вращающегося магнитного поля поле не будет пересекать обмотку ротора, и поэтому ЭДС и токи ротора будут равны нулю, и момент АД так же станет равен нулю, и частота вращения ротора будет снижаться. Частота вращения ротора определяется соотношением:

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s).$$

При вращении ротора частота тока в нём составит:

$$f_2 = p(n_1 - n);$$

$$f_2 = p(n_1 - n_1(1 - s)) = psn_1;$$

$$f_2 = psn_1 = \frac{psf_1}{p} = sf_1;$$

$$f_2 = sf_1.$$

Частота вращения магнитного поля ротора относительно самого ротора:

$$n_{2p} = n_1s.$$

Частота вращения магнитного поля ротора относительно статора:

$$n_{2c} = n_{2p} + n = n_1s + n_1(1 - s) = n_1.$$

Таким образом, при вращении ротора частоты вращения магнитных полей статора и ротора оказываются одинаковыми и образуют общее магнитное поле.

2.1.2 Схемы замещения фазы асинхронного двигателя

Анализ процессов в АД связан с расчётом электромагнитной системы, состоящей из сердечников ротора и статора и их обмоток. Как правило, магнитная система двигателя насыщена, и, кроме того, между статором и ротором существует воздушный зазор, что усложняет процесс расчёта.

В ряде случаев сложный расчёт электромагнитной системы двигателя можно заменить расчётом простой электрической цепи, соответствующей уравнениям (1), в которой электромагнитная связь между обмотками статора и ротора заменена ветвью намагничивания. Схема замещения (рис. 2.3) составляется для одной фазы двигателя, а результаты расчёта умножают на три. В случае неравномерного распределения нагрузки (токов) по фазам схема замещения составляется для каждой из фаз, а общий результат расчёта определяется суммированием.

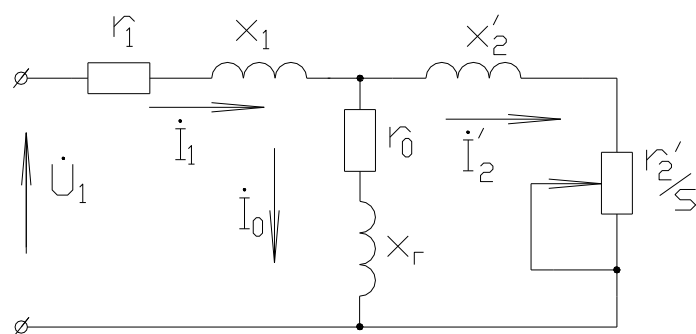


Рис. 2.3. Т-образная схема замещения фазы асинхронного двигателя

Схема замещения содержит три ветви:

- первая с параметрами обмотки статора r_1 , x_1 с током I_1 ;
- вторая с параметрами приведенной обмотки ротора: r_2' / s , x_2' с током I_2 ;
- третья (ветвь намагничивания) с параметрами: r_0 , x_{Γ} с током I_0 .

Первые две ветви соответствуют статору и ротору, а третья учитывает электромагнитную связь между их обмотками.

r_0 – активное сопротивление, учитывающее потери в стали сердечников статора и ротора;

x_{Γ} – главное индуктивное сопротивление, учитывающее взаимную индуктивность обмоток статора и ротора.

Высокая точность расчета АД обеспечивается при использовании Т-образной схемы замещения (см. рис. 2.3), но для построения круговых диаграмм и получения ряда аналитических соотношений более удобна схема замещения двигателя с вынесенной на внешние зажимы ветвью намагничивания. Такая схема замещения фазы АД называется Г-образной (рис. 2.4).

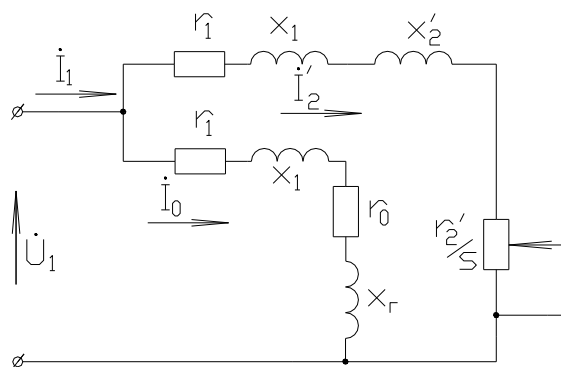


Рис. 2.4. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

При расчёте АД с использованием Г-образной схемы замещения для получения точных результатов используются поправочные коэффициенты.

2.1.3 Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Рабочий процесс АД можно представить в виде диаграммы (рис. 2.5).

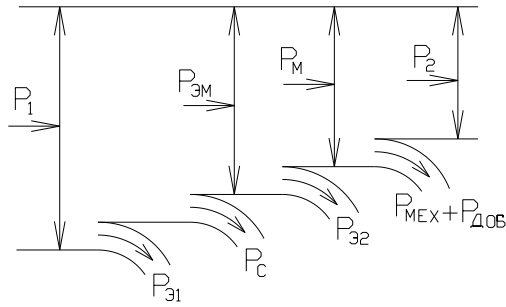


Рис. 2.5. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

P_1 – подводимая мощность к двигателю из сети, $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$;
 U_1, I_1 – фазные напряжение и ток двигателя (статора);
 m_1 – число фаз статора.

В обмотке статора существуют электрические потери мощности P_{31} :

$$P_{31} = m_1 I_1^2 r_1,$$

r_1 – активное сопротивление обмотки статора.

Кроме того, в сердечнике двигателя есть магнитные потери мощности в стали P_C (потери на гистерезис и вихревые токи). Если электрические потери и потери в стали вычесть из подводимой мощности, получим значение электромагнитной мощности:

$$P_{ЭМ} = P_1 - (P_{31} + P_C).$$

Электромагнитная мощность передаётся при помощи вращающегося магнитного поля от статора к ротору через воздушный зазор.

В обмотке ротора будут электрические потери; для приведённой машины:

$$P_{32} = m_1 (I'_2)^2 r'_2.$$

Механическая мощность на энергетической диаграмме (см. рис. 2.5) имеет величину:

$$P_M = P_{ЭМ} - P_{32}.$$

Кроме того, при вращении ротора возникают механические потери (потери на трение в подшипниках и потери на вентиляцию) и добавочные потери, обусловленные поверхностными и пульсационными потерями, а также потерями от действия высших гармоник. Механические потери определяются по формулам, изучаемым в курсе деталей машин, а добавочные потери для машин средней и большой мощности принимаются равными 0,5 % от подводимой (потребляемой) мощности P_1 .

P_2 – полезная мощность асинхронного двигателя (мощность на валу), передаваемая приводу

$$P_2 = P_M - (P_{МЭХ} + P_{ДОБ}).$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

2.1.4 Вращающий момент асинхронного двигателя

В установившемся режиме работы вращающий момент АД равен:

$$M_{\text{ЭМ}} = M_0 + M_2;$$

$$M_0 + M_2 = M_{\text{ТО}} + M_{\text{Т}},$$

$M_{\text{ЭМ}}$ – вращающий момент асинхронного двигателя;

M_0 – момент, затрачиваемый на преодоление внутренних тормозных моментов в самом двигателе, и ему соответствуют потери х.х.:

$$P_0 = P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{ДОБ}};$$

M_2 – полезный момент, компенсирующий тормозной момент нагрузки $M_{\text{Т}}$, соответствующий полезной мощности P_2 .

Мощности х.х. P_0 соответствует момент х.х. M_0 , и можно записать:

$$P_0 = P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{ДОБ}} = M_0 \omega = M_0 \frac{2\pi n}{60}.$$

Полезной мощности P_2 соответствует момент M_2 :

$$P_2 = M_2 \omega = M_2 \frac{2\pi n}{60}.$$

Из энергетической диаграммы видно, что:

$$P_{\text{М}} = (P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{ДОБ}}) + P_2 = M_0 \omega + M_2 \omega = (M_0 + M_2) \omega = M_{\text{ЭМ}} \omega; \quad P_{\text{М}} = M_{\text{ЭМ}} \omega.$$

Из принципа действия асинхронного двигателя известно, что вращающий момент машины создаётся в результате взаимодействия токов ротора I_2 с вращающимся магнитным полем, причём частота вращения поля синхронная, и угловая частота вращения поля равна:

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}.$$

Тогда электромагнитная мощность определяется соотношением:

$$P_{\text{ЭМ}} = M_{\text{ЭМ}} \omega_1.$$

Из энергетической диаграммы видно, что:

$$P_{\text{ЭМ}} - P_{\text{М}} = P_{\text{Э2}} = m_1 (I_2')^2 r_2'.$$

В эту формулу подставим значения мощностей, выраженных через соответствующие моменты и угловые частоты вращения:

$$M_{\text{ЭМ}} \omega_1 - M_{\text{ЭМ}} \omega = P_{\text{Э2}}; \quad M_{\text{ЭМ}} (\omega_1 - \omega) = P_{\text{Э2}}; \quad M_{\text{ЭМ}} \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \omega_1 = P_{\text{Э2}};$$

$$\frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} - \text{скольжение } s;$$

$$M_{\text{ЭМ}} \omega s = P_{\text{Э2}}; \tag{2}$$

$$P_{\text{ЭМ}} s = P_{\text{Э2}} \Rightarrow s = \frac{P_{\text{Э2}}}{P_{\text{ЭМ}}}.$$

Определим вращающий момент двигателя из выражения (2):

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{P_{\text{Э2}}}{\omega_1 s} = \frac{m_1 (I'_2)^2 \frac{r'_2}{s}}{\omega_1}. \quad (3)$$

Определим ток I'_2 (приведённый ток ротора) по Г-образной схеме замещения по закону Ома:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}};$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi m_1}{60} = \frac{2\pi 60a}{60p} = \frac{2\pi f}{p}.$$

Подставим в (3) значения I'_1 и ω_1 :

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi f \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}.$$

Видно, что вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения сети. В этом состоит недостаток АД.

2.1.5 Механическая характеристика асинхронной машины

Механическая характеристика АМ может быть представлена в виде:

- $M_{\text{ЭМ}} = f(s)$ или
- $n = f(M_{\text{ЭМ}})$.

Рассмотрим зависимость момента АМ от скольжения (рис. 2.6) в предположении, что $f, r'_2, x_1, r_1, x'_2, U_1 = \text{const}$. Кроме того, полагаем, что вращающееся магнитное поле изменяется во времени строго по синусоидальному закону, т. е. не содержит высших гармоник.

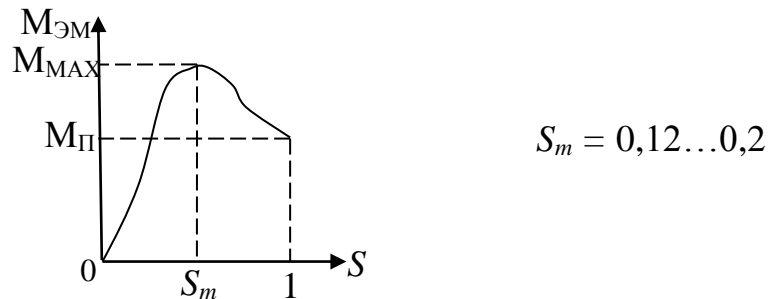


Рис. 2.6. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Рассмотрим механическую характеристику машины для двигательного режима, в котором скольжение меняется в диапазоне $0 < s \leq 1$.

Рассмотрим вначале режим пуска АД в ход, при котором: $n = 0, s = 1$.

Величина пускового момента АД в момент включения:

$$M_{\Pi} = \frac{m_1 p U_1^2 r'_2}{2\pi f (r_k^2 + x_k^2)},$$

где $r_k = r_1 + r'_2, x_k = x_1 + x'_2$.

Из формулы видно, что для увеличения пускового момента следует увеличивать активное сопротивление обмотки ротора.

Если пусковой момент больше тормозного момента на валу ($M_{\Pi} > M_{ТО}$), то ротор начнёт разгоняться, а скольжение – уменьшаться. В формуле момента скольжение входит в числитель и знаменатель, причём при уменьшении скольжения будут одновременно расти и числитель, и знаменатель. Вначале числитель будет расти быстрее, чем знаменатель, и момент будет увеличиваться до тех пор, пока не достигнет максимума при $S_m = 0,12 \dots 0,2$. После этого будет расти быстрее знаменатель, и момент начнёт уменьшаться, и при $S = 0$ он станет равен нулю.

Для асинхронных двигателей отношение пускового момента к номинальному находится в диапазоне:

$$\frac{M_{\Pi}}{M_n} = 1 \dots 2.$$

Для определения максимального момента возьмём первую производную момента по скольжению и приравняем её к нулю:

$$\frac{dM_{ЭМ}}{ds} = 0.$$

В результате дифференцирования ряда преобразований определяется скольжение, при котором момент АД будет максимальным:

$$s_m = \pm \frac{r'_2}{x_k}, \quad x_k = x_1 + x'_2.$$

Значение максимального (опрокидывающего) момента:

$$M_{\text{MAX}} = \pm \frac{m_1 p U^2 \frac{r'_2}{s_m}}{2\pi f \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s_m} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]};$$

$$M_{\text{MAX}} = \pm \frac{m_1 p U^2 x_k}{2\pi f \left((r_1 \pm x_k)^2 + x_k^2 \right)}.$$

Знак «+» относится к двигательному и тормозному режимам, а знак «–» относится к генераторному режиму работы асинхронной машины.

Анализ формулы показывает, что максимальный момент будет иметь место при большем скольжении, если увеличивается отношение r_2' к x_k , что его величина пропорциональна квадрату подводимого напряжения, что M_{MAX} будет уменьшаться с ростом r_1 и x_k и что он не зависит от активного сопротивления r_2' . Отношение значения максимального момента по отношению к номинальному колеблется от 1,8 до 3,5 $\left(\frac{M_{MAX}}{M_n} = 1,8 \dots 3,5 \right)$.

Максимальный момент иногда называют *опрокидывающим*, так как если момент на валу двигателя превысит максимальный, то двигатель остановится (опрокинется).

Представим графически полную механическую характеристику АМ (рис. 2.7).

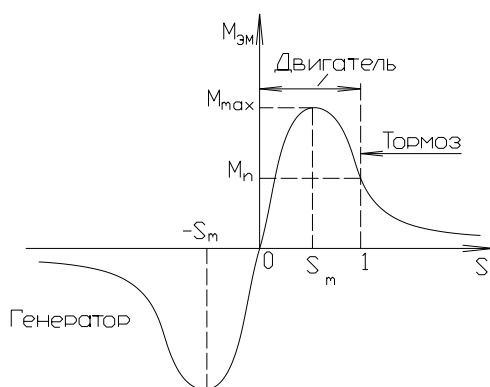


Рис. 2.7. Механическая характеристика асинхронной машины

Иногда механическую характеристику АМ представляют для двигательного режима в виде рис. 2.8.

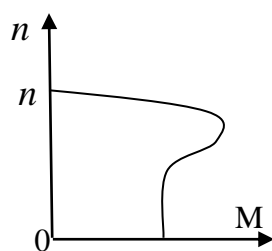


Рис. 2.8. Механическая характеристика асинхронного двигателя

2.1.6 Круговая диаграмма асинхронной машины

Параметры и характеристики асинхронного двигателя можно определить из опыта непосредственной его нагрузки. Для этого потребуются значительные затраты времени и электроэнергии, специальные стенды, сложные измерительные приборы и оборудование. При этом точность полученных результатов зачастую оказывается невысокой. Это послужило причиной разработки косвенного

метода определения параметров и характеристик асинхронного двигателя, который реализуется более просто и с меньшими затратами времени и электроэнергии, обеспечивая в то же время повышенную точность полученных результатов.

Достаточную точность определения характеристик АД обеспечивает круговая диаграмма асинхронной машины.

2.1.6.1 Обоснование построения упрощённой круговой диаграммы

Рассмотрим простейшую электрическую схему (рис. 2.9), содержащую неизменное индуктивное сопротивление и изменяющееся активное сопротивление.

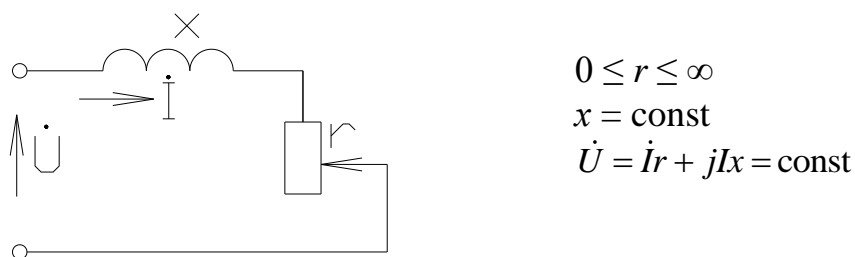


Рис. 2.9. Простейшая электрическая схема

При изменении r будут изменяться ток в электрической схеме и падения напряжений на сопротивлениях r и x , а напряжение всегда будет оставаться неизменным. Покажем это на векторной диаграмме (рис. 2.10).

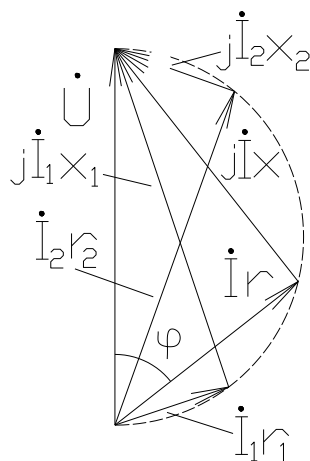


Рис. 2.10. Векторная диаграмма при изменении активного сопротивления

При изменении активного сопротивления от нуля до бесконечности конец вектора падения напряжения $\dot{I}r$ будет перемещаться по окружности с диаметром, равным приложенному к схеме напряжению.

Разделим векторы диаграммы на jx . В результате векторы изменятся по величине и повернутся против положительного направления их вращения на 90 градусов (по часовой стрелке) (рис. 2.11).

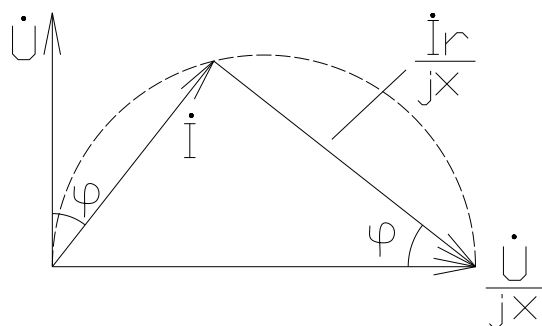


Рис. 2.11. Преобразованная диаграмма

Дополнительно построим направленный вертикально вектор напряжения \dot{U} .

Рассмотрим Г-образную схему замещения АД (рис. 2.12) и сравним её с простейшей электрической схемой (см. рис. 2.9).

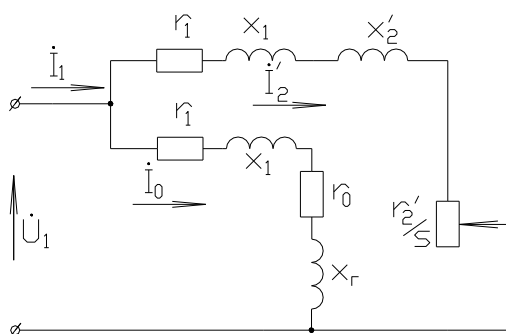


Рис. 2.12. Г-образная схема замещения АД

Видно, что верхняя ветвь Г-образной схемы замещения аналогична простейшей электрической схеме, так как $x_k = \text{const}$, а её суммарное активное сопротивление зависит от скольжения и является переменным.

Отличие Г-образной схемы от простейшей схемы в том, что в ней присутствует нижняя ветвь схемы замещения, величина тока которой не зависит от скольжения, т. е. $I_0 = \text{const}$. Поэтому можно построить упрощённую круговую диаграмму АМ (рис. 2.13), добавив в неё дополнительно вектор тока холостого хода I_0 .

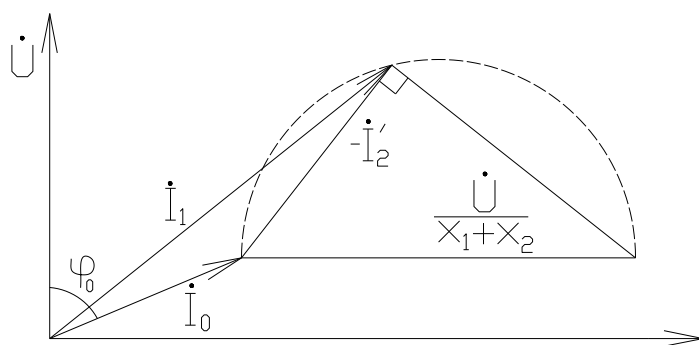


Рис. 2.13. Упрощённая круговая диаграмма

Полученная окружность является геометрическим местом концов векторов тока асинхронной машины (годографом) при изменении активного сопротивления от нуля до бесконечности. Круговая диаграмма может быть построена на основании данных опытов холостого хода и короткого замыкания.

2.1.6.2 Построение круговой диаграммы АМ по данным опытов холостого хода и короткого замыкания

Для построения круговой диаграммы АМ выполняются опыты холостого хода и короткого замыкания.

Из опыта х.х. путем измерения определяют U_H , I_0 , P_0 .

Рассчитывают $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m U_H I_0}$. При проведении опыта к. з. измерением определяют U_K , I_{1K} , P_K , рассчитывают $\cos \varphi_K = \frac{P_K}{m U_K I_{1K}}$; $r_K = P_K / m \times I_{1K}^2$.

Активное сопротивление фазы обмотки статора r_1 определяется методом вольтметра – амперметра или измерением, причём это делается до включения АД в сеть.

Прежде чем строить диаграмму, задаются масштабом тока m_i – А/мм.

Диаметр круговой диаграммы должен быть не менее 200 мм, что достигается подбором масштаба тока m_i .

Порядок построения круговой диаграммы (рис. 2.14):

- 1) откладываем вертикально вверх вектор напряжения \dot{U} ;
- 2) под углом φ_0 к вектору \dot{U} в масштабе тока m_i строим вектор тока I_0 ;
- 3) под углом φ_K к вектору \dot{U} строим вектор тока к. з. I_K ;
- 4) соединяем точки Н и К и из середины отрезка НК восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с линией, проведённой из точки Н параллельно оси абсцисс. Получаем точку O_1 , являющуюся центром окружности токов. Вектор НК – это приведённый ток ротора $-\dot{I}'_2$;
- 5) из центра O_1 радиусом O_1H проведём окружность токов.

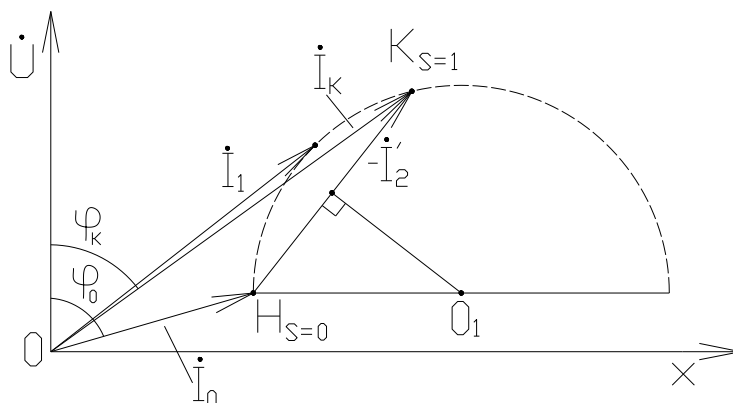


Рис. 2.14. Построение круговой диаграммы

2.1.6.3 Определение по круговой диаграмме токов, подводимой и полезной мощностей асинхронной машины

Для номинального режима работы определим длину вектора тока I_{1H} :

$$\overline{OD} = \frac{I_{1H}}{m_i}, \text{ мм.}$$

Разместим начало вектора I_{1H} в точке O (рис. 2.15) и будем перемещать этот вектор до тех пор, пока его конец не окажется на окружности токов в точке D .

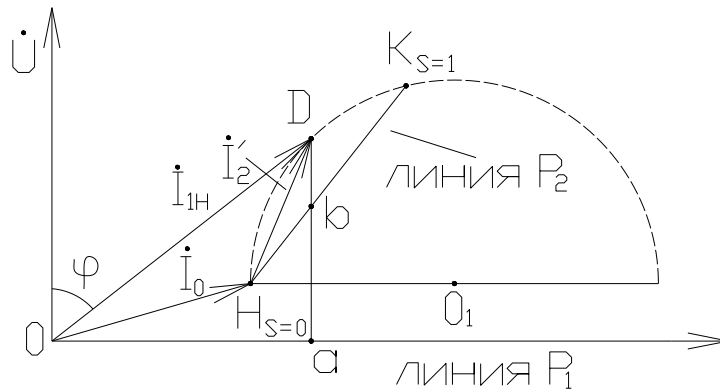


Рис. 2.15. Определение токов, подводимой и полезной мощностей АД

Определим токи двигателя:

$$\dot{I}_1 = \overline{OD}m_i, \text{ A;}$$

$$\dot{I}'_2 = \overline{HD}m_i, \text{ A;}$$

$$\dot{I}_0 = \overline{OH}m_i, \text{ A.}$$

Опустим из точки D перпендикуляр на ось абсцисс и обозначим точку пересечения « a ».

Из прямоугольного треугольника ODa найдём:

- активную составляющую тока статора:

$$\overline{Da} = \overline{OD} \cos \varphi;$$

$$\overline{OD}m_i = I_1 \text{ или } \overline{OD}m_i \cos \varphi = I_1 \cos \varphi = I_{1a} \Rightarrow I_{1a} = \overline{Da}m_i.$$

- реактивную составляющую тока статора:

$$\overline{Oa} = \overline{OD} \sin \varphi;$$

$$\overline{OD}m_i \sin \varphi = I_1 \sin \varphi = I_{1p} \Rightarrow I_{1p} = \overline{Oa}m_i.$$

Потребляемая (подводимая) мощность:

$$P_1 = mUI_1 \cos \varphi.$$

P_1 пропорциональна активной составляющей тока I_{1a} , т. е.

$$P_1 \equiv I_1 \cos \varphi \equiv I_{1a}.$$

Ток I_{1a} пропорционален отрезку Da , и можно записать, что:

$$P_1 = m_p \bar{D}\bar{a} \text{ Вт.}$$

Масштаб мощности равен $m_p = mUm_i = \text{В} \cdot \text{А} / \text{мм} = \text{Вт} / \text{мм}$.

При изменении нагрузки точка D будет перемещаться по окружности токов, а точка a – по оси абсцисс, поэтому мощность P_1 будет всегда определяться вертикальными отрезками, заключёнными между окружностью токов и осью абсцисс. На круговой диаграмме ось абсцисс называют *линией подводимой мощности*.

Для определения полезной мощности (мощности на валу) P_2 соединим линией точки H и K , в которых полезная мощность P_2 равна нулю.

Линия HK называется *линией полезной мощности*. Полезная мощность P_2 определяется величиной вертикального отрезка, заключённого между окружностью токов и линией HK , и тогда:

$$P_2 = m_p \bar{D}\bar{b} \text{ Вт.}$$

2.1.6.4 Определение по круговой диаграмме электромагнитных мощности и момента

Электромагнитная мощность определяется вертикальными отрезками, заключёнными между окружностью токов и линией, проходящей через точки H и T , в которых эта мощность равна нулю. Точку $T_{s=\pm\infty}$ экспериментальным путём определить невозможно – её определяют искусственным методом, когда находят точку K_1 через соотношение отрезков (рис. 2.16):

$$\frac{KK_2}{K_2K_1} = \frac{r_k}{r_1}; \quad r_k = \frac{P_K}{mI_K^2}.$$

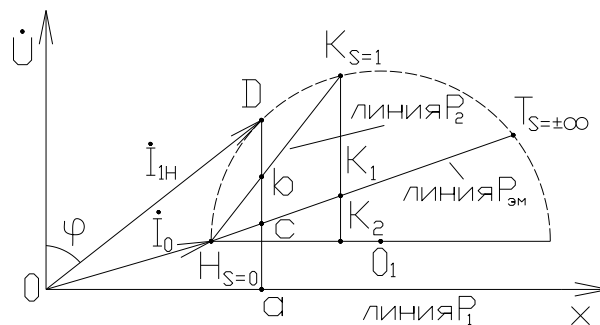


Рис. 2.16. К определению электромагнитных мощности и момента по круговой диаграмме

Проводим линию через точки H и K_1 до пересечения её окружностью токов и получаем точку T . Линия HT называется *линией электромагнитной мощности*:

$$P_{эм} = \bar{D}\bar{c}m_p \text{ Вт.}$$

Вращающий момент асинхронного двигателя $M_{эм}$ будет равен:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega};$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{\pi n_1}{30};$$

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{30P_{\text{ЭМ}}}{\pi n_1}, \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{30\bar{D}\bar{c}m_p}{\pi n_1};$$

$$M_{\text{ЭМ}} = \bar{D}\bar{c}m_M, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где масштаб момента $m_M = \frac{30m_p}{\pi n_1}$, Н·м/мм; n_1 – синхронная частота вращения магнитного поля. Линия НТ – линия момента.

2.1.6.5 Определение по круговой диаграмме $\cos\varphi$ и скольжения

- *Определение коэффициента мощности*

Для определения $\cos\varphi$ на оси напряжения (рис. 2.17) строят полуокружность произвольного радиуса таким образом, чтобы начало её диаметра было в точке О, тогда:

$$\cos\varphi = \frac{\bar{O}\bar{d}}{\bar{O}\bar{e}}.$$

Иногда удобно взять диаметр $Oe = 100$ мм.

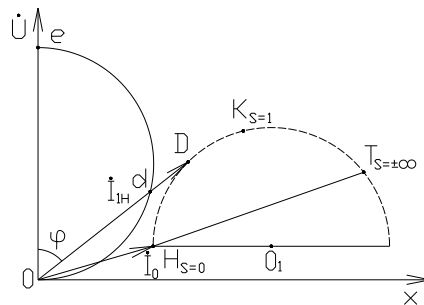


Рис. 2.17. Определение коэффициента мощности по круговой диаграмме

- *Определение скольжения*

Для построения шкалы скольжения из точки Н проводится вверх вертикальная линия (рис. 2.18), на которой произвольно выбирается точка Q, из которой проводится линия, параллельная линии НТ (линии $P_{\text{ЭМ}}$). Затем линию P_2 продлевают до пересечения с линией, параллельной НТ, и получают шкалу скольжения QN , которую иногда делят на 100 равных частей. Для определения величины скольжения точки Н и D соединяют между собой и продлевают эту прямую до пересечения со шкалой скольжения.

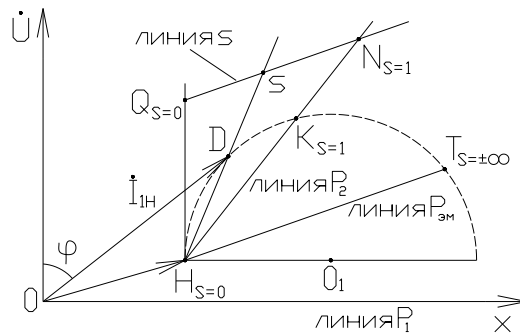


Рис. 2.18. Определение скольжения по круговой диаграмме

2.1.6.6 Определение по круговой диаграмме максимального и пускового моментов

Для определения максимального момента из центра окружности токов O_1 восстанавливается перпендикуляр до пересечения с линией электромагнитной мощности и продлевается до пересечения с окружностью токов. Из точки N проведём вертикально линию до пересечения с линией $P_{эм}$ в точке M . Отрезок MN пропорционален максимальному моменту (рис. 2.19):

$$M_{\max} = m_M NM, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

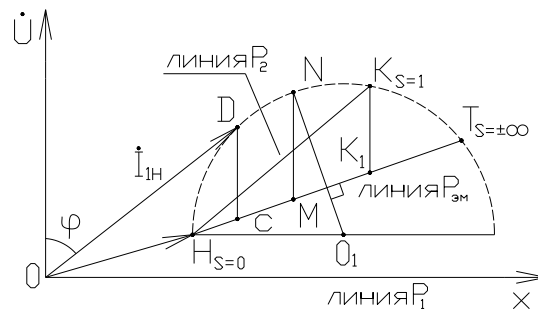


Рис. 2.19. К определению пускового и максимального моментов АД по круговой диаграмме

Для определения пускового момента из точки K проводим вниз вертикальную линию до пересечения с линией $P_{эм}$. Пусковой момент равен:

$$M_{\text{пуск}} = m_M KK_1, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Для определения номинального момента из точки D проводим вертикальную линию до пересечения с линией $P_{эм}$ в точке c :

$$M_{\text{ном}} = m_M Dc, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Кратность пускового момента асинхронного двигателя

$$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{KK_1}{Dc}.$$

Перегрузочная способность асинхронного двигателя

$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{hom}}} = \frac{NM}{Dc}.$$

2.1.6.7 Определение мощности и коэффициента полезного действия по круговой диаграмме

КПД асинхронного двигателя можно определить непосредственно при помощи круговой диаграммы (рис. 2.20):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{m_p Db}{m_p Da} = \frac{Db}{Da}.$$

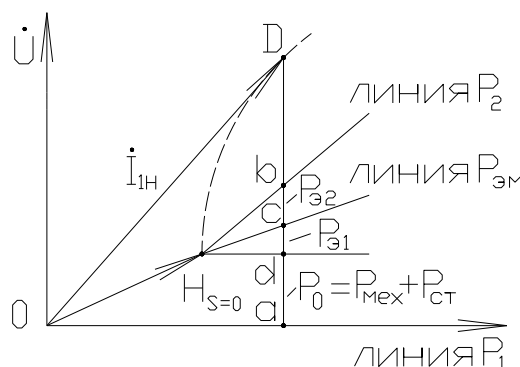


Рис. 2.20. К определению мощностей и КПД асинхронного двигателя по круговой диаграмме

Однако в этом случае возникнет погрешность в определении КПД, так как круговая диаграмма не позволяет учитывать мощность добавочных потерь, поэтому для более точного расчёта по диаграмме определяют отдельно все потери мощности, суммируют их и прибавляют к ним добавочные потери, а мощность P_2 определяют как разность P_1 и мощности всех потерь.

$$P_l = m_p Da, \text{ БТ.}$$

Отрезок ad на круговой диаграмме пропорционален потерям в стали и механическим, т. е. потерям холостого хода, которые практически не зависят от нагрузки двигателя и являются постоянной величиной. Потери в стали неизменны, так как при $U = \text{const}$ магнитный поток АД не изменяется. Механические потери (трение в подшипниках и трение о воздух) не меняются, так как частота вращения двигателя при изменении режима от х.х. до номинального изменяется незначительно.

Определим P_0 :

$$P_0 = P_{\text{Mex}} + P_{\text{CT}} = m_p ad, \text{ BT.}$$

Отрезок cd соответствует электрическим потерям в обмотке статора:

$$P_{\varepsilon 1} = m_p c d, \text{ Вт.}$$

Отрезок cb соответствует электрическим потерям в обмотке ротора:

$$P_{\varepsilon 2} = m_p b c, \text{ Вт.}$$

Для номинального режима принимается, что добавочные потери $P_{\text{доб}}$ составляют один процент от P_1 для машин малой и средней мощности и полпроцента – для крупных машин (свыше 100 кВт):

$$P_{\text{доб}} = 0,005 P_1 m_p D a, \text{ Вт.}$$

Для любого режима работы асинхронного двигателя:

$$P_{\text{доб}i} = \left(\frac{I_i}{I_n} \right)^2 P_{\text{доб}}.$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя:

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{P_1 - (P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} + P_{\varepsilon 1} + P_{\varepsilon 2} + P_{\text{доб}})}{P_1}.$$

Для построения рабочих характеристик двигателя определяются все параметры для разных значений тока нагрузки I_1 и строятся рабочие характеристики АД: $\cos \varphi$, P_1 , I_1 , s , η , $M = f(P_2)$.

Современные асинхронные двигатели – широко используемые электрические машины, КПД которых составляет 0,85–0,9.

2.1.7 Способы пуска в ход асинхронных двигателей

При включении в сеть (пуске в ход) асинхронных двигателей должны выполняться следующие условия:

- пусковой момент должен быть больше статического момента на валу, для того чтобы двигатель мог начать вращаться;
- пусковой момент должен быть ограничен для исключения механических повреждений двигателя и привода;
- не должно быть значительной «просадки» напряжения питающей сети (уменьшение напряжения питающей сети допускается кратковременно не более чем на 10–15 %);
- пусковая аппаратура должна быть простой и недорогой.

При пуске в машине выделяется количество тепла, эквивалентное кинетической энергии ротора и вращающихся масс привода. Поэтому количество пусков двигателя должно быть ограничено, максимально допускается десять пусков в час. Пусковой ток асинхронного двигателя составляет 4–7 номинальных значений, и все современные двигатели с короткозамкнутыми обмотками роторов рассчитаны на прямой пуск, т. е. на включение двигателя на полное напряжение сети. Прямым включением в сеть включают двигатели в несколько тысяч киловатт.

В ряде случаев приходится ограничивать величину пускового тока.

2.1.7.1 Реакторный пуск асинхронного двигателя

Целью реакторного пуска (рис. 2.21) является ограничение пускового тока при включении. Для этого последовательно в каждую фазу двигателя включается реактор, представляющий собой катушку, намотанную из электропроводящей шины на стальной сердечник.

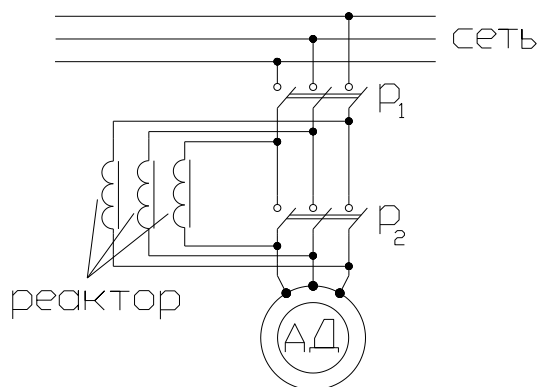


Рис. 2.21. Схема реакторного пуска АД

Величина тока при прямом пуске:

$$I_{\text{пр}} = \frac{U}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}.$$

Пусковой ток при использовании реакторов:

$$I_{\text{пр}} = \frac{U}{\sqrt{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}}.$$

При реакторном пуске вначале включается рубильник P_1 , и на обмотки статора напряжение подаётся через последовательно включённые реакторы. Двигатель начинает разгоняться, и при достижении им определенной частоты вращения одновременно включают рубильник P_2 и отключают реакторы, т. е. обмотки двигателя питаются от сети напрямую.

Степень ограничения пускового тока АД будет определяться величиной индуктивного сопротивления реактора x_p .

2.1.7.2 Автотрансформаторный пуск асинхронного двигателя

Если требуется осуществить плавный пуск АД, то применяют трёхфазные автотрансформаторы.

Для пуска двигателя (рис. 2.22) замыкают рубильники P_1 и P_3 и при помощи автотрансформатора плавно увеличивают напряжение, подводимое к обмотке статора. Ротор начинает вращаться. При достижении им определённой частоты вращения рубильник P_3 размыкают, и обмотки статора продолжают питаться от сети уже через реакторы. Далее замыкают рубильник P_2 , а автотрансформатор отключают от сети. Обеспечивается плавный пуск без бросков тока.

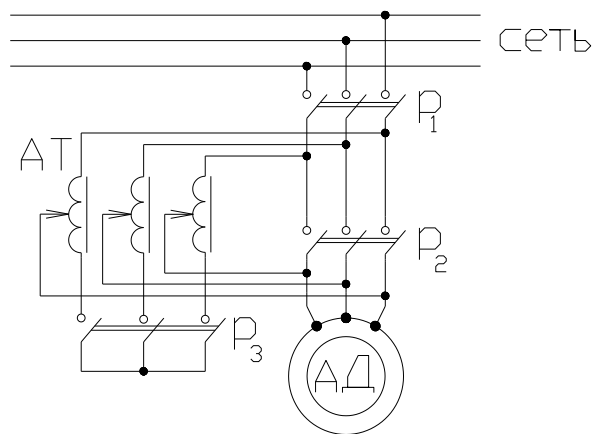


Рис. 2.22. Схема автотрансформаторного пуска АД

Этот способ применяется редко из-за высокой стоимости его реализации.

В некоторых случаях применяют способ пуска АД при переключении обмотки статора со «звезды» на «треугольник», при этом пусковой ток снижается в $\sqrt{3}$ раз. Способ можно применить, если в нормальном режиме работы обмотка статора соединяется в треугольник и в клеммной коробке имеется шесть выводов обмотки.

В настоящее время все чаще используют статические преобразователи частоты и напряжения, обеспечивающие заданные режимы пуска асинхронных двигателей.

2.1.7.3 Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором

Для пуска в ход асинхронного двигателя с фазным ротором (рис. 2.23) в обмотку ротора включают пусковые сопротивления, величину которых по мере разгона машины уменьшают, а затем и закорачивают. Включение сопротивлений в обмотку ротора позволяет снизить пусковой ток при одновременном увеличении пускового момента, что является особенным, отличительным свойством этих электрических машин. Пусковые сопротивления рассчитаны на кратковременный режим работы, и после включения двигателя они закорачиваются.

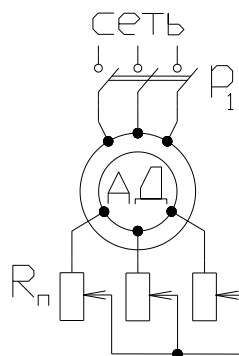


Рис. 2.23. Схема пуска АД с фазной обмоткой ротора

2.1.8 Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

Ранее, в начале настоящей главы, приводилось соотношение для определения величины частоты вращения ротора асинхронного двигателя:

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s).$$

Это соотношение показывает, что частоту вращения АД можно изменять двумя путями:

- изменением частоты вращения магнитного поля;
- изменением скольжения.

Первый путь регулирования предполагает сохранение высокого коэффициента полезного действия машины, а второй – снижение КПД, так как при увеличении скольжения возрастают электрические потери мощности в обмотке ротора.

2.1.8.1 Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя изменением частоты тока

При регулировании частоты вращения изменением частоты тока (рис. 2.24) необходимо поддерживать в двигателе номинальное значение магнитного поля для сохранения высокого коэффициента полезного действия. Поэтому одновременно с изменением частоты тока должна пропорционально изменяться величина подводимого напряжения с соблюдением соотношений:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = \frac{U_3}{f_3} = \dots = \frac{U_n}{f_n} = \text{const.}$$

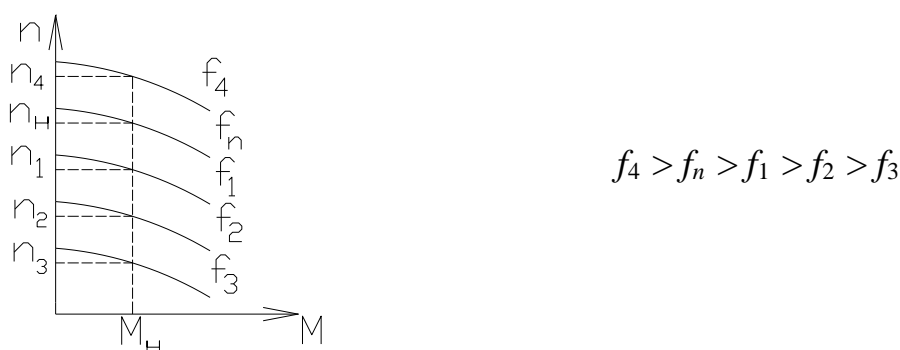


Рис. 2.24. Механические характеристики АД при частотном регулировании

Такое регулирование может обеспечивать синхронный генератор с изменяемой частотой вращения ротора. Как правило, для такого регулирования применяют статические преобразователи частоты и напряжения.

Частота вращения ротора может регулироваться в широких пределах, плавно, вверх и вниз от номинального значения, при сохранении высокого коэффициента полезного действия. Стоимость реализации данного способа регулирования остаётся высокой.

2.1.8.2 Регулирование частоты вращения АД изменением числа пар полюсов обмотки статора

Полюсопереключаемые обмотки позволяют изменять частоту вращения магнитного поля. Выпускаются двух-, трёх- и четырёхскоростные машины, причём двухскоростные двигатели обычно имеют одну полюсопереключаемую обмотку статора, а трёх- и четырёхскоростные – по две обмотки на статоре, каждая из которых также полюсопереключаемая. Такие двигатели используют, например, в лифтах, станках и эскалаторах.

Рассмотрим пример простейшей полюсопереключаемой обмотки статора асинхронного двигателя с соотношением пар полюсов 1:2.

Пример будет рассмотрен на плоской развёртке обмотки (рис. 2.25).

$$2p = 2; n_1 = \frac{60f}{p} = 3000 \text{ об/мин}$$

$$\omega t = 0$$

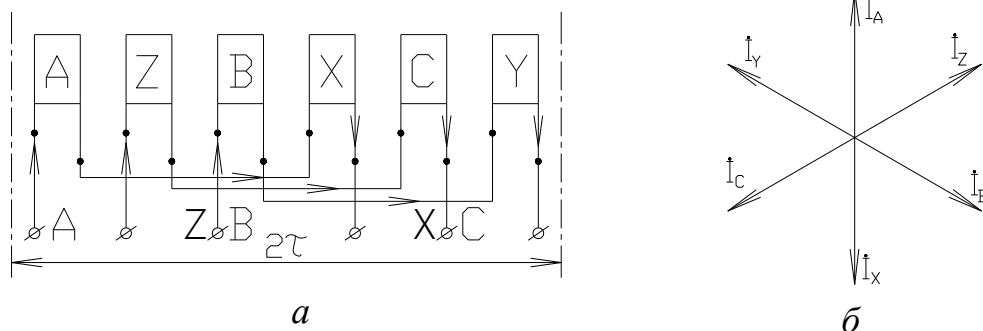


Рис. 2.25. Схема соединения двухполюсной обмотки статора:
а – схема обмотки; б – векторная диаграмма токов

Рассмотрим трёхфазную шестизонную обмотку со сдвигом в 60 градусов между соседними фазными зонами. В этом случае обмотка подключается к источнику трёхфазного напряжения со следующим порядком чередования фаз: А, Z, В, X, С, Y. Частота вращения магнитного поля – 3000 об/мин.

Для увеличения числа полюсов обмотки в два раза (рис. 2.26) выполним её трёхзонной со сдвигом в 120 градусов между соседними фазными зонами и порядком чередования фаз: А, В, С, А, В, С: частота вращения магнитного поля будет в 2 раза меньше и составит 1500 об/мин.

$$2p = 4; n_1 = \frac{60f}{p} = 1500 \text{ об/мин.}$$

При таком способе регулирования частота вращения уменьшится в 2 раза.

Недостатком такого регулирования является скачкообразность изменения частоты вращения, при этом сохраняется высокий КПД двигателя. Разработано большое количество конструкций полюсопереключаемых обмоток.

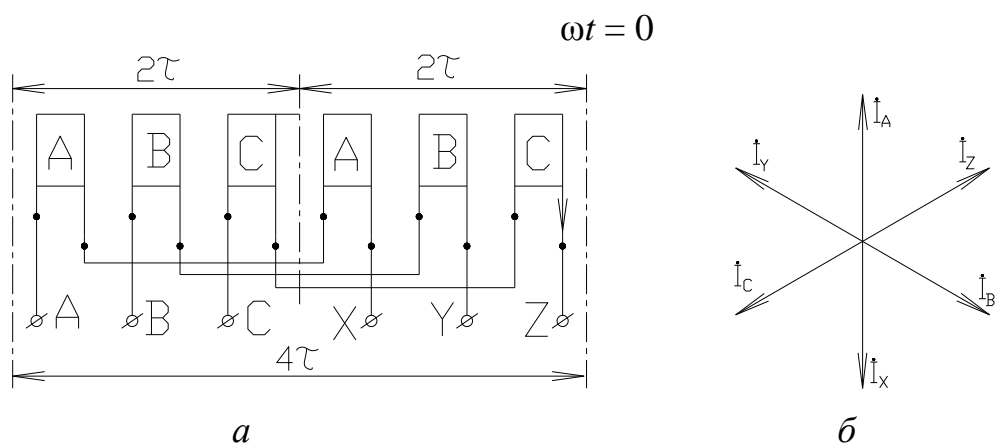


Рис. 2.26. Схема соединения четырёхполюсной обмотки статора:
а – схема обмотки; *б* – векторная диаграмма токов

2.1.8.3 Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя изменением скольжения

В этом случае частота вращения магнитного поля остается неизменной. При таком регулировании снижается величина напряжения, подводимого к обмотке статора. Заметим, что при этом момент на валу двигателя будет уменьшаться пропорционально квадрату подводимого напряжения, и диапазон регулирования из-за этого весьма узок (рис. 2.27). КПД двигателя при росте скольжения падает из-за увеличения электрических потерь в роторе.

Кроме того, при увеличении скольжения будут возрастать и магнитные потери в роторе, т. к. частота перемагничивания сердечника ротора будет возрастать, а магнитные потери на гистерезис и вихревые токи пропорциональны квадрату этой частоты.

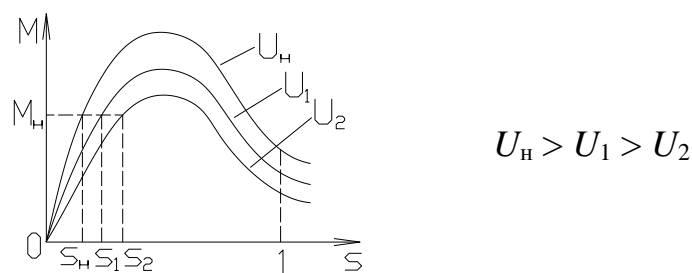


Рис. 2.27. Механические характеристики АД при изменении скольжения

Частота вращения может регулироваться только вниз от номинального значения. При регулировании подводимое к статору напряжение можно только уменьшать, т.к. увеличение напряжения сверх номинального значения снижает срок службы изоляции обмотки.

2.1.8.4 Регулирование частоты вращения двигателя с фазным ротором

Двигатель с фазным ротором (рис. 2.28) можно регулировать теми же способами, что и машину с короткозамкнутым ротором. Но его регулирование проще.

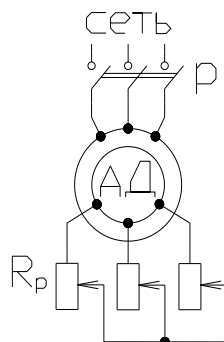


Рис. 2.28. Регулирование асинхронного двигателя с фазным ротором

Изменяя величину сопротивления ротора, можно регулировать частоту вращения только в сторону её понижения, плавно и в широком диапазоне. Сопротивления R_p рассчитываются на длительный режим работы. Недостаток регулирования – уменьшение коэффициента полезного действия двигателя за счёт увеличения электрических потерь в обмотке ротора.

Для увеличения частоты вращения двигателя с фазным ротором можно вводить в ротор ЭДС частоты, близкой к скольжению. Для этого требуется каскад электрических машин, поэтому способ применяется редко.

2.1.9 Обмотки статоров машин переменного тока

Трёхфазные обмотки статоров могут быть одно- или двухслойными. Однослойные обмотки применяют в машинах небольшой мощности.

Их недостатки:

- они не допускают укорочение обмотки;
- обмотки выполняются из секций разной величины, что снижает их технологичность.

Двухслойные обмотки статора изготавливают из одинаковых секций и укладывают их так, что одна сторона секции лежит на дне паза, а другая сторона – в верхней части паза.

Наиболее часто обмотки выполняются шестизонными с углом сдвига 60 градусов между соседними зонами.

Число пазов статора:

$$z = 2ptq,$$

где z – число пазов статора;

$2p$ – число пар полюсов;

t – число фаз;

q – число пазов на полюс и фазу: $q = \frac{z}{2pt}$.

Пример: $z = 24$; $2p = 4$; $\Rightarrow q = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$.

$m = 3$.

$y = \tau$ – диаметрический шаг обмотки;

$y < \tau$ – укороченный шаг обмотки.

Обычно делают обмотки с укороченным шагом.

Рассмотрим пример (рис. 2.29), если $y = 5$, $\tau = mq = 3 \cdot 2 = 6$, а укорочение $\beta = 5/6$.

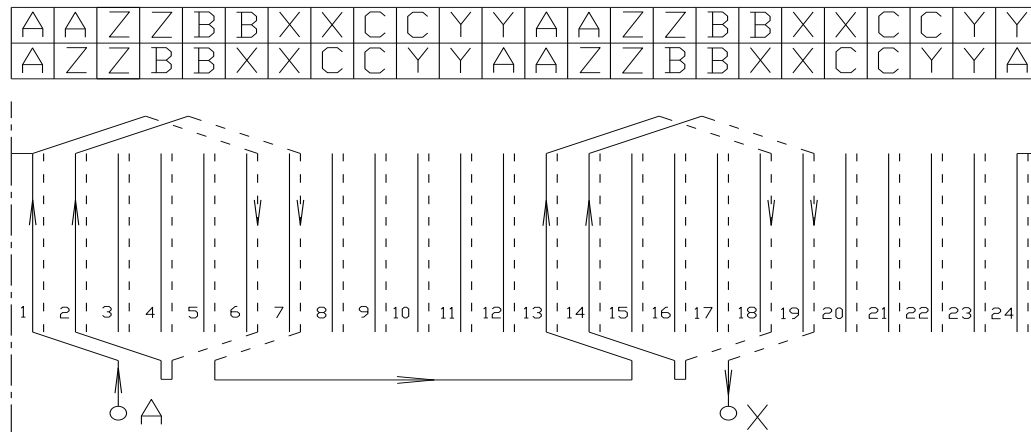


Рис. 2.29. Соединение катушечных групп фазы А

Обмотки статора могут быть петлевыми и волновыми.

2.1.10 Тормозные режимы работы асинхронной машины

Осуществлять электрическое торможение асинхронного двигателя можно тремя способами. Первый способ – генераторное торможение, при котором ротор вращается быстрее, чем магнитное поле машины, и скольжение становится отрицательным. Генераторное торможение применяется в многоскоростных асинхронных машинах с полюсопереключаемыми обмотками статоров. Выше была представлена простейшая трёхфазная обмотка с переключением числа пар полюсов 1:2 (см. рис. 2.25). Если в номинальном режиме асинхронный двигатель работает с двухполюсной обмоткой и синхронной частотой вращения 3500 об/мин, то для торможения обмотка статора переключается на четырёхполюсный вариант, при котором магнитное поле вращается с частотой 1500 об/мин. Ротор теперь вращается быстрее магнитного поля, и асинхронный двигатель переходит в генераторный режим работы, отдавая в сеть активную мощность и потребляя при этом индуктивные токи, что снижает коэффициент мощности. Мощные асинхронные двигатели, в частности тяговые машины электровозов, при генераторном торможении работают совместно со статическими преобразователями и обеспечивают рекуперацию электрической энергии в контактную сеть системы электроснабжения железных дорог.

Второй способ – торможение асинхронного двигателя противовключением. Для быстрой остановки работающего асинхронного двигателя изменяют направление вращения его магнитного поля, при этом следует переключить (поменять местами) любые две фазы обмотки статора. Ротор двигателя и его магнитное поле начнут вращаться в противоположные стороны. Скольжение будет больше единицы, и частота пересечения магнитным полем обмотки ротора резко возрастёт, увеличатся ЭДС и ток ротора. Торможение эффективно, но не следует позволять токам ротора достигать опасных для машины значений.

Динамическое торможение асинхронного двигателя – третий способ, позволяющий быстро снизить частоту вращения ротора. Для осуществления динамического торможения обычно обмотка АД вначале отключается от трёхфазной сети, а затем две фазы обмотки подключают к сети постоянного тока на время торможения, а после остановки двигателя происходит его полное отключение. Разработаны различные схемы переключения обмотки статора. Вращаясь по инерции в неподвижном магнитном поле, возбуждаемом статорной обмоткой, питаемой постоянным током, двигатель переходит в режим работы автономного синхронного генератора с замкнутой накоротко обмоткой якоря. В результате на валу машины возникает тормозной момент, который можно регулировать реостатом, включённым в цепь постоянного тока. Этот способ торможения весьма эффективен.

2.2 Разновидности асинхронных машин

2.2.1 Асинхронный генератор с самовозбуждением

Асинхронный генератор (АГ), отдавая в сеть активный ток, потребляет из неё индуктивный ток, для компенсации которого к сети должен быть подключён источник ёмкостного тока. Это резко ограничивает применение асинхронных генераторов.

В генераторном режиме ротор асинхронной машины вращается быстрее магнитного поля, и скольжение становится отрицательным.

Рассмотрим работу АГ с самовозбуждением (рис. 2.30).

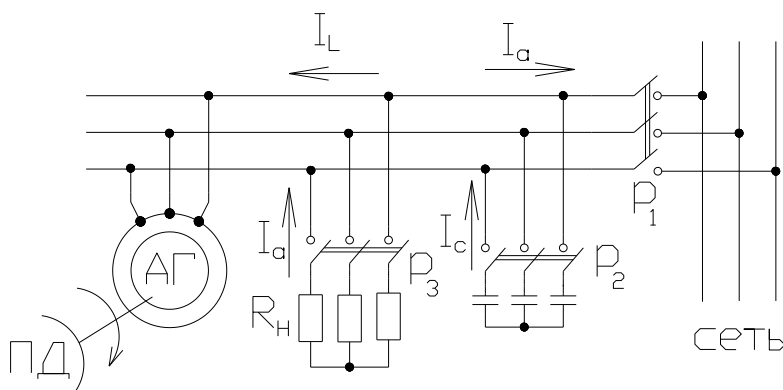


Рис. 2.30. Схема асинхронного генератора с самовозбуждением

При включении рубильника P_1 создаётся вращающееся магнитное поле. Первичным двигателем начинают вращать ротор АМ с частотой вращения, превышающей синхронную частоту вращения, и АГ начинает отдавать активную энергию в сеть. Для нормальной работы сети необходимо снабжать её ёмкостными токами (батарея конденсаторов, синхронный компенсатор). Если включить рубильники P_2 и P_3 , то можно отключить рубильник P_1 и АГ будет работать в автономном режиме. Заметим, что мощность батареи конденсаторов для работы генератора должна составлять 75–80 % от его номинальной мощности, что ограничивает его применение.

2.2.2 Линейные асинхронные двигатели для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта

Для перспективных систем подвижного состава, таких как магнитолевитационный транспорт (МЛТ), в качестве тяговых машин будут использоваться линейные асинхронные двигатели (ЛАД), преобразующие электрическую энергию непосредственно в механическое усилие, обеспечивающее поступательное движение высокоскоростного экипажа. Индуктор ЛАД, расположенный на транспортном экипаже, создает бегущее магнитное поле, а роль якоря выполняет вторичный элемент (ВЭ), размещаемый в путевой структуре. Конструктивная схема высокоскоростной системы МЛТ с индукторами ЛАД на экипаже показана на рисунке 2.31.

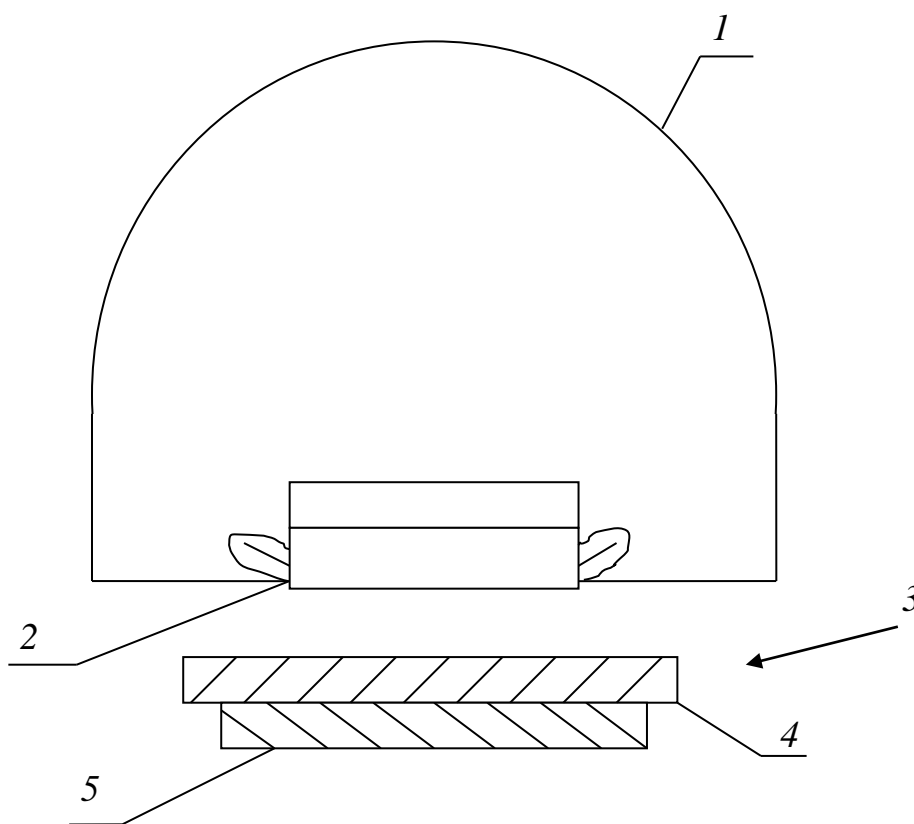


Рис. 2.31. Конструктивная схема устройства МЛТ:
 1 — корпус вагона; 2 — индуктор ЛАД; 3 — вторичный элемент;
 4 — электропроводящая часть ВЭ; 5 — обратный магнитопровод

На экипаже магнитолевитационного транспорта могут быть установлены индукторы линейных асинхронных двигателей различной конструкции: с продольным, поперечным и продольно-поперечным замыканием магнитного потока. Линейные двигатели с продольным магнитным потоком для реализации высоких скоростей движения в диапазоне 350–500 км/ч должны снабжаться электроэнергией через частотные преобразователи, тогда как ЛАД с поперечным замыканием бегущего магнитного потока способны развивать необходимые для МЛТ скорости при промышленной частоте тока. Кроме того, линейные асинхронные двигатели с поперечным магнитным потоком развивают помимо тяговых усилий и усилия магнитной левитации, способные в ряде случаев обеспечить устойчивый магнитный подвес транспортного экипажа в собственном магнитном поле индукторов ЛАД. Путь замыкания магнитного потока в ЛАД с продольным магнитным потоком (на рис. 2.32 средняя магнитная силовая линия бегущего потока обозначена штриховой линией) совпадает с направлением перемещения транспортного экипажа (обозначено стрелкой). На рис. 2.32 показано замыкание магнитного потока в пределах одного полюсного деления индуктора. Синхронная скорость бегущего магнитного поля прямо пропорциональна величине полюсного деления индуктора ЛАД и частоте тока.

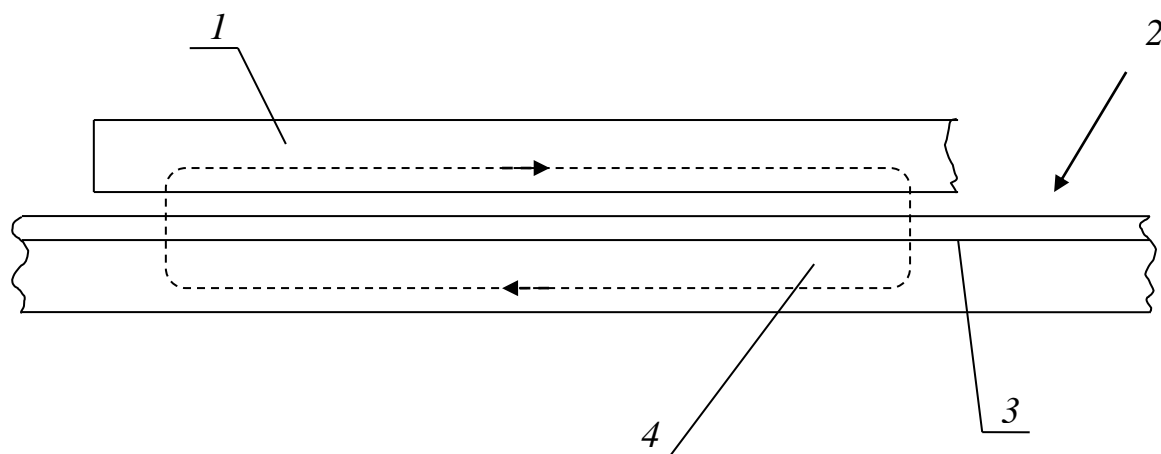


Рис. 2.32. Упрощенная конструктивная схема ЛАД с продольным магнитным потоком:

1 – индуктор; 2 – вторичный элемент; 3 – электропроводящая часть ВЭ;
4 – обратный магнитопровод

Для увеличения скорости перемещения бегущего магнитного поля и транспортного экипажа на магнитном подвесе при неизменной частоте тока требуется увеличивать полюсное деление индуктора ЛАД. Это приводит к увеличению сечения ярма индуктора ЛАД с продольным магнитным полем и возрастанию его массы, что значительно усложняет задачу реализации устойчивого магнитного подвеса высокоскоростного транспортного экипажа. Поэтому для применения ЛАД с продольным магнитным потоком в системах МЛТ необходимо обязательное питание обмотки его индуктора токами повышенной частоты, что позволяет снизить габариты и массу индуктора.

Зачастую индукторы ЛАД с поперечным магнитным потоком выполняют из отдельных П- или Ш-образных сердечников, набранных из отдельных пластин холоднокатаной стали. Индукторы ЛАД с поперечным магнитным потоком с дискретным строением магнитной системы развивают значительные усилия магнитной левитации. У этих линейных асинхронных машин силовые линии магнитного поля (штриховая линия на рис. 2.33) замыкаются в направлении, поперечном перемещению магнитного поля и движению экипажа МЛТ (направление движения показано стрелкой 7 на рис. 2.33).

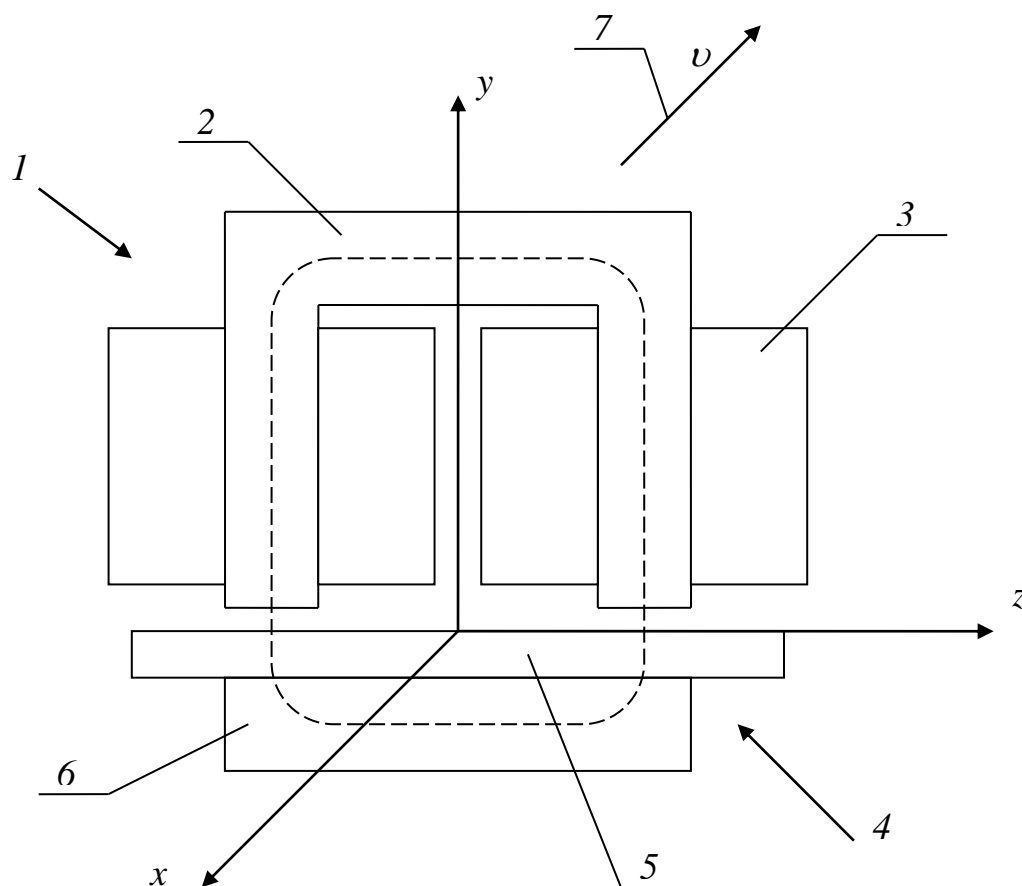


Рис. 2.33. Упрощенная конструктивная схема ЛАД с поперечным магнитным потоком, индуктор которого выполнен из отдельных сердечников:

- 1 – индуктор; 2 – сердечник индуктора; 3 – катушка обмотки;
 4 – вторичный элемент; 5 – электропроводящая часть вторичного элемента;
 6 – обратный магнитопровод; 7 – направление движения экипажа МЛТ

Последнее обстоятельство позволяет получить высокие скорости перемещения экипажа МЛТ при промышленной частоте тока в обмотках индуктора ЛАД, поскольку длина пути замыкания силовых линий основного магнитного потока индуктора не связана с величиной его полюсного деления. Это – одна из главных особенностей линейных асинхронных двигателей с поперечным магнитным потоком, делающая их перспективными для применения в высокоскоростных транспортных экипажах на магнитном подвесе.

Следует заметить, что ЛАД с поперечным магнитным потоком имеют более простую конструкцию по сравнению с линейными асинхронными двигателями с продольным магнитным потоком и что они, благодаря дискретности строения магнитной системы (её модульности), более технологичны в изготовлении.

В Ростовском государственном университете путей сообщения (РГУПС) разработан новый тип линейного асинхронного двигателя – ЛАД с продольно-поперечным замыканием магнитного потока, представляющий собой машину гибридного типа, сочетающую в себе свойства линейных асинхронных двигателей с продольным и поперечным магнитным потоком. Одна из простейших конструктивных схем линейных машин данного типа изображена на рисунке 2.34. Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным магнитным потоком помимо тяговых и левитационных усилий способны развивать усилия поперечной автоматической самостабилизации, что очень важно для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта.

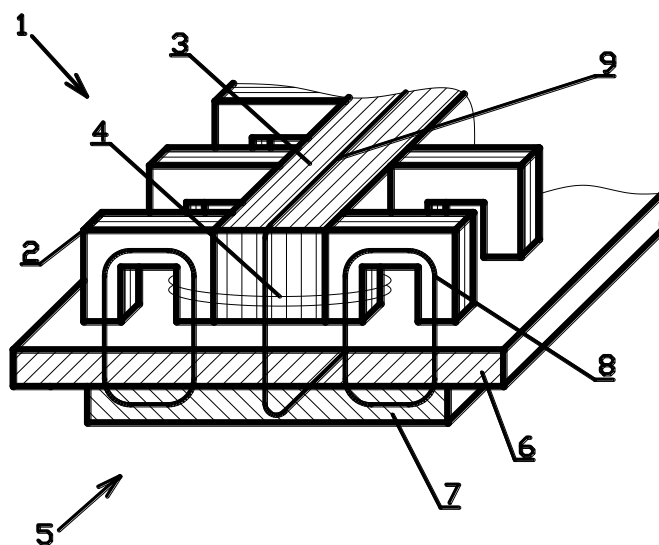


Рис. 2.34. ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком:
 1 – индуктор; 2 – поперечно расположенные сердечники; 3 – продольный магнитопровод; 4 – катушка трёхфазной обмотки; 5 – вторичный элемент;
 6 – электропроводящая часть ВЭ; 7 – обратный магнитопровод;
 8 – силовая линия магнитного поля, замыкающегося в поперечном направлении; 9 – силовая линия магнитного поля, замыкающегося в продольном направлении

Усилия поперечной самостабилизации для транспортного экипажа, подвешенного в магнитном поле, обеспечивают точную его ориентацию относительно путевой структуры за счёт того, что при боковом смещении поезда, например из-за сильного бокового ветра, магнитное поле индуктора ЛАД при взаимодействии с токами, им индуктированными во вторичном элементе, создаёт механическое усилие, возвращающее высокоскоростной экипаж в исходное состояние.

Причём величина усилия, возвращающего экипаж МЛТ в положение, когда он располагается симметрично относительно путевой структуры, будет пропорциональна величине бокового смещения. Это значительно повышает безопасность движения магнитолевитационного транспорта. В качестве примера приведём конструктивную схему ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком для системы высокоскоростного магнитолевитационного транспорта, развивающего усилия поперечной самостабилизации экипажа, разработанную в РГУПС (рис. 2.35).

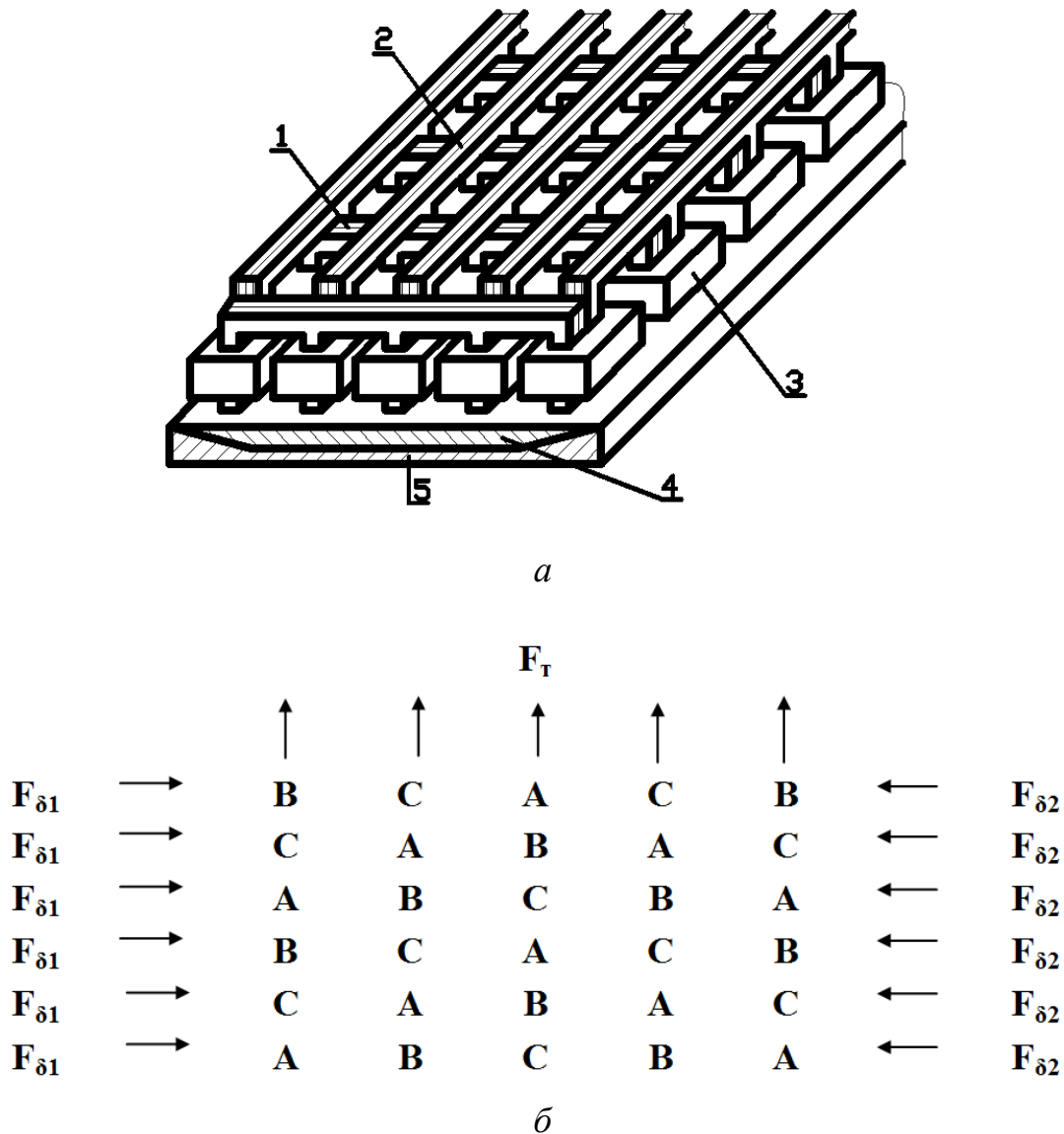


Рис. 2.35. ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком для ВСНТ:
 а – конструктивная схема; б – схема соединения обмоток;
 1 – сердечник, шихтованный в поперечном направлении; 2 – сердечник, шихтованный в продольном направлении; 3 – катушка многофазной обмотки;
 4 – электропроводящая часть вторичного элемента (якоря);
 5 – магнитопроводящая часть вторичного элемента; F_T – тяговые усилия;
 $F_{\delta 1}$ и $F_{\delta 2}$ – поперечные механические усилия

Линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком (рис. 2.35, *а*) содержит магнитопровод индуктора, образованный сочетанием шихтованных в поперечном направлении сердечников 1, соединённых между собой шихтованными в продольном направлении сердечниками 2, имеющими форму гребёнки. Катушки 3 многофазной (трёхфазной) обмотки охватывают зубцы как поперечных, так и продольных сердечников. У вторичного элемента (якоря) электропроводящая часть 4 имеет в поперечном сечении форму равнобедренной трапеции, большее основание которой обращено к индуктору ЛАД, а меньшее прилегает к магнитопроводящей части ВЭ. Катушки 3 многофазной (трёхфазной) обмотки образуют продольные и поперечные ряды.

Катушки 3 каждого продольного ряда обмотки образуют одинаковые рядки следования фаз *A*, *B* и *C*.

Принцип действия данного ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком заключается в следующем.

При подключении обмотки индуктора к источнику трёхфазного напряжения по её катушкам потечёт трёхфазный ток, который создаст бегущие магнитные потоки. Магнитный поток индуктора, бегущий в направлении движения (в продольном направлении), пересекая электропроводящую часть 4 ВЭ (якоря), будет наводить в ней электродвижущие силы (ЭДС), которые вызовут протекание вихревых токов. Магнитный поток, бегущий в продольном направлении, при взаимодействии с вихревыми токами, индуцированными им во вторичном элементе, создаёт тяговое и подъемное усилия (рис. 2.35, *б*). Подъемное усилие (усилие магнитного подвеса) отталкивает индуктор (транспортный экипаж) от вторичного элемента (путевой структуры), и под действием тягового усилия экипаж приходит в движение в направлении, противоположном направлению продольно бегущего магнитного потока. Магнитные потоки, бегущие в поперечном движению экипажа МЛТ направлении навстречу друг другу, при пересечении ими электропроводящей части 4 вторичного элемента наводят в ней ЭДС и вихревые токи. Магнитные потоки, бегущие в поперечном направлении, при взаимодействии с вихревыми токами, ими индуцированными, создают механические усилия, направленные навстречу друг другу. В том случае, если вагон высокоскоростного экипажа расположен симметрично (в поперечном направлении) относительно путевой структуры (ВЭ), поперечные механические усилия одинаковы, взаимно уравновешиваются и не оказывают никакого влияния на движение экипажа МЛТ. При смещении индуктора линейной машины в поперечном направлении относительно путевой структуры (например, при сильном боковом ветре или при вписывании в кривой участок пути) равновесие встречно направленных поперечных механических усилий нарушается. Это происходит из-за того, что часть индуктора ЛАД располагается при боковом его смещении над участком путевой структуры (электропроводящей части ВЭ), активное сопротивление которого будет большим, чем части ВЭ, под основной частью индуктора. При этом поперечное боковое усилие увеличится. В то же самое время величина поперечного бокового усилия, создаваемого при взаимодействии магнитного поля, бегущего в поперечном направлении, с вихревыми токами в центральной части ВЭ, имеющей меньшее активное сопротивление,

будет оставаться на прежнем уровне (как и до бокового смещения экипажа). Под действием разности поперечных усилий индуктор ЛАД (экипаж МЛТ) плавно вернётся в прежнее положение и будет располагаться симметрично относительно путевой структуры. Трапецеидальная форма поперечного сечения электропроводящей части ВЭ обеспечивает плавное увеличение её сопротивления от центрального сегмента ВЭ к его краям. Тем самым достигается большая плавность изменения усилий поперечной самостабилизации экипажа МЛТ относительно путевой структуры и исключается возникновение боковых колебаний. Все эти процессы происходят автоматически и повышают безопасность при движении высокоскоростных поездов на магнитном подвесе.

2.2.3 Линейный асинхронный двигатель с повышенными усилиями боковой самостабилизации

Линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком может как устанавливаться на экипаже МЛТ, так и использоваться в качестве путевой структуры высокоскоростного транспорта. Следующая конструкция ЛАД, созданная в РГУПС, позволяет ещё в большей мере повысить безопасность движения перспективных систем МЛТ за счёт увеличения боковых усилий. На рисунке 2.36 схематично представлено поперечное сечение ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком.

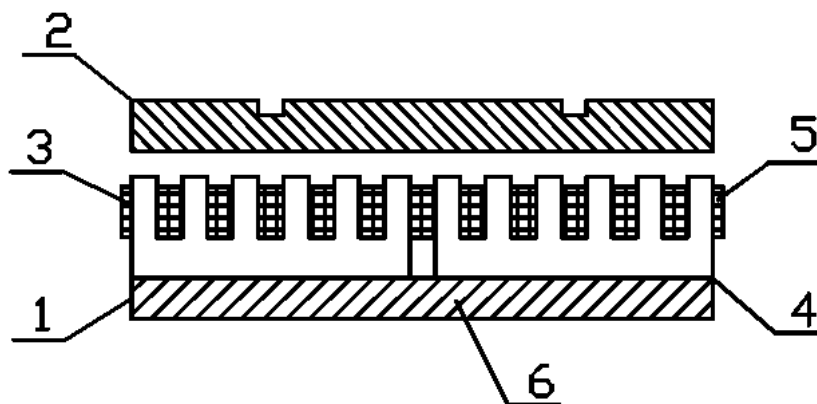


Рис. 2.36. ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком:
 1 – основной индуктор; 2 – вторичный элемент из электропроводящего материала; 3 – катушки обмотки основного индуктора; 4 – дополнительный индуктор; 5 – катушки обмотки дополнительного индуктора;
 6 – ферромагнитное основание

Рассмотрим конструкцию и принцип работы данного ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком. Линейный асинхронный двигатель для системы МЛТ (см. рис. 2.36) содержит основной индуктор 1 и вторичный элемент 2 из электропроводящего материала. Индуктор 1 состоит из сердечника и трёхфазной обмотки, катушки 3 которой образуют ряды в продольном и поперечном движении транспортного экипажа направлениях. Рассматриваемый ЛАД снабжён дополнительным индуктором 4, идентичным основному индуктору 1 и

расположенным параллельно ему. Катушки 5 трёхфазной обмотки дополнительного индуктора 4 также образуют ряды в продольном и поперечном движении направлениях. Оба индуктора ЛАД для лучшей электромагнитной связи между ними установлены на общем ферромагнитном основании 6. Вторичный элемент 2 образован сочетанием пяти электропроводящих полос, примыкающих друг к другу и выполненных в форме параллелепипедов.

Средняя и крайние полосы имеют меньшее активное сопротивление, чем полосы, размещённые между ними. На рис. 2.36 показано, что полосы, составляющие вторичный элемент, имеют разные площади поперечных сечений. Возможен вариант конструкции вторичного элемента ЛАД, при котором образующие его электропроводящие полосы будут изготовлены из материалов с разным активным сопротивлением.

Схемы соединения трёхфазных обмоток основного и дополнительного индукторов линейного асинхронного двигателя представлены на рис. 2.37.

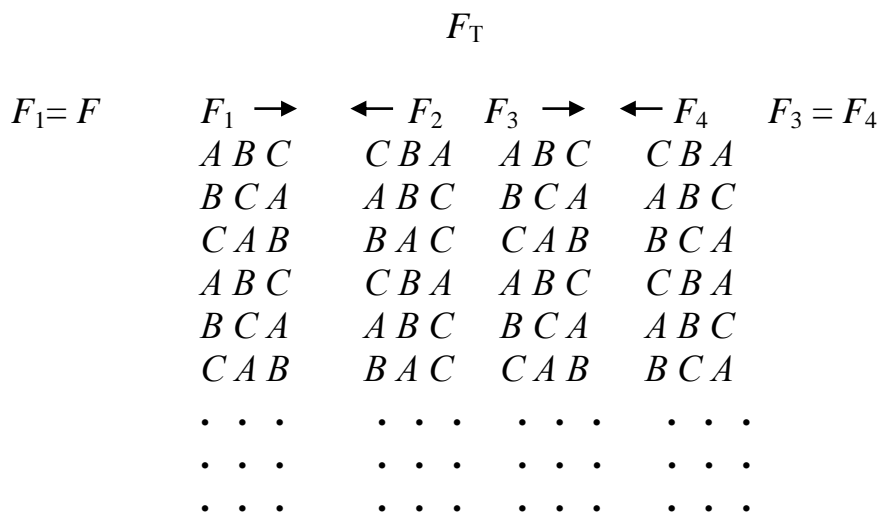


Рис. 2.37. Схемы соединения обмоток основного и дополнительного индукторов ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком:
 F_T – тяговые усилия; F_1 и F_2 – поперечные усилия основного индуктора;
 F_3 и F_4 – поперечные усилия дополнительного индуктора

На рис. 2.37 символами A , B и C обозначены фазы источника напряжения, к которым подключены катушки обмоток обоих индукторов. Видно, что продольные ряды катушек обмоток индукторов ЛАД образуют прямые порядки следования фаз A , B и C , а все поперечные ряды катушек обмоток основного и дополнительного индукторов имеют до середины ряда один, а после середины – противоположный порядок следования фаз. Механические усилия, возникающие при взаимодействии бегущих магнитных полей ЛАД с токами, ими индуктированными во вторичном элементе, обозначены стрелками и символами F_T , F_1 , F_2 , F_3 и F_4 . Работает данный линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком следующим образом. При подключении катушек 3 и 5 обмоток основного 1 и дополнительного 4 индукторов к источнику трёхфазного напряжения (см. рис. 2.36 и 2.37) по катушкам фаз обмо-

ток потекут токи, возбуждающие бегущие магнитные поля, которые будут пересекать электропроводящий вторичный элемент 2 и наводить в нём ЭДС.

Под действием электродвижущих сил во вторичном элементе потекут вихревые токи, вступающие во взаимодействие с бегущими магнитными полями, которые послужили причиной их возникновения. В результате будут создаваться механические усилия. При взаимодействии бегущих магнитных полей, возбуждаемых продольными рядами катушек 3 и 5 основного и дополнительного индукторов, имеющих одинаковые порядки следования фаз, с вихревыми токами, ими индуцированными во вторичном элементе 2, будут создаваться механические усилия F_T (см. рис. 2.37). Под действием усилий F_T вторичный элемент (экипаж ВСНТ), подвешенный в магнитном поле, начнёт перемещаться в продольном направлении. Одновременно токи в поперечных рядах катушек 3 и 5 основного и дополнительного индукторов ЛАД возбуждают в каждом поперечном сечении линейного двигателя по две пары встречно бегущих магнитных полей, например A, B, C и C, B, A ; A, B, C и C, B, A (верхняя строка на рис. 2.37) и т. д. Эти бегущие навстречу друг другу в поперечном направлении магнитные поля, пересекая вторичный элемент 2, будут индуцировать в нём ЭДС и вихревые токи. При взаимодействии поперечно бегущих слева направо магнитных полей основного 1 и дополнительного 4 индукторов ЛАД с вихревыми токами, ими индуцированными в электропроводящем вторичном элементе 2 (см. рис. 2.36 и 2.37), будут создаваться (в каждом поперечном сечении по всей длине линейного асинхронного двигателя) одинаковые механические усилия F_1 и F_3 , действующие слева направо. А при взаимодействии поперечно бегущих справа налево магнитных полей каждого из индукторов ЛАД с вихревыми токами, ими индуцированными во вторичном элементе 2, будут создаваться одинаковые механические усилия F_2 и F_4 , действующие также справа налево в каждом поперечном сечении двигателя по всей его длине. При симметричном расположении вторичного элемента 2, являющегося днищем экипажа МЛТ, относительно основного 1 и дополнительного 4 индукторов в поперечном направлении усилия F_1 и F_2 и F_3 и F_4 одинаковы по величине, взаимно уравниваются и не оказывают никакого влияния на продольное движение вторичного элемента 2 (экипажа МЛТ).

Если по каким-то причинам, например при сильном боковом ветре, экипаж МЛТ сместится вправо относительно основного и дополнительного индукторов ЛАД, то будет нарушено равновесие механических усилий, действующих в поперечном направлении навстречу друг другу. На рис. 2.38 индукторы ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком не показаны. Вторичный элемент показан на рис. 2.38. Усилия F_1 уменьшатся в каждом поперечном сечении по длине ЛАД, поскольку они будут создаваться при взаимодействии эллиптических бегущих магнитных полей с вихревыми токами, ими индуцированными во вторичном элементе. В левой части индуктора бегущие слева направо эллиптические магнитные поля будут возбуждаться токами всего двух катушек, подключённых к фазам B и C источника трехфазного напряжения (ведь левая катушка, подключённая к фазе A , не взаимодействует со вторичным элементом из-за его смещения).

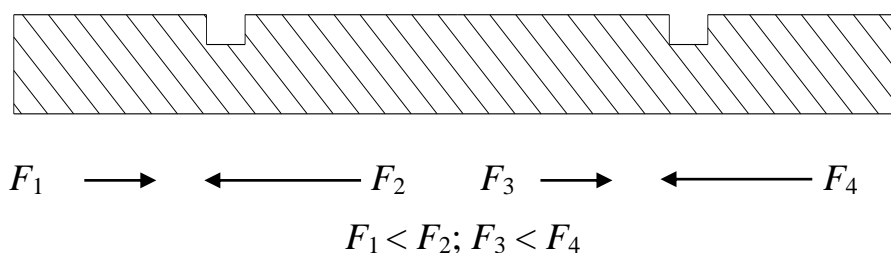


Рис. 2.38. Усилия при поперечном боковом смещении вторичного элемента вправо относительно индуктора

Поэтому и усилия F_1 уменьшаются. Одновременно усилия F_2 , действующие на вторичный элемент справа налево, увеличатся за счёт того, что при смещении вторичного элемента вправо (см. рис. 2.38) магнитное поле, бегущее в основном индукторе справа налево, остаётся по-прежнему круговым (оно создаётся токами трёх катушек – C , B и A), а активное сопротивление вторичного элемента над этой зоной катушек увеличивается за счёт того, что при смещении вторичного элемента над катушками C , B и A основного индуктора поперечное сечение части вторичного элемента уменьшается. В результате усилия F_2 возрастают. При таком смещении вторичного элемента уменьшатся и усилия F_3 (см. рис. 2.38) по сравнению с симметричным его расположением относительно индуктора ЛАД (см. рис. 2.36 и 2.37). Объясняется это тем, что хотя характер бегущего слева направо магнитного поля дополнительного индуктора и остаётся круговым (оно создаётся токами трёх катушек, A , B и C (см. рис. 2.38), но активное сопротивление части вторичного элемента, располагающегося над этими катушками, снизится за счёт того, что сечение (поперечное) данной части вторичного элемента увеличится. В то же самое время встречно им направленные усилия F_4 увеличатся за счёт возрастания активного сопротивления части вторичного элемента, расположившейся над катушками C , B и A дополнительного индуктора. В результате возникнут разности поперечных механических усилий $F_2 - F_1$ и $F_4 - F_3$, под действием которых вторичный элемент (экипаж МЛТ) будет возвращаться в симметричное положение, соответствующее рисункам 2.36 и 2.37.

Эта конструкция ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком развивает по сравнению с предыдущей большие усилия поперечной стабилизации и позволит существенным образом повысить безопасность движения систем МЛТ.

2.2.4 Регулируемый линейный асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента

Весьма актуальным вопросом является повышение величины тягового усилия ЛАД, возможности регулирования его и скорости линейного перемещения. Один из путей решения этой задачи видится в применении новых, нетрадиционных конструкций линейных асинхронных двигателей, разработанных впервые в Ростовском государственном университете путей сообщения. Пред-

ложено выполнять обмотку вторичного элемента ЛАД короткозамкнутой с возможностью регулирования её сопротивления. Варианты применения регулируемых ЛАД на рельсовом подвижном составе на участках с большими уклонами представлены на рис. 2.39.

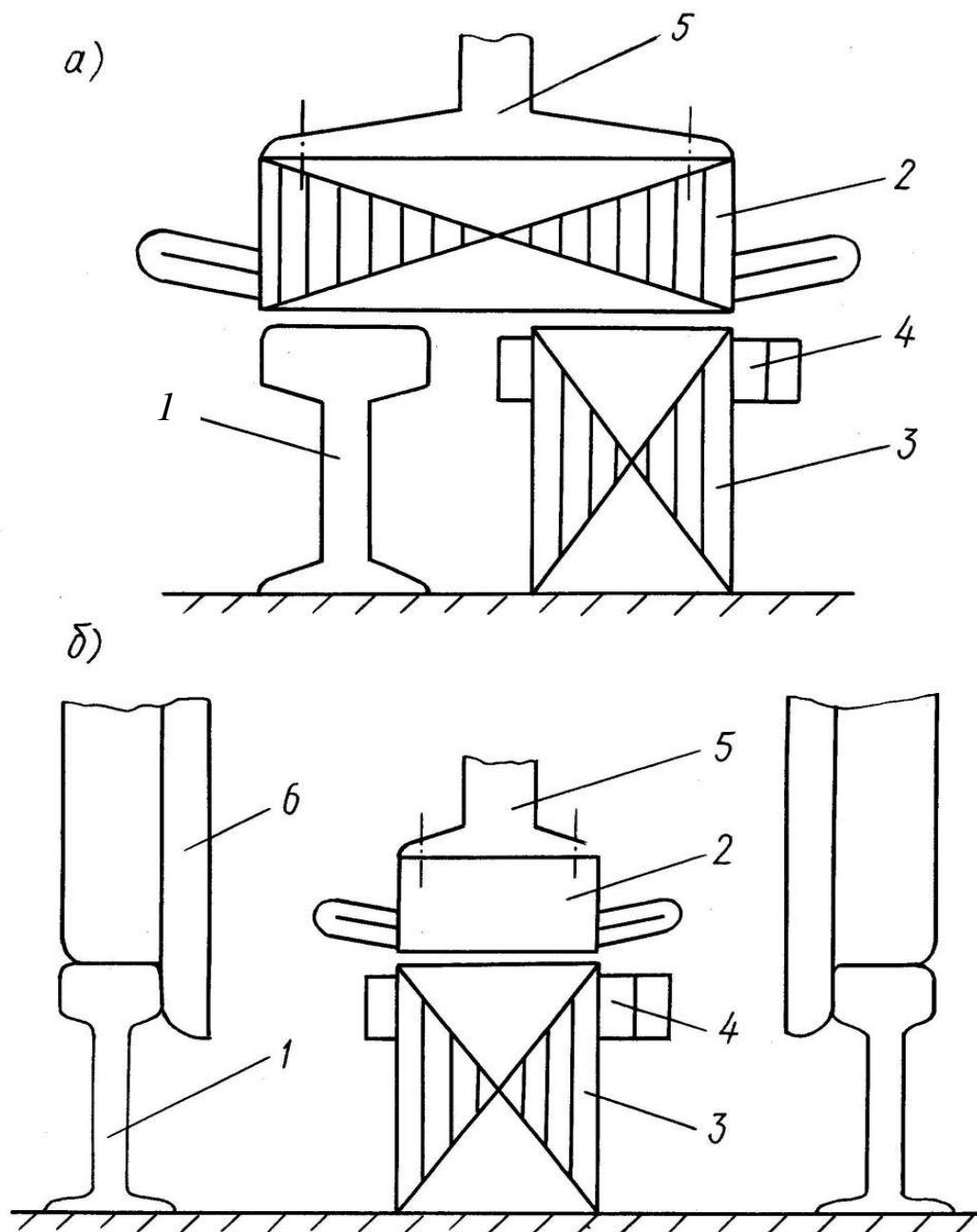


Рис. 2.39. Схемы расположения регулируемого ЛАД для торможения и дополнительной тяги на участках с крутыми уклонами:
 а – вторичные элементы размещены внутри колеи возле каждого рельса;
 б – центральное расположение вторичного элемента;
 1 – рельс; 2 – индуктор ЛАД; 3 – сердечник вторичного элемента; 4 – обмотка вторичного элемента; 5 – рама; 6 – колесо; 7 – замыкающий элемент

Расположение индукторов линейных асинхронных двигателей над рельсами и над вторичными элементами показано на рис. 2.39, *а*. Внутри колеи, возле каждого из рельсов 1 расположены вторичные элементы 3, сердечники которых набраны из отдельных пластин электротехнической стали. Индукторы 2 ЛАД располагаются и над рельсами 1, и над вторичными элементами 3, содержащими короткозамкнутую обмотку 4. С движущимся экипажем индукторы 2 жёстко связаны рамами 5. Сопротивление обмотки 4 вторичного элемента 3 может регулироваться в широких пределах. С целью повышения эффективности ЛАД для улучшения работы подвижного состава на участках с большими уклонами предусмотрена возможность изменения сопротивления короткозамкнутой обмотки.

Рассмотрим более подробно конструкцию регулируемого ЛАД, представленную на рис. 2.40.

Линейный асинхронный двигатель (рис. 2.40, *а*) содержит индуктор, состоящий из сердечника 1 с трёхфазной обмоткой 2, и вторичный элемент 3, включающий сердечник 4 и обмотку 5. В каждом пазу вторичного элемента размещены по несколько электропроводящих изолированных друг от друга стержней 6, которые расположены по высоте паза один над другим. Все стержни вторичной обмотки с одной стороны замкнуты накоротко боковой шиной 7, а с другой стороны эти стержни образуют выемку в виде полуцилиндра, в которой размещён цилиндр 8, установленный с возможностью поворота относительно своей горизонтальной оси. Цилиндр состоит из двух полуцилиндров. Один полуцилиндр 9 является электропроводящим и выполнен, например, из меди или алюминия, а второй полуцилиндр 10 изготовлен из изоляционного материала. Для возможности вращения цилиндр снабжен рукояткой 11. К сердечнику вторичного элемента цилиндр прикреплен скобами 12.

Принцип действия данного регулируемого ЛАД состоит в следующем. При подключении обмотки к источнику трёхфазного напряжения создаётся бегущее магнитное поле, пересекающее стержни 6 обмотки 5 вторичного элемента и наводящее в них электродвижущие силы. Если стержни 6 замкнуты с обеих сторон, то под действием ЭДС в них потечёт ток, который будет взаимодействовать с бегущим магнитным полем. В результате этого взаимодействия создаётся тяговое усилие, заставляющее индуктор двигаться в сторону, противоположную направлению перемещения бегущего магнитного поля. Известно, что линейные асинхронные двигатели развивают незначительные пусковые усилия. В данном случае есть возможность повышения пускового тягового усилия путём увеличения активного сопротивления короткозамкнутой обмотки 5 вторичного элемента 3. С этой целью цилиндр 8 замыкает только верхние стержни 6 обмотки вторичного элемента (рис. 2.40, *б*). Заметим, что электропроводящая часть 9 цилиндра 8 может замыкать стержень 6 при пуске не полностью. Это позволит ещё больше увеличить активное сопротивление обмотки вторичного элемента.

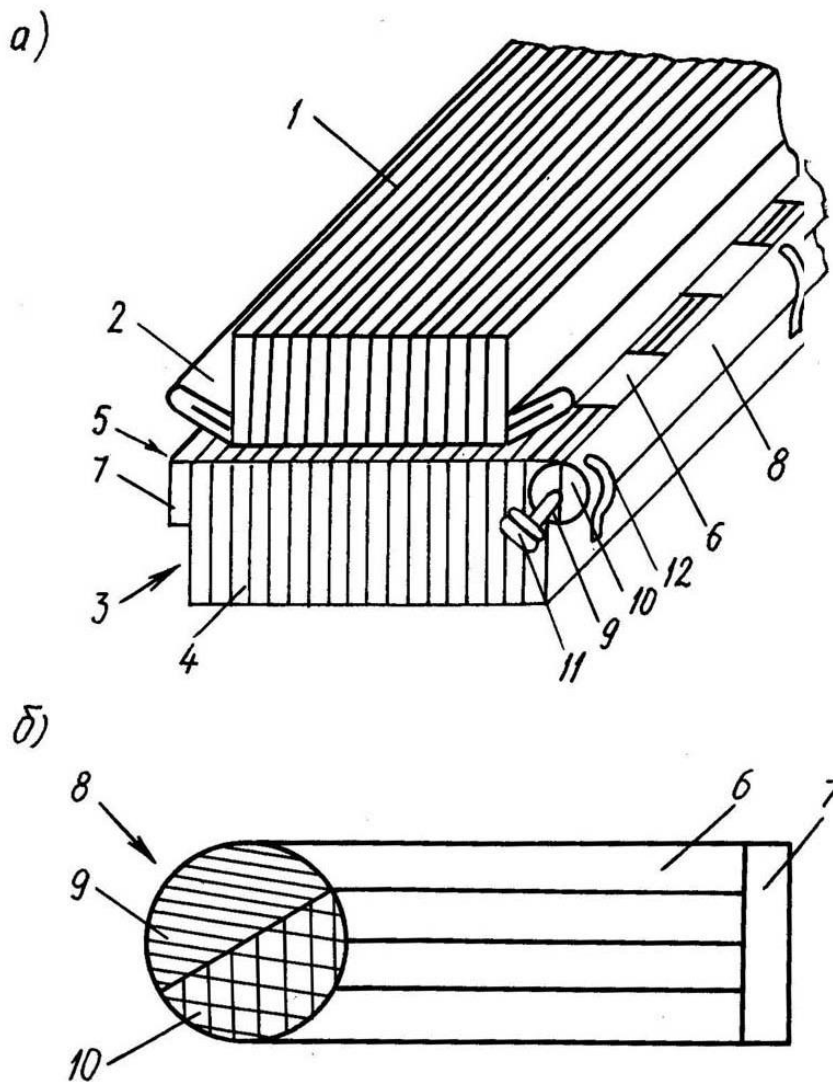


Рис. 2.40. Регулируемый линейный асинхронный двигатель:

а – конструктивная схема ЛАД; *б* – вторичный элемент;

1 – сердечник; *2* – обмотка; *3* – вторичный элемент; *4* – сердечник вторичного элемента; *5* – обмотка вторичного элемента; *6* – стержни обмотки вторичного элемента; *7* – замыкающая шина; *8* – цилиндр; *9* – электропроводящий полуцилиндр; *10* – полуцилиндр из изоляционного материала;

11 – рукоятка; *12* – скобы

Конструкция регулируемого ЛАД позволяет регулировать скорость движения плавно и в широких пределах и сходна по своим свойствам с асинхронными машинами с фазной обмоткой ротора. Для регулирования скорости движения вращают рукоятку *11* цилиндра *8*. При этом увеличивается число замкнутых стержней *6* в каждом пазу вторичного элемента и увеличивается скорость линейного перемещения, т. к. при этом величина активного сопротивления вторичной обмотки уменьшается. Для уменьшения скорости двигателя рукояткой *11* поворачивают цилиндр *8* таким образом, чтобы число замыкаемых стержней *6* было бы минимальным. Для расширения диапазона регулирования скорости машины целесообразно увеличивать число изолированных стержней *6* в каждом

пазу сердечника вторичного элемента. Привод поворота цилиндра 8 может быть ручным, электромеханическим, пневматическим или гидравлическим.

Полученный простой способ регулирования скорости перемещения и пускового усилия ЛАД за счёт изменения активного сопротивления вторичной обмотки позволяет расширить функциональные возможности электрической машины. Диапазон регулирования скорости, пускового и тягового усилий расширен в линейном асинхронном двигателе (рис. 2.41). Конструкция индуктора данного ЛАД не имеет принципиальных отличий от описанной выше. Основное отличие состоит в конструкции замыкающего цилиндра, схематически показанной на рис. 2.41. На рис. 2.41 изображены фрагменты замыкания изолированных электропроводящих стержней, лежащих в пазу сердечника вторичного элемента, сегментами замыкающего цилиндра, имеющими различное сопротивление.

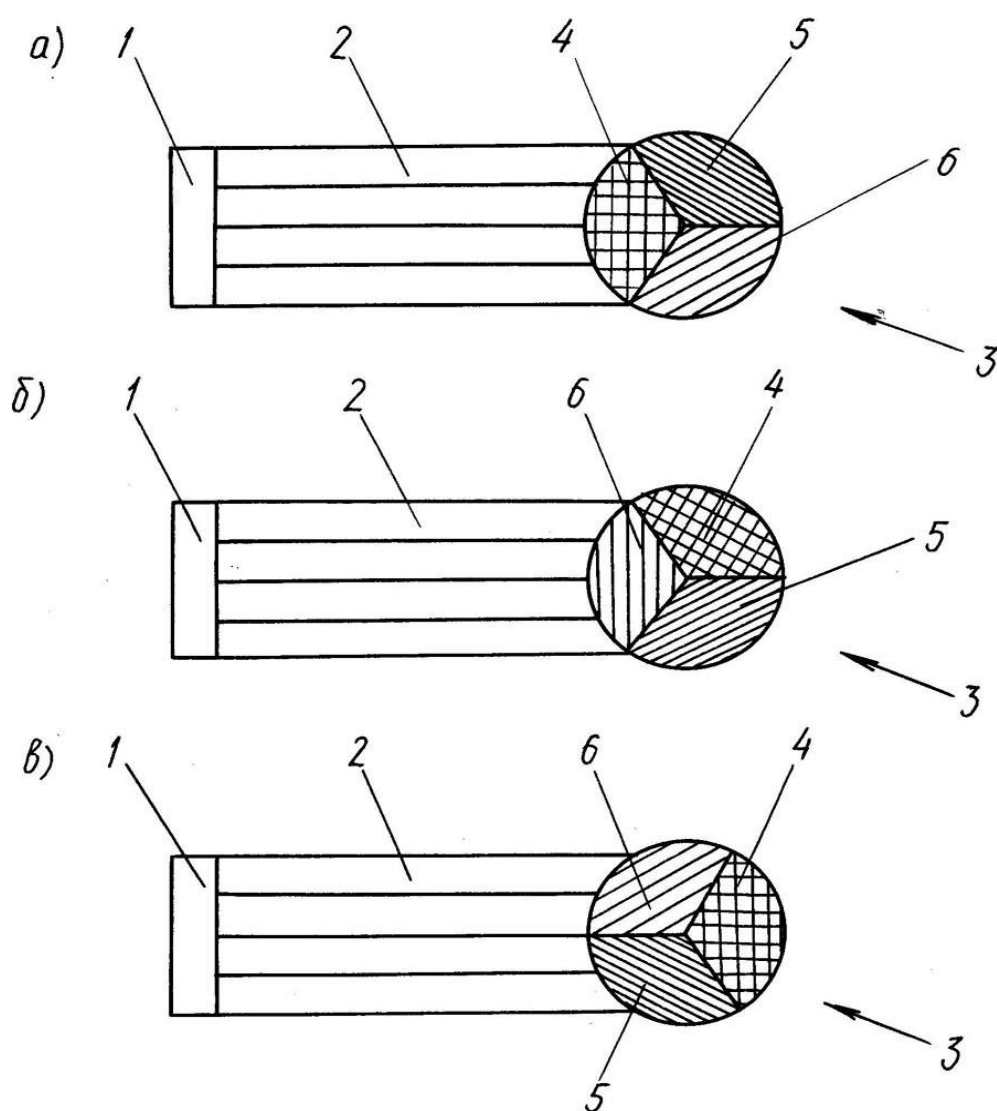


Рис. 2.41. Замыкание цилиндром проводников обмотки вторичного элемента.

а – замыкание стержня ВЭ изоляционной частью; *б* – замыкание стержня ВЭ алюминиевой частью; *в* – замыкание стержня ВЭ медной частью;
1 – шина; *2* – проводники; *3* – замыкающий цилиндр; *4* – изоляционная часть;
5 – медная часть; *6* – алюминиевая часть

Замыкающая шина 1 с одной стороны обеспечивает закорачивание всех стержней 2 обмотки вторичного элемента, а с другой стороны эти стержни замыкаются цилиндром 3, содержащим, например, следующие сегменты: изоляционные 4, электропроводящие 5 и 6, выполненные соответственно из меди и алюминия.

Перед пуском двигателя стержни 2 вторичной обмотки замкнуты изоляционным сегментом 4. В этом случае замкнутой цепи во вторичной обмотке нет (рис. 2.41, а).

Для пуска двигателя в ход поворачивают цилиндр 3, и электропроводящий сегмент замыкает один или два стержня обмотки вторичного элемента. Вторичная обмотка ЛАД становится короткозамкнутой, и при пересечении её бегущим магнитным полем индуктора в ней индуцируются ЭДС и токи.

При взаимодействии бегущего магнитного поля с токами стержней 2 вторичного элемента создаётся пусковое тяговое усилие, под действием которого индуктор начинает своё движение. По мере разгона электропроводящим сегментом 6, выполненным из алюминия, замыкают все стержни 2 в пазах вторичного элемента (рис. 2.41, б).

Максимальная скорость линейного перемещения регулируемого ЛАД достигается при закорачивании всех стержней 2 вторичной обмотки медным сегментом 5 цилиндра 3.

Разработаны варианты выполнения регулируемых тяговых ЛАД, способных развивать дополнительно и усилия поперечной автоматической самостабилизации высокоскоростного экипажа с магнитной левитацией относительно путевой структуры при любом направлении движения, создавать повышенные тяговые усилия при расширении диапазона изменения скорости перемещения (рис. 2.42, 2.43).

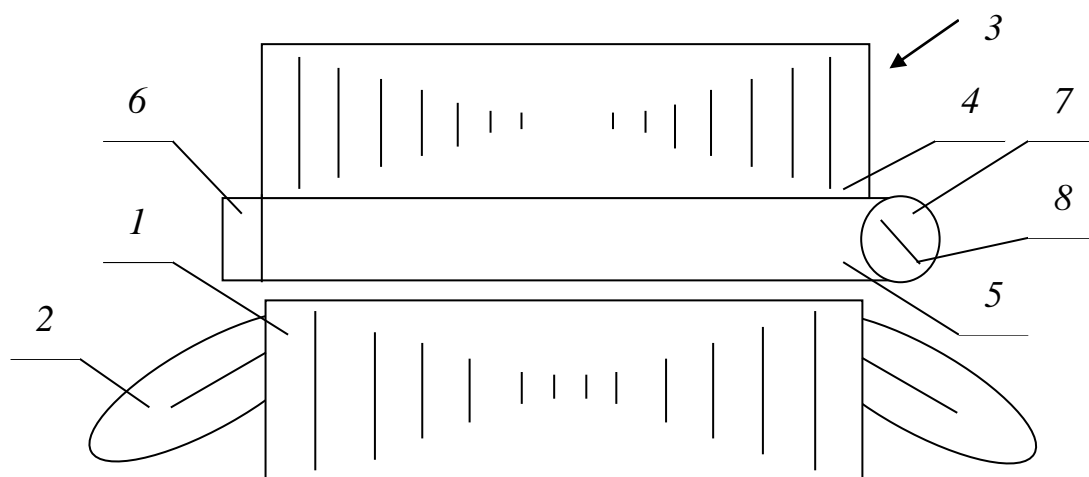


Рис. 2.42. Регулируемый линейный асинхронный двигатель:
1 – сердечник индуктора; 2 – обмотка индуктора; 3 – вторичный элемент;
4 – сердечник вторичного элемента; 5 – электропроводящие стержни;
6 – электропроводящая шина; 7 – замыкающий цилиндр; 8 – рукоятка

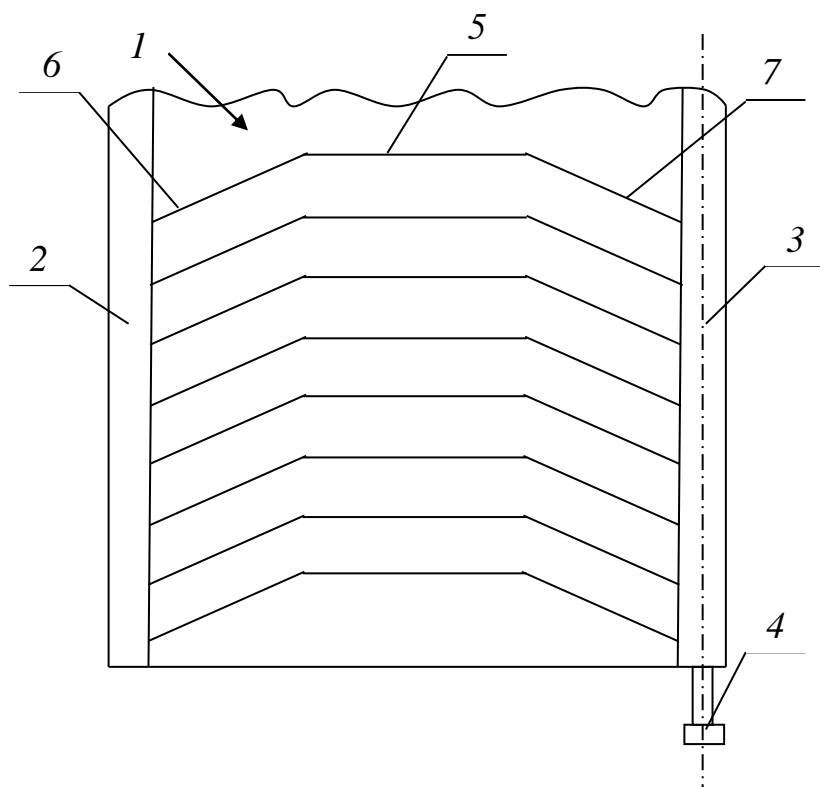


Рис. 2.43. Вторичный элемент регулируемого ЛАД:
 1 – электропроводящие стержни; 2 – электропроводящая шина;
 3 – замыкающий цилиндр; 4 – рукоятка; 5 – центральная часть
 электропроводящих стержней; 6 и 7 – боковые части
 электропроводящих стержней

При симметричном расположении индуктора относительно вторичного элемента регулируемого ЛАД (рис. 2.44), размещённого на транспортном экипаже, бегущее магнитное поле, пересекая проводящие стержни вторичного элемента, индуцирует в них ЭДС и токи.

Токи в стержнях ВЭ, взаимодействуя с бегущим магнитным полем, создают механические усилия, направление действия которых перпендикулярно токам, протекающим в различных участках стержней. Это усилия F_T , F_1 и F_2 (см. рис. 2.44). Усилия F_1 и F_2 разлагаются на усилия $F_{д1}$ и $F_{д2}$, которые складываются с основным тяговым усилием ЛАД F_T и составляют тяговую силу, приводящую экипаж ВСНТ в движение, и поперечные усилия $F_{\delta 1}$ и $F_{\delta 2}$, одинаковые по величине и действующие навстречу друг другу.

При симметричном расположении индуктора ЛАД и ВЭ, размещённого на экипаже ВСНТ, поперечные усилия взаимно уравниваются и не влияют на движение данного транспортного средства. Если экипаж МЛТ сместится влево относительно индуктора (см. рис. 2.45), например под действием сильного бокового ветра, то равновесие поперечных усилий нарушится и $F_{\delta 2}$ станет больше $F_{\delta 1}$.

Под действием разности этих сил экипаж будет автоматически возвращаться в исходное симметричное положение относительно индуктора ЛАД, выполняющего роль путевой структуры (см. рис. 2.44). Это позволяет улучшить поперечную динамику и безопасность движения высокоскоростного поезда.

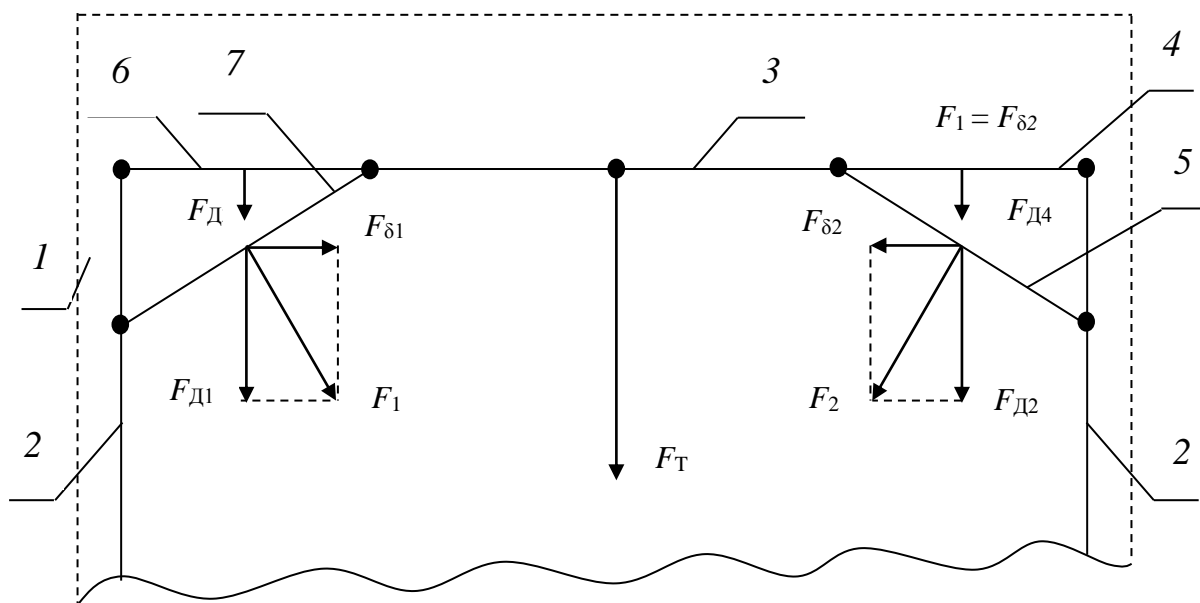


Рис. 2.44. Симметричное расположение индуктора ЛАД
относительно вторичного элемента:

1 – индуктор; 2 – замыкающие элементы; 3 – центральные части стержней ВЭ;
4, 6 – боковые прямолинейные части стержней ВЭ; 5, 7 – боковые наклонные
части стержней ВЭ

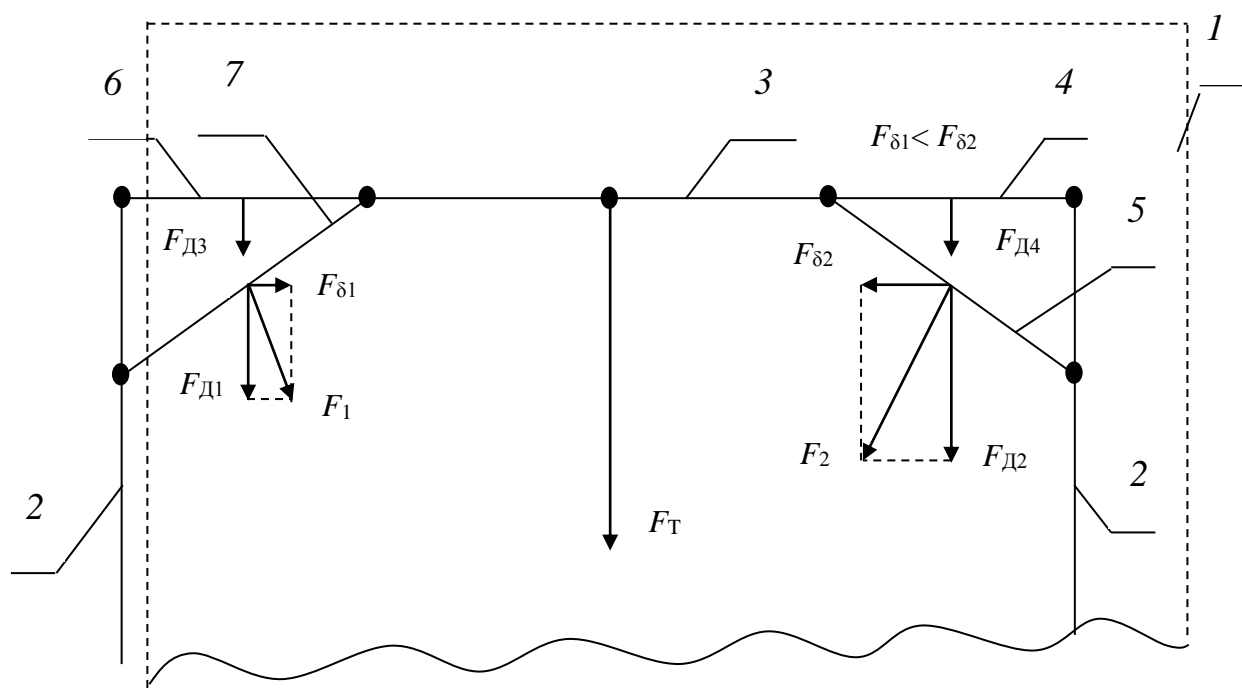


Рис. 2.45. Поперечное смещение вторичного элемента
относительно индуктора:

1 – индуктор; 2 – замыкающие элементы; 3 – центральные части стержней ВЭ;
4, 6 – боковые прямолинейные части стержней ВЭ;
5, 7 – боковые наклонные части стержней ВЭ

Сопротивление вторичного элемента можно регулировать не только механически при изменении положения замыкающего элемента. Такой же результат может быть достигнут при поочередном замыкании отдельных проводников стержней вторичного элемента при помощи, например, герконов или тиристоров (рис. 2.46). Герконы (герконовые реле) легко управляются и срабатывают очень быстро. Современные герконы способны работать при значительных токах.

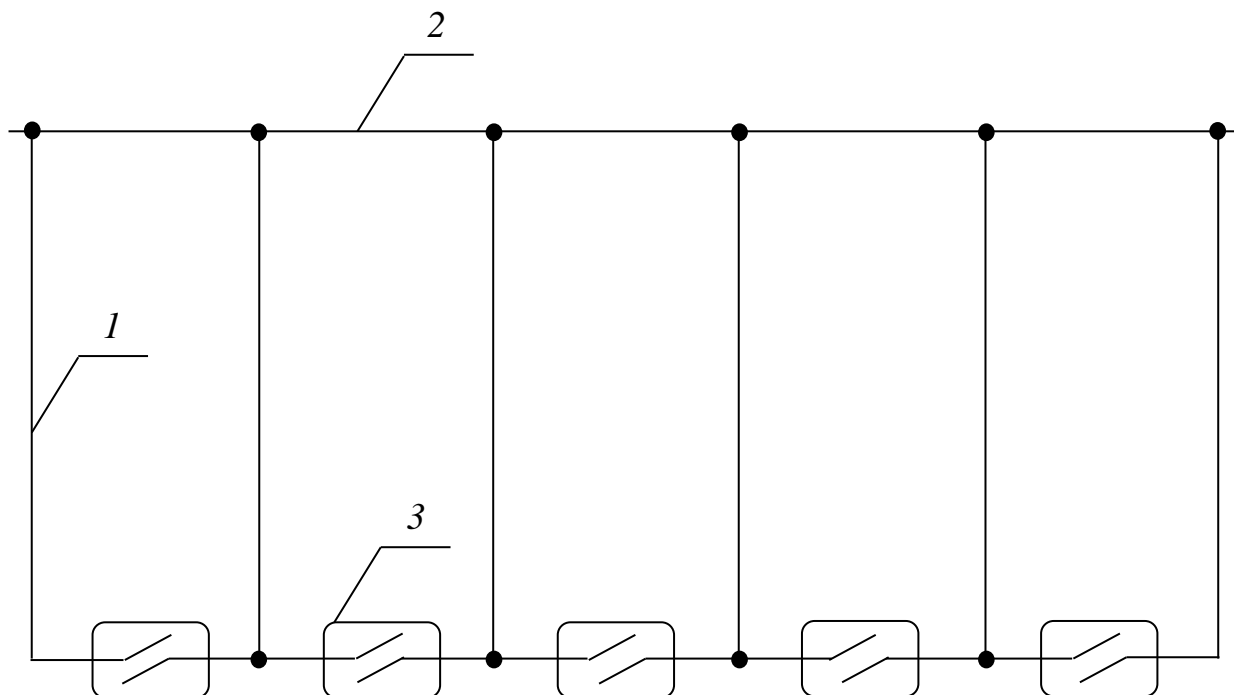


Рис. 2.46. Фрагмент обмотки вторичного элемента регулируемого ЛАД:
1 – стержни; 2 – замыкающая шина; 3 – герконы

Схемы управления пуском в ход и регулированием скорости линейного асинхронного двигателя достаточно просты, надёжны и могут быть реализованы на элементной базе, производимой в Российской Федерации. При подаче сигнала на катушки соответствующих герконовых реле герконы 3 (см. рис. 2.46) срабатывают и образуют короткозамкнутую обмотку ВЭ с требуемым значением сопротивления. При достаточно большом количестве проводников в каждом стержне обмотки вторичного элемента их замыкание при помощи электронных устройств обеспечит высокую степень плавности регулирования скорости движения и тягового усилия. Плавность регулирования пускового и тягового усилия ЛАД резко увеличивается при расположении в пазах ВЭ сплошных стержней и плавном замыкании их по высоте подвижным элементом, проводящая часть которого выполнена медно-графитовой или графитовой.

Разработан ряд вариантов инженерных решений привода замыкающего элемента, обеспечивающего надёжный контакт между ним и стержнями обмотки вторичного элемента.

2.2.5 Шаговые асинхронные двигатели

Шаговый электропривод получает всё большее распространение в робототехнике, гибких производственных системах, в вычислительной и других областях техники. Технический прогресс, рост производительности труда повышают требования к точности позиционирования, к качеству и надёжности работы шаговых электроприводов. Основную роль в дискретном электроприводе играют шаговые электродвигатели (ШД), определяющие качество его функционирования, что делает актуальной задачу разработки и создания более совершенных типов данных электрических машин, обладающих новыми свойствами и возможностями. В качестве ШД применяются, как правило, синхронные электрические машины, обязательным условием работы которых является использование роторов из ферромагнитных материалов, содержащих чередующиеся участки с различными значениями магнитной проводимости. Иными словами, роторы синхронных ШД всегда выполняются зубчатыми. Синхронные ШД не способны осуществить дискретное перемещение гладких ферромагнитных и тем более немагнитных роторов, что является неустранимым недостатком таких электромашин. Этого недостатка не имеет разработанный на кафедре «Электрические машины и аппараты» Ростовского государственного университета путей сообщения шаговый электродвигатель, являющийся фактически асинхронным, принцип действия которого основан на использовании магнитных полей, вращающихся (бегущих) навстречу друг другу. Использование в электрической машине двух и более встречно вращающихся (или бегущих) магнитных полей позволит создать новые конструкции ШД для точного дискретного движения в тех электроприводах, где не требуются относительно большие вращающие моменты или усилия. Рассмотрим реализацию такого принципа действия на примере простейшей конструкции шагового электродвигателя, схематично показанной на рисунке 2.47, *а*.

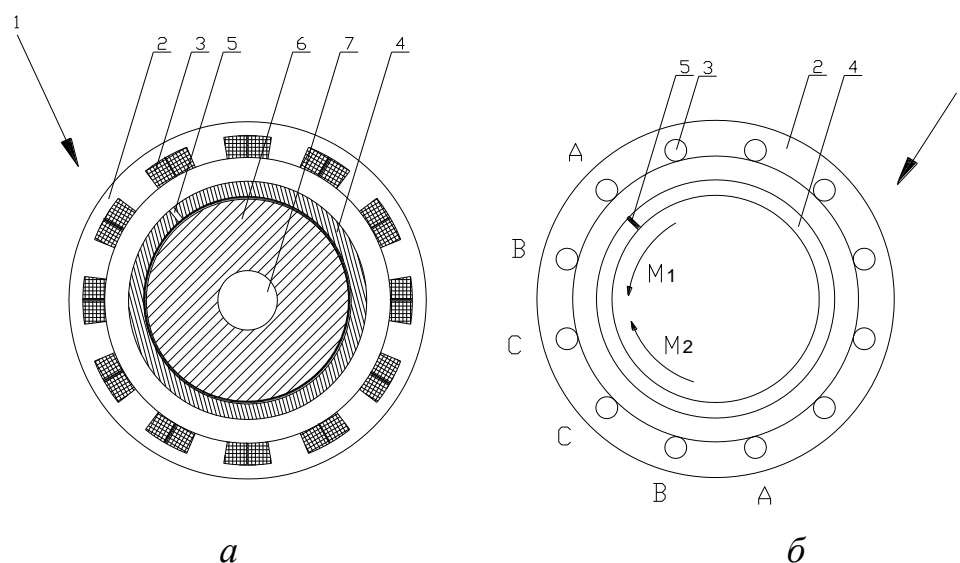


Рис. 2.47. Шаговый асинхронный двигатель:

а – конструктивная схема; *б* – порядок подключения первых шести катушек асинхронного ШД к источнику напряжения

Шаговый электродвигатель 1 содержит статор 2, на зубцах которого размещены катушки 3 сосредоточенной обмотки, и ротор, электропроводящая часть 4 которого выполнена в виде полого цилиндра из немагнитного материала (цилиндр может быть и ферромагнитным).

Электропроводящая часть 4 ротора имеет прорезь 5 по всей длине образующей полого цилиндра, заполненную, например, изолирующим веществом, и размещена на ферромагнитном сердечнике 6, закреплённом на валу 7. Катушки 3 асинхронного шагового двигателя (АШД) подключаются к источнику трёхфазного напряжения при помощи коммутирующего устройства. Порядок подключения части (например, шести) катушек шагового электродвигателя к фазам *A*, *B* и *C* источника напряжения показан на рисунке 2.47, б. Эти шесть катушек обмотки образуют первоначальный дугообразный ряд, имеющий до середины один, а после середины – противоположный порядок следования фаз *A*, *B*, *C* и *C*, *B*, *A*.

Токи, протекающие по шести катушкам, создадут два бегущих по дуге навстречу друг другу одинаковых магнитных поля (*A*, *B*, *C* и *C*, *B*, *A*). Бегущие магнитные поля будут пересекать электропроводящую часть ротора и индуцировать в ней электродвижущие силы, которые вызовут протекание вихревых токов. Бегущие магнитные поля, взаимодействуя с вихревыми токами, ими индуцированными в электропроводящей части ротора, будут создавать моменты M_1 и M_2 , одинаковые по величине, направленные навстречу и уравнивающие друг друга (см. рис. 2.47, б).

Имеем как бы два одинаковых дугостаторных асинхронных двигателя, вращающие моменты которых действуют встречно. Ротор АШД будет неподвижен и зафиксирован в исходном положении. При отключении от источника напряжения коммутирующим устройством последней катушки первоначального ряда, принадлежащей фазе *A* (рис. 2.48, а), магнитные поля, бегущие навстречу друг другу, становятся неодинаковыми – магнитное поле, направленное против часовой стрелки, возбуждается токами трёх катушек, подключённых к фазам *A*, *B* и *C*, и будет круговым, а магнитное поле, бегущее против часовой стрелки, создаётся токами двух катушек, принадлежащих фазам *B* и *C*, и имеет эллиптический характер. Эти бегущие магнитные поля, пересекая электропроводящую часть ротора, индуцируют в ней ЭДС и вихревые токи, которые при взаимодействии с бегущими магнитными полями будут создавать вращающие моменты M_1 и M_2 . Вращающий момент M_2 будет меньше, чем M_1 , так как он создаётся при взаимодействии эллиптического магнитного поля, бегущего по часовой стрелке, с вихревыми токами, им индуцированными в электропроводящей части ротора.

Под действием разности моментов $M_1 - M_2$ ротор начнёт вращение и повернётся на одно зубцовое деление против часовой стрелки, при этом моменты M_1 и M_2 снова станут равными. После этого коммутирующее устройство отключит от источника напряжения первую катушку первоначального ряда. Бегущие магнитные поля становятся эллиптическими и создаются теперь токами четырёх катушек – *B* и *C* (бегущие против часовой стрелки) и *C* и *B* (бегущие по часовой стрелке). Ротор АШД сделал один шаг.

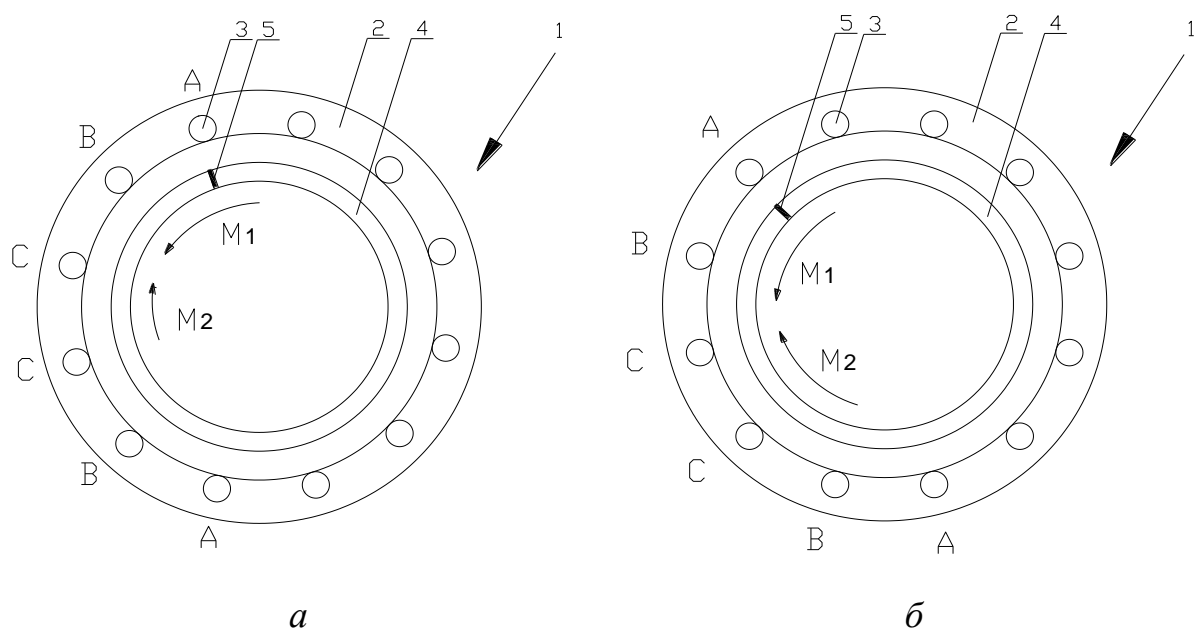


Рис. 2.48. Реализация дискретного перемещения ротора:
а – отключение от источника напряжения последней катушки первоначального ряда катушек; *б* – ряд из шести катушек ШАД после совершения первого шага ротора

Точность позиционирования при реализации шага будет высокой и зависящей лишь от качества изготовления АШД. Если сделать предположение, что ротор при совершении шага по инерции повернулся на угол, превышающий одно зубцовое деление, то равенство моментов M_1 и M_2 , которые уже будут создаваться при взаимодействии эллиптических магнитных полей, бегущих навстречу друг другу, с токами, ими индуктированными, нарушится. Это объясняется тем, что при этом степень эллиптичности магнитного поля, бегущего против часовой стрелки, увеличится, а вращающий момент M_1 станет меньше момента M_2 и ротор начнет поворачиваться в противоположную сторону (по часовой стрелке), до тех пор пока равенство моментов не восстановится. Это произойдет, когда величина шага снова станет равной одному зубцовому делению. Ротор будет зафиксирован в новом положении. Для подготовки к новому шагу и достижения более устойчивого положения ротора при фиксации его в новом положении коммутирующее устройство подключает к источнику напряжения катушки обмотки, начиная со второй катушки первоначального ряда, в порядке *А, В, С* и *С, В, А*. Образуется новый ряд из шести подключённых к источнику напряжения катушек (рис. 2.48, *б*) и два новых одинаковых дугостаторных асинхронных двигателя, одинаковые моменты M_1 и M_2 которых взаимно уравнивают друг друга. Для совершения второго шага на величину зубцового деления снова отключают последнюю катушку нового ряда и так далее.

Дробление величины шагового перемещения ротора достигается установкой на каждом зубце статора n одинаковых катушек с возможностью их поочередного отключения от источника напряжения. Максимальная величина шага

достигается при отключении всех n катушек, расположенных на последнем зубце первоначального ряда, и составляет одно зубцовое деление.

$$t_{\max} = t_z.$$

Минимальная величина шага ротора будет при отключении одной из n катушек на последнем зубце

$$t_{\min} = \frac{t_z}{n}.$$

Если же отключить m из n катушек на последнем зубце первоначального ряда, то величина шага дискретного перемещения ротора будет равна

$$t = \frac{t_z \cdot m}{n}.$$

Использование встречно вращающихся (бегущих) магнитных полей позволяет получить сколь угодно малое точное перемещение при уменьшении величины тока в последней катушке ряда.

На этом же принципе могут работать шаговые линейные асинхронные двигатели. «Линейное» дискретное перемещение электропроводящего якоря (вторичного элемента) может быть реализовано в различных технологических процессах, шаговое движение может передаваться в закрытые объемы, в том числе и с вакуумом, возможна шаговая подача электропроводящих листов, труб и деталей с магнитной левитацией в собственном магнитном поле индуктора машины. Рассмотрим принцип их работы на примере простейшего шагового линейного асинхронного двигателя (ШЛАД), конструктивная схема которого представлена на рисунке 2.49.

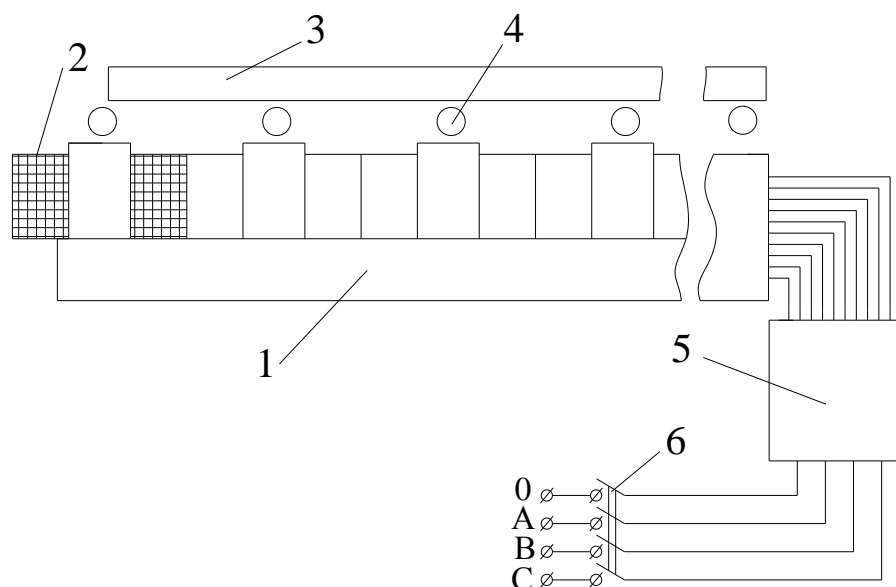


Рис. 2.49. Линейный асинхронный шаговый двигатель

Индуктор ШЛАД содержит сердечник 1, на зубцах которого размещены катушки 2 обмотки. Плоский вторичный элемент 3 выполнен из любого электропроводящего материала и размещён на вращающихся опорах 4. Выводы катушек 2 соединены через коммутирующее устройство 5 с фазами сети *A*, *B* и *C* и нулевой точкой через рубильник 6.

При подключении шести катушек 2 обмотки к источнику трёхфазного напряжения (рис. 2.50, *a*) образуется их первоначальный ряд, в котором до его середины катушки имеют прямой, а после середины – противоположный порядок следования фаз: *A*, *B*, *C*, *C*, *B*, *A*. Токи катушек создают два одинаковых, бегущих навстречу друг другу магнитных поля, пересекающих вторичный элемент 3, расположенный на опорах 4, и наводящих в нем электродвижущие силы, которые вызывают протекание вихревых токов. В результате взаимодействия бегущих магнитных полей с токами, ими индуктированными во вторичном элементе, создаются две одинаковые механические силы, направленные навстречу друг другу. Эти силы будут уравниваться, и вторичный элемент будет находиться в фиксированном положении, показанном на рисунке 2.50, *a*.

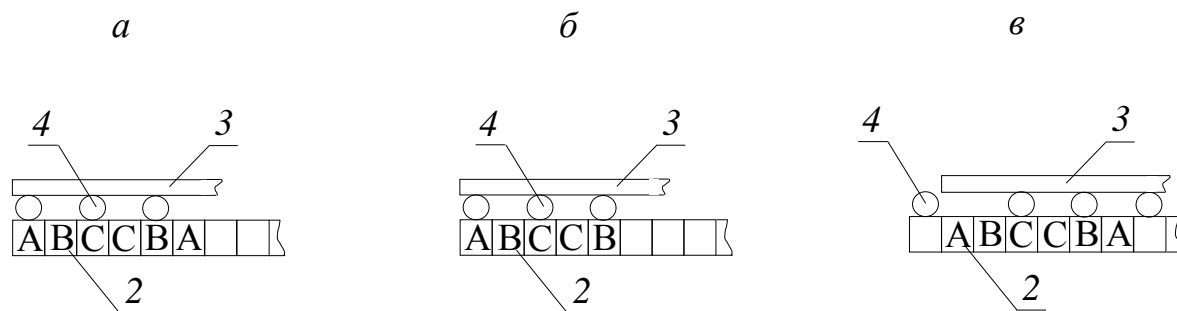


Рис. 2.50. Положения вторичного элемента ШЛАД:

- a* – первоначальный ряд подключённых к напряжению катушек обмотки ШЛАД; *б* – отключение последней катушки первоначального ряда; *в* – новый ряд катушек, подключённых к напряжению после совершения шага вторичным элементом

Для совершения шага вторичного элемента на одно зубцовое деление отключают от источника напряжения последнюю (крайнюю правую) катушку первоначального ряда (рис. 2.50, *б*). При этом происходит нарушение симметрии встречно бегущих магнитных полей: магнитное поле, бегущее слева направо, создаётся токами трех фаз – *A*, *B* и *C*, и является симметричным (круговым), а магнитное поле, бегущее справа налево, создаётся токами двух фаз, *B* и *C*, и становится несимметричным (эллиптическим).

При взаимодействии бегущих встречно магнитных полей с токами во вторичном элементе создаются механические силы, которые уже не будут равными по величине. Сила, действующая на вторичный элемент слева, будет больше силы, действующей на него справа. Под действием разности этих сил вторичный элемент начнет двигаться слева направо и будет перемещаться до тех пор, пока встречные силы, приложенные к нему, не станут равными. Это произойдет при смещении его влево точно на одно зубцовое деление. Для

устойчивой фиксации вторичного элемента в новом положении коммутирующее устройство отключает от источника напряжения первую (крайнюю левую) катушку 2 первоначального ряда и подключает к нему катушку, следующую за последней катушкой первоначального ряда (рис. 2.50, в). Создаётся новый ряд из подключённых к источнику трёхфазного напряжения шести катушек, идентичный первоначальному. Для совершения следующего шага снова отключают последнюю катушку нового ряда и так далее. При этом достигается высокая точность дискретного перемещения гладкого электропроводящего вторичного элемента, т. к. встречно бегущие магнитные поля автоматически обеспечивают самостабилизацию вторичного элемента в новом положении.

ШЛАД, описанный выше, обеспечивает дискретное перемещение вторичного элемента на одно зубцовое деление индуктора t_z . Увеличить число шагов данного ШЛАД можно, как и в предыдущем варианте, увеличением числа элементарных катушек на каждом зубце индуктора. Дальнейшее расширение диапазона регулирования величины шага обеспечивает конструкция ШЛАД, индуктор которого состоит не из одного, а из нескольких k параллельно расположенных одинаковых сердечников с обмотками, катушки которых образуют продольные и поперечные ряды.

Минимальная величина шага вторичного элемента для такого шагового линейного асинхронного двигателя составит при одной отключённой элементарной катушке в последнем поперечном ряду на одном из k сердечников:

$$t_{\min} = \frac{t_z}{n \cdot k},$$

где n – количество элементарных, одинаковых катушек на каждом зубце;
 k – количество сердечников индуктора ШЛАД.

Максимальная величина дискретного перемещения равна одному зубцовому делению t_z при всех отключённых катушках в последнем поперечном ряду катушек.

В общем виде для ШЛАД, состоящего из нескольких сердечников, величина шага вторичного элемента определяется соотношением:

$$t_i = \frac{t_z}{n \cdot k} \cdot m \cdot l,$$

где m – количество катушек, отключённых на каждом из l из k сердечников в последнем поперечном ряду;

l – количество сердечников, на которых есть отключённые на зубцах последнего поперечного ряда катушки.

Увеличивая количество параллельных сердечников и катушек обмотки, размещённых на каждом их зубце, можно расширить диапазон регулирования величины дискретного перемещения вторичного элемента. Если количество элементарных катушек, отключённых на зубцах различных сердечников в последнем поперечном ряду, неодинаково, то число шагов вторичного элемента ещё возрастёт и величина шага в общем виде может быть рассчитана по формуле

$$t = \frac{t_z}{n \cdot k} (a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_k) = t_{\min} (a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_k),$$

где $a_1, a_2, a_3, \dots, a_k$ – количество элементарных катушек, отключённых на первом, втором, третьем и т. д. и последнем сердечнике ШЛАД в последнем поперечном ряду.

Конструкции ШЛАД имеют перспективы для использования в шаговых электроприводах, в которых не требуются большие механические усилия, в устройствах для точного позиционирования электропроводящих деталей на магнитном подвесе, в двухкоординатных приводах дискретного перемещения.

Физические процессы, происходящие в АШД и ШЛАД при включённых катушках обмотки, во многом идентичны процессам в асинхронных машинах в режиме короткого замыкания и приводят в конечном счете к нагреванию двигателей. Для снижения степени нагрева индуктора и ротора (вторичного элемента) после совершения шага может быть использована механическая фиксация ротора или вторичного элемента в новом положении с последующим отключением обмотки от источника напряжения. Увеличение воздушного зазора влияет на ток при коротком замыкании асинхронной машины, а именно приводит к его уменьшению. Поэтому в ШЛАД с немагнитными вторичными элементами ток при коротком замыкании изменяется незначительно по сравнению с режимом холостого хода.

3 СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

3.1 Общие сведения

Синхронные машины (СМ) имеют одинаковые частоты вращения роторов и магнитных полей и могут работать в качестве генераторов (СГ), синхронных двигателей (СД) и компенсаторов реактивной мощности. Основная их особенность в том, что индуктором синхронной машины является ротор, по обмотке которого протекает постоянный ток и создаёт основной магнитный поток, а якорем – статор с трёхфазной обмоткой. Главным образом СМ используются в качестве генераторов на электростанциях, по типу турбин их подразделяют на:

- *турбогенераторы*, роторы которых приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами, причём частота их вращения составляет 1500 или 3000 об/мин, поэтому турбогенераторы выполняют двух- или четырёхполюсными. Они применяются на всех тепловых и атомных электростанциях;
- *гидрогенераторы*, роторы которых приводятся во вращение водяными турбинами. Частота вращения этих электрических машин невелика, обычно ее диапазон составляет 60–500 об/мин, поэтому для получения электроэнергии промышленной частоты число полюсов гидрогенератора значительное.

Синхронные двигатели применяются в электроприводах, где требуется неизменность частоты вращения при изменении нагрузки, например в приводах компрессорных установок.

Синхронные компенсаторы (СК) по своей сути являются синхронными двигателями, работающими на холостом ходу в режиме перевозбуждения и генерирующими в сеть ёмкостный ток.

Российская Федерация находится в числе передовых стран, способных производить мощные синхронные машины для электростанций. При изготовлении и эксплуатации широко используемых мощных синхронных генераторов очень важны вопросы, связанные с охлаждением активных частей машин. Для охлаждения обмоток роторов и статоров СГ используют водород и воду, которые способны интенсивно отводить тепло. Криогенные технологии позволят резко снизить габариты и массы синхронных машин при сохранении необходимой мощности. В СССР, в Ленинграде, в институте ВНИИЭЛЕКТРОМАШ, под руководством академика И. А. Глебова в 80-х годах двадцатого века был разработан и изготовлен турбогенератор со сверхпроводящими обмотками, охлаждаемыми жидким гелием, мощностью 20 мегаватт. Этот генератор был подключён к электросети Ленинграда и снабжал город электрической энергией. Высокая стоимость криогенных технологий не позволяет их широко использовать в настоящее время для генерации электроэнергии.

3.2 Конструкция и принцип действия синхронных машин

Синхронной называется электрическая машина переменного тока, у которой частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля статора. Синхронная частота вращения магнитного поля:

$$n_1 = \frac{60f}{p}.$$

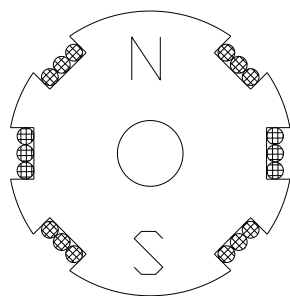
По конструкции статор синхронной машины аналогичен статору асинхронной машины. Сердечник статора СМ набирается из отдельных пластин электротехнической стали и содержит пазы для размещения трёхфазной обмотки переменного тока. Конструктивные исполнения статоров СМ многообразны и зависят от их назначения и мощности.

Ротор синхронной машины состоит из вала, сердечника и обмотки возбуждения. В зависимости от конструкции ротора СМ бывают (рис. 3.1):

- неявнополюсные (с неявно выраженными полюсами);
- явнополюсные (с явно выраженными полюсами).

Неявнополюсные роторы применяются в машинах, работающих при высоких частотах вращения (обычно 1500 или 3000 об/мин). В турбогенераторах тепловых и атомных электростанций устанавливают неявнополюсные, или гладкие, роторы. Активная длина такого ротора может достигать восьми метров, а его диаметр – полутора метров. Такие роторы выполняют сплошными из цельных поковок особо прочной легированной стали. В пазы ротора укладывают обмотку возбуждения, которая в пазах крепится при помощи алюминиевых клиньев, а её лобовые части закрывают стальными втулками – каппами.

Неявнополюсный
ротор



Явнополюсный
ротор

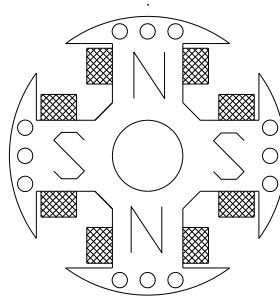


Рис. 3.1. Конструктивные схемы роторов синхронных машин

Полюсы в *явнополюсных роторах* мощных СМ надёжно крепятся к ободу ротора, например, при помощи «ласточкиных хвостов». Полюсы имеют развитую поверхность, обращённую к воздушному зазору, которую называют полюсным наконечником. На полюсах размещают катушки обмотки возбуждения, а в полюсных наконечниках часто располагают стержни короткозамкнутой обмотки, которая называется демпферной (успокоительной) и предназначена для обеспечения затухания колебаний ротора, возникающих в переходных режимах работы СГ, а также играет роль пусковой обмотки в синхронных двигателях.

У синхронных генераторов малой мощности на роторе могут использоваться постоянные магниты.

Обмотка возбуждения СМ питается постоянным током, который может подаваться в ротор при помощи контактных колец и щёток от внешнего источника, от генератора постоянного тока, расположенного на одном валу с ротором синхронной машины. Обмотка возбуждения синхронной машины может получать постоянный ток от выпрямителя, встроенного в ротор, выпрямляющего переменный ток, полученный бесконтактно индукционным путём.

Принцип действия синхронного генератора состоит в следующем. Ротор СГ приводится во вращение при помощи первичного двигателя (паровая, газовая или гидротурбина, дизель, ветродвигатель и т. д.), и ему сообщается механическая энергия. Обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока, который создаёт основной магнитный поток машины. Основной магнитный поток ротора (индуктора) при вращении пересекает проводники обмотки статора (якоря) и наводит в них трёхфазную ЭДС, величина и частота которой прямо пропорциональны числу полюсов СГ и частоте вращения ротора. При подключении к выводам статорной обмотки нагрузки в проводниках обмотки статора потекут токи, соответствующие фазам I_A , I_B , I_C . Таким образом, механическая энергия преобразуется в электрическую в синхронном генераторе. Трёхфазные токи статора (якоря) создадут своё вращающееся магнитное поле, которое будет вращаться синхронно с ротором.

3.3 Реакция якоря синхронного генератора

В синхронном генераторе, работающем под нагрузкой, действуют две магнитодвижущие силы:

- МДС якоря F_a ;
- МДС возбуждения F_b .

Основной магнитный поток синхронного генератора создаётся МДС обмотки возбуждения, расположенной на его роторе (индукторе), а магнитный поток якоря (статора) – МДС якоря. Величина и характер магнитного потока якоря оказывают большое влияние на работу синхронного генератора.

Действие магнитного потока якоря (статора) на основное магнитное поле машины называется *реакцией якоря синхронного генератора*. Реакция якоря искажает и ослабляет основное магнитное поле машины. Реакция якоря СГ во многом аналогична реакции якоря в машине постоянного тока. Но её влияние в СГ зависит не только от величины, но и от характера нагрузки (активная, индуктивная или ёмкостная). ЭДС, индуцированная в статорной обмотке основным магнитным полем, отстаёт от магнитного потока на угол, равный 90° градусам, а ток I занимает по отношению к ЭДС различные положения, определяемые углом ψ .

- 1 Активная нагрузка (ток и ЭДС фазы статора совпадают) (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Активная нагрузка СГ

ЭДС и ток совпадают по фазе, т. е. $\psi = 0$, при этом магнитодвижущая сила якоря F_a действует перпендикулярно магнитодвижущей силе возбуждения F_b . в этом случае реакция якоря только уменьшает основной магнитный поток возбуждения.

- 2 Индуктивная нагрузка (рис. 3.3).

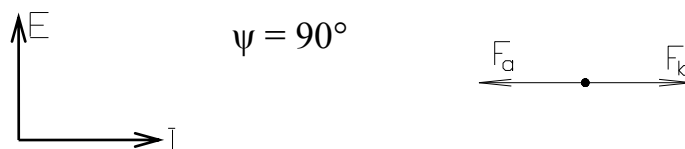


Рис. 3.3. Индуктивная нагрузка СГ

При индуктивной нагрузке ток отстаёт от ЭДС на угол в 90 градусов. Магнитодвижущая сила якоря F_a и магнитодвижущая сила возбуждения F_b направлены навстречу друг другу. В этом случае реакция якоря ослабляет основное магнитное поле, или, как говорят, реакция якоря носит продольно размагничивающий характер.

3 Ёмкостная нагрузка (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Ёмкостная нагрузка СГ

При ёмкостной нагрузке ток опережает ЭДС на угол в 90 градусов. Магнитодвижущая сила якоря F_a и магнитодвижущая сила возбуждения F_b направлены согласно друг другу. В этом случае реакция якоря усиливает магнитный поток машины, т.е. носит продольно-намагничивающий характер.

Таким образом, при отстающем токе реакция якоря размагничивающая, а при опережающем – намагничивающая.

На практике синхронные генераторы работают на смешанную нагрузку (как, правило, активно-индуктивную). При активно-индуктивной нагрузке ток якоря является отстающим от ЭДС, а при активно-ёмкостной (такую нагрузку можно создать в лаборатории) – опережающим электродвижущую силу.

3.4 Реакция якоря СГ при смешанной нагрузке

Наиболее часто синхронные генераторы работают на смешанную нагрузку, которая имеет активно-индуктивный характер. При активно-индуктивной нагрузке ток якоря (статора) будет отставать от ЭДС E_0 , которая индуцируется в статоре якоря основным магнитным потоком.

Покажем это на векторной диаграмме (рис. 3.5).

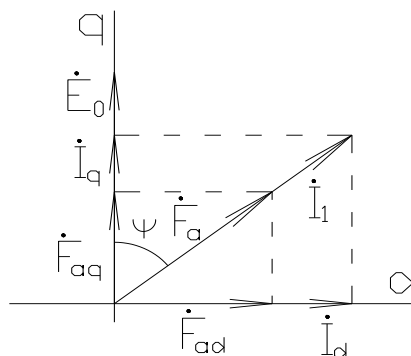


Рис. 3.5. Активно-индуктивная нагрузка СГ

Обозначения на векторной диаграмме (см. рис. 3.5):

F_a – МДС якоря (реакция якоря); I_1 – ток фазы якоря (статора); E_0 – ЭДС, индуцированная основным магнитным потоком в фазе обмотки якоря.

При анализе синхронных машин часто используют привязку основных величин и параметров СМ к продольным и поперечным осям d и q , причём продольная ось d проходит в явнополюсной машине по пути «сердечник статора – воздушный зазор – полюс ротора – ярмо ротора – полюс ротора – воздушный зазор – сердечник статора».

Поперечная ось q проходит по пути «сердечник статора – межполюсное пространство ротора – ротор – межполюсное пространство ротора – сердечник статора».

Определим ортогональные проекции тока якоря и МДС реакции якоря на оси d и q .

Продольная составляющая тока якоря:

$$I_d = I_1 \cos \psi.$$

Поперечная составляющая тока якоря:

$$I_q = I_1 \sin \psi.$$

Аналогично проекции МДС якоря

$$F_{ad} = F_a \sin \psi;$$

$$F_{aq} = F_a \cos \psi.$$

В случае активно-ёмкостной нагрузки ток статора (якоря) будет опережать ЭДС E_0 (рис. 3.6).

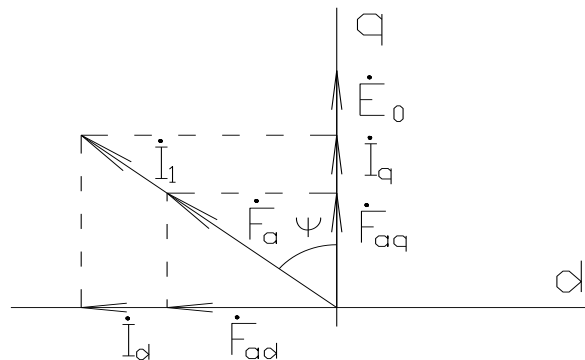


Рис. 3.6. Активно-ёмкостная нагрузка СГ

При активно-индуктивной нагрузке синхронный генератор размагничивается, а при активно-ёмкостной – подмагничивается.

3.5 Уравнение ЭДС синхронного явнополюсного генератора

Напряжение на зажимах синхронного генератора на холостом ходу будет отличаться от его напряжения под нагрузкой. Это объясняется действием магнитных потоков реакции якоря и рассеяния, падением напряжения в цепи якоря. В магнитной цепи синхронного генератора действуют основной магнитный поток, магнитные потоки реакции якоря и рассеяния.

Для оценки действия этих магнитных потоков на напряжение синхронного генератора рассмотрим их действие по отдельности.

Очевидно, что в общей магнитной системе синхронного генератора все магнитные потоки будут складываться и создавать общий магнитный поток, однако для анализа воздействия этих потоков на величину напряжения СГ мы рассмотрим их по отдельности.

Основной магнитный поток, создаваемый индуктором (ротором), будет индуцировать в каждой фазе статора (якоря) ЭДС E_0 :

$$\dot{\Phi}_{\text{осн}} \rightarrow \dot{E}_0.$$

При работе генератора под нагрузкой ток якоря будет создавать магнитный поток якоря $\dot{\Phi}_a$, который создан \dot{F}_a , и они будут индуцировать \dot{E}_a :

$$\dot{F}_a \rightarrow \dot{\Phi}_a \rightarrow \dot{E}_a.$$

ЭДС \dot{E}_a – это ЭДС, индуцированная в фазе статора (якоря) магнитным потоком реакции якоря.

При анализе \dot{F}_a разлагают на составляющие по осям d и q :

$$\dot{F}_a = \dot{F}_{ad} + \dot{F}_{aq}.$$

Магнитодвижущие силы \dot{F}_{ad} и \dot{F}_{aq} будут создавать магнитные потоки, которые индуцируют в каждой фазе якоря (статора) ЭДС \dot{E}_{ad} и \dot{E}_{aq} .

Ток статора (якоря) кроме вращающегося магнитного поля будет создавать дополнительно магнитный поток рассеяния, который индуцирует в каждой его фазе ЭДС рассеяния \dot{E}_s , равные:

$$\dot{E}_s = -j\dot{I}_1 x_s,$$

x_s – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора.

Кроме ЭДС при работе синхронного генератора под нагрузкой будет иметь место падение напряжения на активном сопротивлении фазы статора:

$$\dot{U}_s = \dot{I}_1 r_s.$$

В результате напряжение фазы статора СГ составит:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_s - \dot{I}_1 r_s.$$

Представим это уравнение в другом виде, выразив \dot{E}_{ad} , \dot{E}_{aq} и \dot{E}_s через соответствующие токи и индуктивные сопротивления:

$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d x_{ad};$$

$$\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q x_{aq};$$

$$\dot{E}_s = -j\dot{I}_1 x_s.$$

В итоге после преобразований получим:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d x_{ad} - j\dot{I}_q x_{aq} - \dot{I}_1 x_s - \dot{I}_1 r_s,$$

I_d, I_q – токи якоря (статора) по продольной и поперечной осям;

x_{ad} – синхронное индуктивное сопротивление, учитывающее действие реакции якоря по продольной оси (зависит от насыщения, при увеличении насыщения x_{ad} уменьшается);

x_{aq} – синхронное индуктивное сопротивление, учитывающее действие реакции якоря по поперечной оси (от насыщения не зависит, так как большую часть пути магнитный поток Φ_{ad} проходит по воздуху).

Если генератор выполнен неявнополюсным, то магнитные проводимости ротора по продольной и поперечной осям одинаковы, и нет необходимости разлагать реакцию якоря на составляющие, и она может быть учтена значением \dot{E}_a , равной:

$$\dot{E}_a = -j\dot{I}_1 x_a.$$

Тогда уравнение ЭДС:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - \dot{I}_1 x_a - \dot{I}_1 x_s - \dot{I}_1 r_s.$$

Это уравнение можно преобразовать с учётом того, что:

$$-j\dot{I}_1 (x_a + x_s) = -j\dot{I}_1 x_c.$$

В результате получим:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - \dot{I}_1 x_c - \dot{I}_1 r_s,$$

x_c – синхронное индуктивное сопротивление, учитывающее действие реакции якоря и магнитного потока рассеяния.

3.6 Векторная диаграмма синхронного явнополюсного генератора при активно-индуктивной нагрузке

Векторная диаграмма (рис. 3.7) – графическая интерпретация уравнения ЭДС синхронного генератора:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d x_{ad} - j\dot{I}_q x_{aq} - \dot{I}_1 x_s - \dot{I}_1 r_s.$$

Для построения диаграммы должны быть известны значения ЭДС и тока фазы статора, угол сдвига между ЭДС и током, а также – параметры машины.

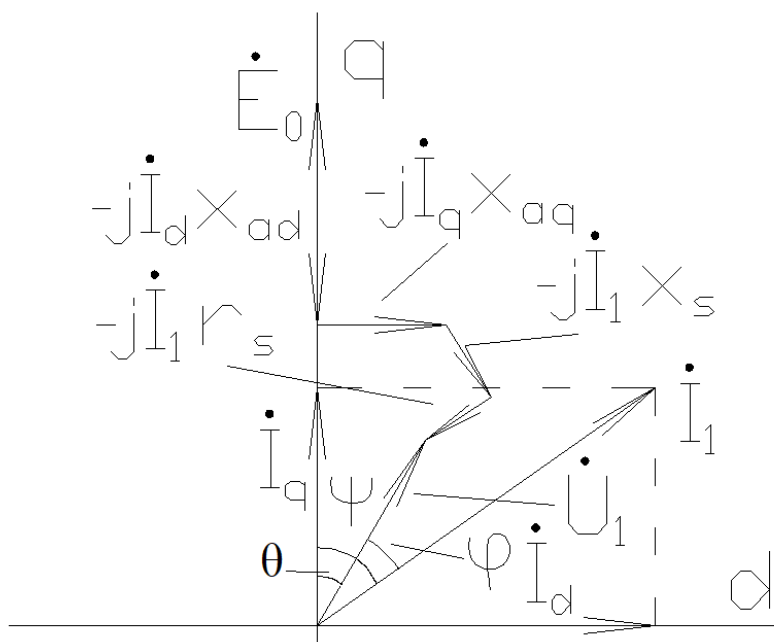


Рис. 3.7. Векторная диаграмма СГ при активно-индуктивной нагрузке

Порядок построения векторной диаграммы:

- 1 Вектор \dot{E}_0 в масштабе напряжения (m_u , В/мм) направляем вертикально вверх.
- 2 С отставанием к вектору \dot{E}_0 на угол ψ отложим вектор \dot{I}_1 в масштабе тока (m_i , А/мм).
- 3 Определим ортогональные проекции ток \dot{I}_1 на оси d и q .
- 4 Строим в масштабе напряжения вектор падения напряжения $-jx_{ad}I_d$, который направлен вертикально вниз.
- 5 Строим в масштабе напряжения вектор падения напряжения $-jx_{aq}I_q$, который направлен перпендикулярно вектору $-jx_{ad}I_d$.
- 6 Строим в масштабе напряжения вектор $-j\dot{I}_1 x_s$, который перпендикулярен вектору \dot{I}_1 .
- 7 Строим в масштабе напряжения вектор $I_1 r_1$, который параллелен вектору \dot{I}_1 .
- 8 Соединив конец вектора $I_1 r_1$ с началом координат, получим вектор напряжения \dot{U}_1 .

Эта векторная диаграмма носит название «диаграмма Blondеля». При построении векторной диаграммы явнополюсного СГ обычно не учитывают падение напряжения на активном сопротивлении фазы обмотки якоря из-за незначительной его величины. Из диаграммы видно, что с ростом тока нагрузки напряжение СГ будет снижаться из-за размагничивающего действия реакции якоря.

3.7 Характеристики синхронного генератора

Для снятия характеристик СГ собирается схема (рис. 3.8).

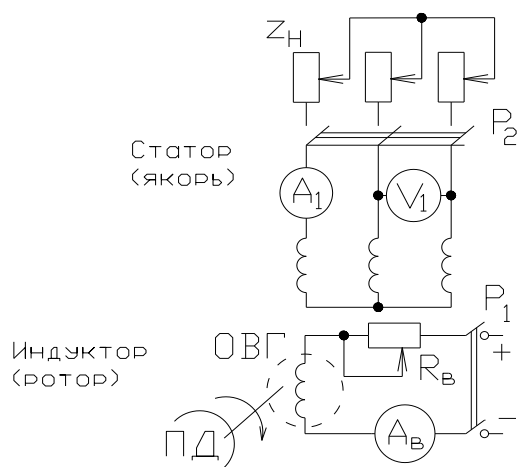


Рис. 3.8. Схема для снятия характеристик синхронного генератора

Характеристика холостого хода представляет собой зависимость ЭДС синхронного генератора от тока возбуждения – $E_0 = f(I_B)$, $n = \text{const}$, $I_1 = 0$. Для снятия характеристики х.х. СГ включают первичный двигатель и подают постоянный ток в обмотку ротора (рубильник P_1 замкнут). Увеличивают ток возбуждения и записывают показания вольтметра в цепи статора. Характеристика холостого хода СГ показана на рис. 3.9.

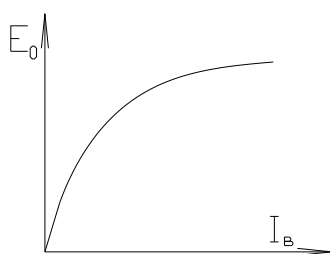


Рис. 3.9. Характеристика холостого хода СГ

Нагрузочные характеристики СГ (рис. 3.10) представляют собой зависимости напряжения на зажимах генератора от тока возбуждения при неизменности тока якоря (статора). $U_1 = f(I_B)$, $n = \text{const}$, $I_1 = \text{const}$.

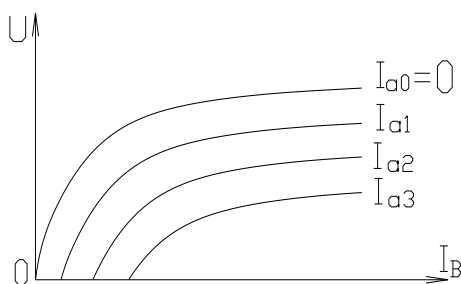


Рис. 3.10. Нагрузочные характеристики СГ

При увеличении тока нагрузки СГ характеристики будут располагаться правее и ниже характеристики холостого хода из-за размагничивающего действия реакции якоря и из-за падения напряжения в его цепи.

Для искусственного построения характеристик синхронного генератора производится опыт короткого замыкания, при котором обмотка якоря закорачивается, а в обмотку возбуждения подаётся небольшой ток возбуждения. При этом достаточно сделать одно измерение тока якоря и тока возбуждения, поскольку магнитная система генератора ненасыщенна и характеристика короткого замыкания прямолинейна.

Характеристика к. з. – зависимость тока якоря от тока возбуждения $I_1 = f(I_B, n = \text{const}, U_0 = 0)$ (рис. 3.11).

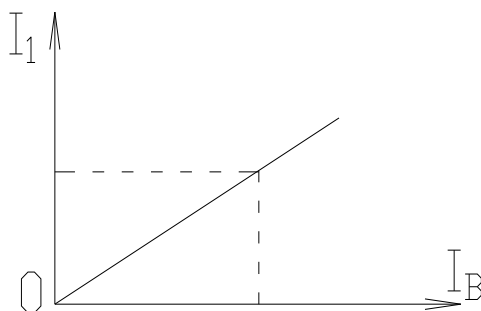


Рис. 3.11. Характеристика короткого замыкания СГ

Одной из важнейших характеристик синхронного генератора является **внешняя характеристика**, представляющая собой зависимость напряжения на зажимах СГ от тока нагрузки (рис. 3.12). $U_1 = f(I_1, n = \text{const}, I_B = \text{const})$. Характеристика снимается при неизменном значении тока возбуждения, и её вид зависит от характера нагрузки.

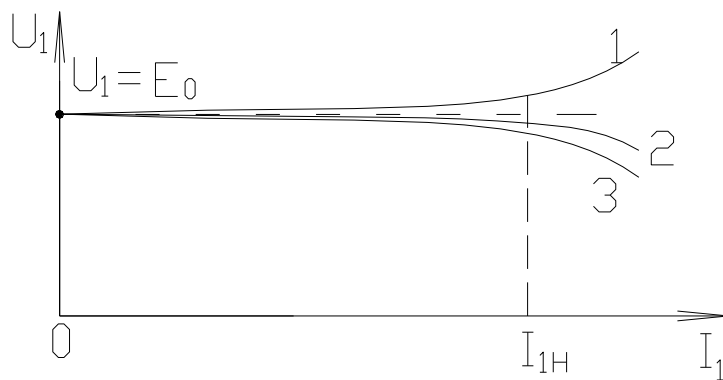


Рис. 3.12. Внешняя характеристика синхронного генератора:

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

Потребители должны получать электрическую энергию с номинальным напряжением. Внешняя характеристика показывает, что с ростом тока нагрузки напряжение на зажимах СГ изменяется. Для поддержания напряжения неизменным при любых значениях тока нагрузки нужно регулировать ток возбуж-

дения. Регулировочная характеристика – зависимость тока возбуждения от тока нагрузки (якоря) $I_b = f(I_1)$, снятая при $U_1 = \text{const}$.

Регулировочная характеристика (рис. 3.13) показывает, каким образом следует изменять ток возбуждения, чтобы во всём диапазоне нагрузки напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным.

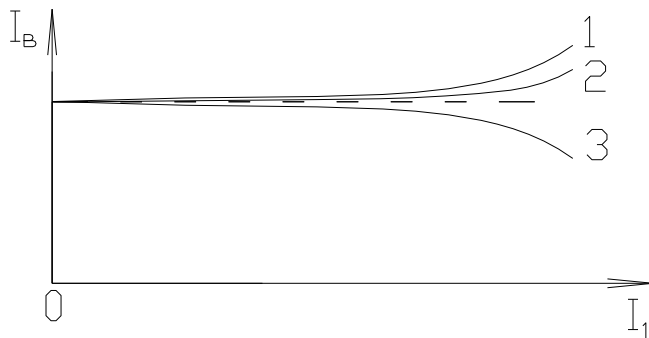


Рис. 3.13. Регулировочная характеристика синхронного генератора:
 1 – активно-индуктивная нагрузка ($\cos\varphi = 0,8$); 2 – активная нагрузка ($\cos\varphi = 1$);
 3 – активно-ёмкостная нагрузка ($\cos(-\varphi) = 0,8$)

Процесс регулирования тока возбуждения автоматизирован.

3.8 Параллельная работа синхронных генераторов.

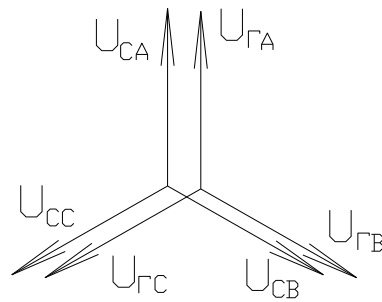
Условия включения

Синхронные генераторы редко работают автономно. На каждой электростанции имеется несколько энергоблоков, генераторы которых работают параллельно на общую сеть. Энергосистемы снабжаются электроэнергией от нескольких электрических станций различного типа (водяных (гидро-), тепловых и атомных), все синхронные генераторы которых включены параллельно и работают на общую нагрузку. Параллельная работа СГ обеспечивает резервирование мощностей на случай аварии или ремонта и делает систему энергоснабжения потребителей более гибкой и надёжной.

Для возможности включения синхронного генератора на параллельную работу с мощной сетью должны быть выполнены следующие условия.

В момент включения напряжения и частоты генератора и сети должны быть одинаковы, генератор и сеть должны иметь одинаковый порядок следования фаз. Кроме того, обязательно, чтобы при включении напряжения фаз, соответствующих генератору и сети, не имели бы временного сдвига (рис. 3.14). Условия включения могут быть записаны так.

- 1) $U_{\Gamma} = U_{\text{С}}$;
- 2) $f_{\Gamma} = f_{\text{С}}$;
- 3) порядок следования фаз должен быть одинаков;
- 4) $U_{\Gamma}, U_{\text{С}}$ – должны быть в фазе.



$$\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{GA} = \dot{U}_{CB} - \dot{U}_{GB} = \dot{U}_{CC} - \dot{U}_{GC} = 0; f_G - f_C = 0$$

Рис. 3.14. Векторные диаграммы напряжения СГ и сети

При несоблюдении условий возможны броски тока, способные привести к выходу генератора из строя и нарушению режима работы сети. Для правильного выбора момента времени включения генератора на параллельную работу с сетью разработаны методы синхронизации.

3.8.1 Метод точной синхронизации

Рассмотрим порядок включения СГ на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации при помощи простейшего лампового синхроскопа.

Для определения момента времени включения СГ на параллельную работу используют ламповые синхроскопы двух типов:

- «на потухание света»;
- «на вращение света».

Если схема соединения ламп синхроскопа собрана «на потухание света», то лампы накаливания включают в разрыв каждой фазы, как это показано на схеме (рис. 3.15).

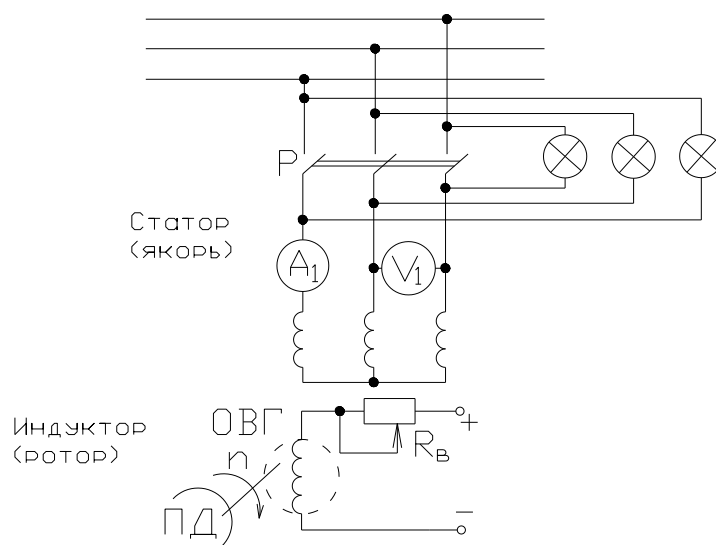


Рис. 3.15. Схема синхроскопа «на потухание света»

Порядок реализации процесса синхронизации СГ с сетью.

Включают первичный двигатель, после чего регулируют его так, чтобы получить частоту вращения близкую к синхронной, затем подают ток в обмотку возбуждения и, регулируя его величину, добиваются равенства напряжений генератора и сети. При несовпадении частот генератора и сети напряжение на лампах синхроскопа всё время будет изменяться и лампы будут то загораться, то потухать. Если разность частот генератора и сети значительна, то лампы будут загораться и потухать с высокой частотой, свет может даже мерцать. Регулируя частоту вращения первичного двигателя, добиваются того, чтобы лампы загорались и потухали медленно, с периодом в 3–5 секунд.

Момент для включения выбирают так. Когда лампы синхроскопа погаснут, включается рубильник Р и генератор начинает работать параллельно с сетью. При этом может наблюдаться незначительный бросок тока якоря из-за того, что лампы накаливания погаснут при напряжении, которое может составлять 10–15 % от номинального значения.

Более точно момент включения можно определить, если лампы включены «на вращение света» (рис. 3.16). По этой схеме одна из ламп включается в разрыв фазы, а две другие – перекрёстно.

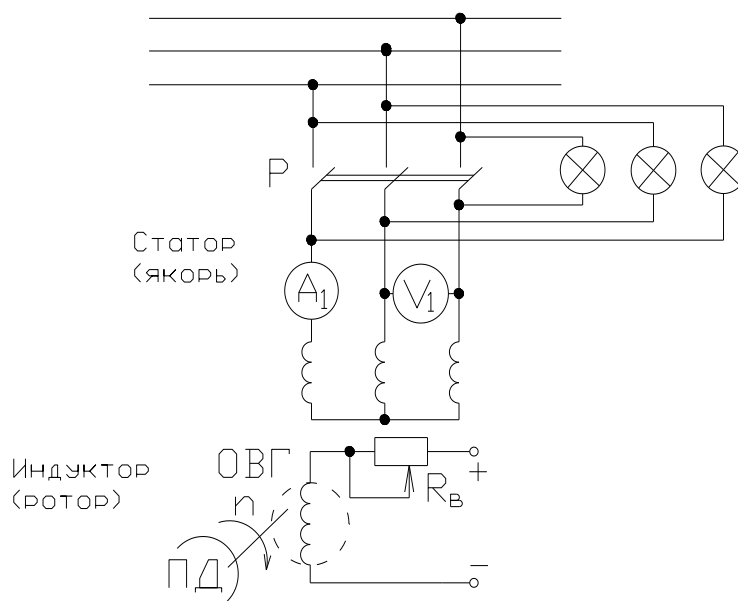


Рис. 3.16. Схема синхроскопа «на вращение света»

Последовательность процесса синхронизации СГ с сетью.

Включают первичный двигатель и устанавливают частоту его вращения близкую к синхронной. После этого подают ток в обмотку возбуждения и регулируют его до тех пор, пока напряжение СГ не станет равным напряжению сети ($U_G = U_c$). При этом лампы синхроскопа будут поочерёдно загораться и гаснуть, создавая эффект вращения света. Если разность частот генератора и сети велика, то свет будет вращаться очень быстро. Если частота сети превышает частоту СГ, то свет будет вращаться в одну сторону, а если частота генератора меньше частоты сети, то свет начнёт вращаться в противоположную сторону. Ре-

гулируя частоту вращения первичного двигателя, добиваются того, чтобы период вращения света по окружности не превышал 3–5 с. Затем определяют момент включения генератора на параллельную работу, при котором лампа, включённая в разрыв фазы, потухнет, а две другие лампы будут гореть одинаково ярко. В этот момент СГ подключают к сети, и никакого броска тока якоря не будет.

Ламповые синхроскопы в настоящее время практически не применяются для включения СГ на параллельную работу. Для включения синхронных генераторов большой мощности используют современные электромагнитные и электронные устройства.

3.8.2 Включение генератора на параллельную работу с сетью методом самосинхронизации (грубой синхронизации)

Метод точной синхронизации требует дорогостоящего оборудования, квалифицированного персонала и в аварийных ситуациях, когда всё время изменяются параметры сети, не позволяет быстро включить резервный генератор на параллельную работу. Время настройки может достигать нескольких минут, что может привести к тяжёлым последствиям. Это – недостатки включения СГ на параллельную работу методом точной синхронизации.

Инженерами в Советском Союзе был разработан новый метод включения СГ на параллельную работу. Этот способ включения называется *методом самосинхронизации (или грубой синхронизации)*. Метод самосинхронизации позволяет в течение нескольких десятков секунд включить синхронный генератор на параллельную работу с сетью. Схема реализации метода самосинхронизации СГ представлена на рисунке 3.17.

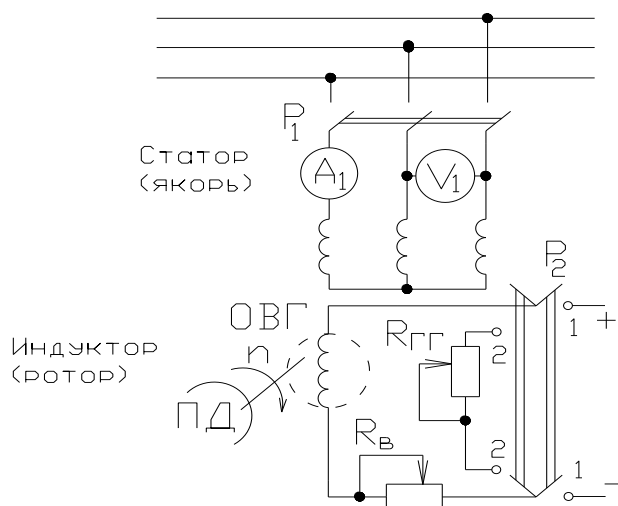


Рис. 3.17. Схема реализации метода самосинхронизации СГ

При методе самосинхронизации на параллельную работу с мощной сетью включается невозбуждённый синхронный генератор, напряжение которого равно нулю. После подключения СГ сразу подают постоянный ток возбуждения в обмотку ротора. После подключения невозбуждённого синхронного генератора

к сети возникает бросок тока в обмотке якоря, почти такой же, как и при трёх-фазном коротком замыкании. Но величина броска тока якоря будет меньше, чем при коротком замыкании, так как на пути протекания тока будут сопротивления линии электропередач, трансформаторов электростанций и подстанций и других генераторов.

Допускается использование метода самосинхронизации для включения синхронных генераторов на параллельную работу, если величина броска тока не превышает $3,5I_n$. Изначально этот метод предназначался для включения СГ небольшой мощности. Оказалось, что методом самосинхронизации можно включать и генераторы мощностью в несколько сотен тысяч кВА.

Рассмотрим последовательность включения синхронного генератора методом грубой синхронизации.

Включают первичный двигатель и устанавливают частоту его вращения близкую к синхронной, затем рубильник P_2 включают в положение 1-1 и устанавливают $U_G = U_C$. После этого рубильник P_2 включают в положение 2-2, и $U_G = 0$. Включают рубильник P_1 и возбуждённый генератор подключают на полное напряжение сети. Следует бросок тока якоря, и сразу же рубильник P_2 переключают в положение 1-1, подавая постоянный ток в обмотку возбуждения. Генератор начинает работать параллельно с сетью. Переключение рубильника в обмотке возбуждения в положение 2-2 приводит к замыканию её на сопротивление. На процесс синхронизации эта операция не оказывает никакого влияния. Делается это для защиты обмотки возбуждения СГ от возможного пробоя изоляции.

В настоящее время данный метод широко используется в России и за рубежом.

3.9 Преобразованная векторная диаграмма синхронного генератора

Преобразуем векторную диаграмму явнополюсного синхронного генератора (рис. 3.18). Для этого опустим перпендикуляр из точки D на вектор ЭДС E_0 и получим отрезок DE , на который опустим перпендикуляр из точки C . Треугольник CDF – прямоугольный по построению, а угол $CDF = \psi$ (как угол с взаимно перпендикулярными сторонами).

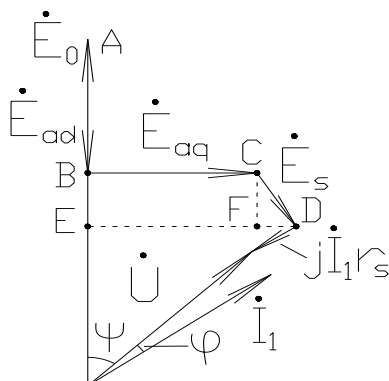


Рис. 3.18. Преобразование векторной диаграммы синхронного генератора

Определим длины отрезков \overline{AE} и \overline{DE} :

$$\overline{AE} = \overline{AB} + \overline{BE}; \quad AB = |E_{ad}| = I_d x_{ad};$$

$$BE = CF = E_s \sin \psi = I_1 x_s \sin \psi = I_d x_s;$$

$$AE = I_d x_{ad} + I_d x_s = I_d (x_{ad} + x_s) = I_d x_d,$$

x_d – синхронное индуктивное сопротивление синхронного генератора по продольной оси.

$$\begin{aligned} \overline{ED} &= \overline{EF} + \overline{FD} = E_{aq} + E_s \cos \psi = I_q x_{aq} + I_1 x_s \cos \psi = \\ &= I_1 x_{aq} \cos \psi + I_1 x_s \cos \psi = I_1 \cos \psi (x_{aq} + x_s) = I_q x_q, \end{aligned}$$

x_q – синхронное индуктивное сопротивление синхронного генератора по поперечной оси.

В синхронных генераторах средней и большой мощности активное сопротивление фазы статора r_s очень мало, так же мало и падение напряжения $I_1 r_s$, поэтому им, как правило, пренебрегают. Представим преобразованную диаграмму явнополюсного синхронного генератора без учета $I_1 r_s$ (рис. 3.19).

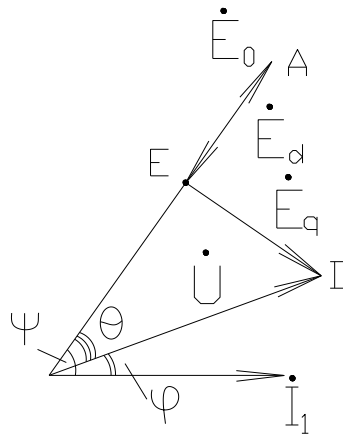


Рис. 3.19. Преобразованная векторная диаграмма синхронного генератора

В теории синхронных машин преобразованная векторная диаграмма широко используется при выводе ряда важных аналитических соотношений.

3.10 Энергетическая диаграмма мощностей синхронного генератора

Рабочий процесс синхронного генератора можно представить в виде энергетической диаграммы мощностей (рис. 3.20).

К синхронному генератору подводится механическая мощность P , передаваемая первичным двигателем. Часть этой мощности расходуется на покрытие P_B – потерь мощности на возбуждение генератора. У генератора будет тратиться часть мощности за счёт P_C – потерь в стали (потери в сердечнике статора и ротора) и механических потерь $P_{\text{Мех}}$ – потери на все виды трения и вентиля-

цию. Если все перечисленные потери вычесть из подводимой мощности, получим величину электромагнитной мощности $P_{ЭМ} = P_1 - (P_B + P_C + P_{МЭХ})$.

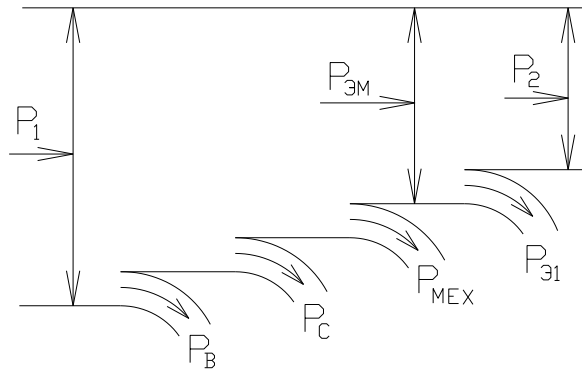


Рис. 3.20. Энергетическая диаграмма СГ

$P_{ЭМ}$ – электромагнитная мощность, передаваемая при помощи магнитного поля через воздушный зазор от ротора к статору, т. е. от индуктора к якорю. Если из электромагнитной мощности вычесть мощность электрических потерь $P_{Э1}$ в обмотке статора (якоря), то получим P_2 – полезную мощность генератора, которую получают потребители электроэнергии.

В синхронных машинах средней и большой мощности $P_{Э1}$ намного меньше чем $0,01P_1$, поэтому часто полагают, что $P_{Э1} \cong 0$ и полезная мощность P_2 практически равна $P_{ЭМ}$:

$$P_2 \cong P_{ЭМ} = mUI_1 \cos \varphi.$$

3.11 Электромагнитные мощность и момент синхронной машины

Воспользуемся преобразованной векторной диаграммой для определения соотношений для расчёта электромагнитных мощности и момента синхронной машины. В качестве исходной формулы примем соотношение для определения электромагнитной мощности в общем виде:

$$P_2 \cong P_{ЭМ} = mUI_1 \cos \varphi.$$

Представим угол φ в виде (на основании преобразованной векторной диаграммы (рис.3.19)) $\varphi = \psi - \Theta$, тогда:

$$P_{ЭМ} = mUI_1 \cos(\psi - \Theta);$$

$$P_{ЭМ} = mUI_1 \cos \psi \cos \Theta + mUI_1 \sin \psi \sin \Theta;$$

$$I_1 \cos \psi = I_q; \quad I_1 \sin \psi = I_d;$$

$$\overline{OE} = U \cos \Theta = E_0 - E_d = E_0 - I_d x_d \text{ (см. преобразованную диаграмму);}$$

$$I_d = \frac{E_0 - U \cos \Theta}{x_d};$$

$$\bar{E}\bar{D} = E_q = I_q x_q = U \sin \Theta;$$

$$I_q = I_1 \cos \psi = \frac{U \sin \Theta}{x_q}.$$

Подставляя выражения для I_q и I_d в исходное уравнение для $P_{\text{ЭМ}}$, получим:

$$P_{\text{ЭМ}} = mUI_q \cos \Theta + mUI_d \sin \Theta;$$

$$P_{\text{ЭМ}} = mU \frac{U \sin \Theta}{x_q} \cos \Theta + mU \frac{E_0 - U \cos \Theta}{x_d} \sin \Theta;$$

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{mU^2}{x_q} \sin \Theta \cos \Theta + \frac{mUE_0}{x_d} \sin \Theta - \frac{mU^2}{x_d} \sin \Theta \cos \Theta;$$

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{mUE_0}{x_d} \sin \Theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta.$$

Последнее соотношение можно записать в виде:

$$P_{\text{ЭМ}} = P_{\text{осн}} + P_{\text{доб.}}$$

В неявнополюсной машине $x_q = x_d$ и $P_{\text{доб.}} = 0$.

Соотношение для расчёта электромагнитного момента СМ получим, разделив электромагнитную мощность на синхронную угловую частоту вращения.

Электромагнитный момент синхронной машины:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega} = \frac{mUE_0}{\omega x_d} \sin \Theta + \frac{mU^2}{2\omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta.$$

Электромагнитный момент СМ можно представить в виде суммы двух моментов – основного и реактивного, обусловленного неодинаковыми магнитными проводимостями машины по продольной и поперечной осям

$$M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{осн}} + M_{\text{р.}}$$

Реактивный момент $M_{\text{р}}$ возникает на валу синхронной машины, у которой $x_q \neq x_d$, т. е. у явнополюсной машины.

3.12 Работа синхронного генератора при постоянной мощности и переменном возбуждении

Полагаем, что синхронный генератор работает параллельно с сетью с бесконечно большой мощностью, у которой напряжение и частота неизменны ($U = \text{const}$ и $f = \text{const}$).

Если синхронный генератор работает на холостом ходу, его электродвижущая сила уравнивает напряжение мощной сети и ток его якоря равен нулю. Начинаем увеличивать ток возбуждения сверх номинального значения,

что приведёт к росту основного магнитного потока и увеличению ЭДС генератора до значения \dot{E}'_0 . ЭДС генератора будет превышать напряжение сети.

Покажем это на векторной диаграмме (рис. 3.21).

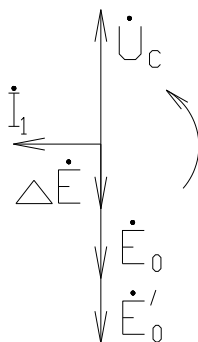


Рис. 3.21. Векторная диаграмма СГ при увеличении тока возбуждения

Возникает разность между напряжением сети и ЭДС генератора:

$$\dot{E}'_0 - \dot{U}_C = \Delta \dot{E}.$$

Под действием разности ЭДС $\Delta \dot{E}$ в обмотке статора (якоря) синхронного генератора потечёт ток для I_1 , который будет отставать от неё на 90 градусов.

Если увеличивать ток возбуждения дальше, то будут расти ЭДС $\Delta \dot{E}$ и I_1 .

На векторной диаграмме (см. рис. 3.21) видно, что по отношению к генератору ток якоря I_1 будет чисто индуктивным и отстающим от ЭДС, а по отношению к напряжению сети тот же ток является чисто ёмкостным, опережающим напряжение на 90 градусов. Если начать уменьшать ток возбуждения, то ЭДС \dot{E}'_0 будет меньше, чем \dot{E}_0 , которая соответствует номинальному значению тока возбуждения.

Появится разность $\Delta \dot{E}$, равная:

$$\Delta \dot{E} = \dot{U}_C - \dot{E}'_0.$$

Под действием ЭДС $\Delta \dot{E}$ в обмотке статора (якоря) потечёт ток I_1 , который будет отставать от этой ЭДС на 90 градусов. Это показано на векторной диаграмме (рис. 3.22).

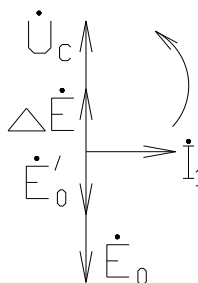


Рис. 3.22. Векторная диаграмма СГ при уменьшении тока возбуждения

В данном случае ток якоря I_1 по отношению к напряжению сети будет чисто индуктивным, а по отношению к ЭДС генератора – чисто ёмкостным.

При дальнейшем увеличении тока возбуждения ток якоря I_1 будет расти. Электромагнитная мощность генератора:

$$P_2 \cong P_{\text{ЭМ}} = mUI_1 \cos \varphi.$$

В формуле мощности $mU = \text{const}$, и если изменение тока возбуждения происходит при $P_{\text{ЭМ}} = \text{const}$, то в произведении $I_1 \cos \varphi$ будет изменяться реактивная составляющая тока якоря. Если при $P_{\text{ЭМ}} = \text{const}$ будет изменяться ток возбуждения генератора, то получается ряд U-образных характеристик (рис. 3.23), представляющих собой зависимости $I_1 = f(I_{\text{в}})$ при $P_{\text{ЭМ}} = \text{const}$.

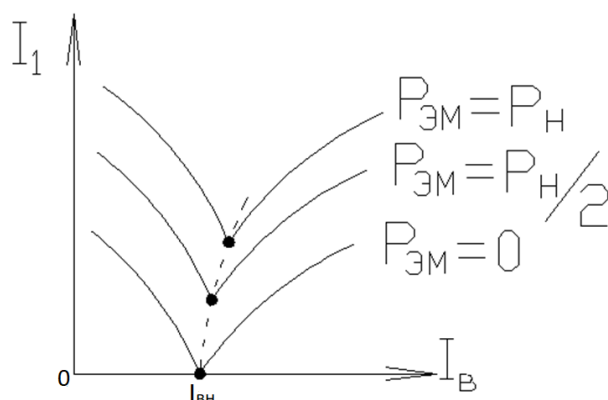


Рис. 3.23. U-образные характеристики синхронного генератора

Слева от штриховой линии (см. рис. 3.23) находится зона, в которой ток якоря синхронного генератора I_1 по отношению к сети является индуктивным, а справа от неё – зона, в которой ток якоря I_1 по отношению к сети является ёмкостным. Нижние точки U-образных кривых соответствуют чисто активному току I_1 ($\cos \varphi = 1$). Нижние точки U-образных характеристик с ростом мощности незначительно смещаются вправо и вверх из-за увеличения падения напряжения в цепи якоря синхронной машины.

3.13 Синхронизирующие мощность и момент синхронной машины

При работе синхронной машины в установившемся режиме мощность, подводимая к ней извне, равна мощности, которую СМ отдаёт в энергосистему, если она работает в режиме генератора, или механизму, если синхронная машина работает в двигательном режиме. На работу синхронной машины оказывает значительное влияние величина угла между ЭДС машины и фазным напряжением. При определённых изменениях этого угла СМ способна сохранять синхронный режим работы из-за того, что возникает разность мощностей между подводимой и отдаваемой мощностями, под действием которой восстанавливается режим работы. Эта разность мощностей называется **синхронизирующей мощностью**. Нарушение равенства мощностей приводит к изменению угла Θ между ЭДС E_0 и фазным напряжением U . Физически можно представить угол Θ как угол между осями магнитных полей статора и ротора. Синхронизирующая мощность приводит к образованию **синхронизирующего момента**, который стремится компенсировать изменение угла Θ .

Синхронизирующую мощность можно представить в виде:

$$\Delta P = P_{\text{см}} \Delta \Theta,$$

где ΔP – синхронизирующая мощность;
 $P_{\text{см}}$ – коэффициент синхронизирующей мощности;
 $\Delta \Theta$ – приращение угла Θ .

Синхронизирующей мощности ΔP будет соответствовать синхронизирующий момент:

$$\Delta M = M_{\text{см}} \Delta \Theta,$$

где ΔM – синхронизирующий момент;
 $M_{\text{см}}$ – коэффициент синхронизирующего момента.

Определим значения коэффициентов $P_{\text{см}}$ и $M_{\text{см}}$:

$$P_{\text{см}} = \frac{\Delta P}{\Delta \Theta}; \quad M_{\text{см}} = \frac{\Delta M}{\Delta \Theta}.$$

Переходя к бесконечно малым приращениям, можно получить:

$$P_{\text{см}} = \frac{\partial P}{\partial \Theta}; \quad M_{\text{см}} = \frac{\partial M}{\partial \Theta};$$

Возьмём первые производные соотношений электромагнитных мощности и момента СМ:

$$P_{\text{эм}} = \frac{mUE_0}{x_d} \sin \Theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta;$$

$$P_{\text{см}} = \frac{\partial P_{\text{эм}}}{\partial \Theta} = \frac{mE_0U}{x_d} \cos \Theta + mU^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\Theta;$$

$$M_{\text{см}} = \frac{\partial M}{\partial \Theta} = \frac{mE_0U}{\omega x_d} \cos \Theta + \frac{mU^2}{\omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\Theta.$$

Представим графически электромагнитную мощность СМ и коэффициент синхронизирующей мощности в функции угла тэта (рис. 3.24).

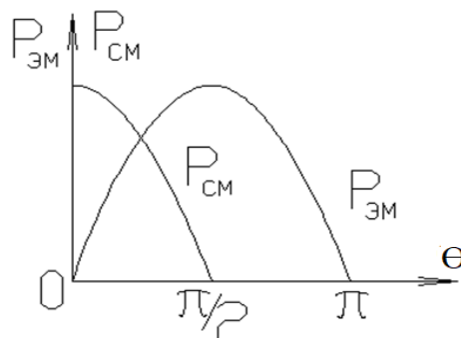


Рис. 3.24. Электромагнитная мощность и коэффициент синхронизирующей мощности

Для неявнополюсной машины, у которой $x_d = x_q$, коэффициенты синхронизирующих мощности и момента определяются следующим образом

$$P_{\text{см}} = \frac{\partial P_{\text{ЭМ}}}{\partial \Theta} = \frac{mE_0 U}{x_d} \cos \Theta;$$

$$M_{\text{см}} = \frac{\partial M}{\partial \Theta} = \frac{mE_0 U}{\omega x_d} \cos \Theta.$$

В синхронных машинах воздушный зазор между статорами и роторами выполняется большим, чем в асинхронных машинах. Увеличение зазора приводит к уменьшению x_d и к увеличению синхронизирующих мощности и момента, т. е. это приводит к повышению статической устойчивости СМ.

Установлено, что более статически устойчивыми оказываются перевозбуждённые синхронные машины.

3.14 Синхронные двигатели. Способы пуска в ход

Синхронные двигатели (СД) имеют более высокие значения коэффициентов мощности по сравнению с асинхронными двигателями, постоянную частоту вращения и используются в электроприводах, приводах, в которых частота вращения должна оставаться синхронной при изменении нагрузки в определённом диапазоне. Мощность электроприводов с СД чаще всего составляет от 300 кВт и более. Часто синхронные двигатели применяют для приводов компрессоров.

Одним из недостатков синхронных двигателей наряду с их высокой стоимостью является сложность пуска их в ход. Синхронные двигатели не могут быть включены непосредственно в сеть для начала работы, из-за того что при вращении их в асинхронном режиме синхронизирующий момент является знакопеременным и в первый полупериод изменения тока в обмотке статора он стремится вращать ротор в одном направлении, а во втором полупериоде изменения тока якоря – в противоположном. Из-за этого ротор СД не может начать вращаться.

Применяют три способа пуска в ход синхронных двигателей:

1 СД может быть включён при помощи вспомогательного разгонного двигателя, который разгоняет его ротор до частоты вращения, близкой к синхронной, после чего в обмотку ротора подаётся ток возбуждения и ротор двигателя толчком втягивается в синхронизм. После чего отключают разгонный двигатель.

Недостаток способа – необходимость иметь дополнительный электродвигатель.

2 Частотный пуск синхронного двигателя. При частотном пуске на обмотку статора (якоря) СД подаётся пониженное напряжение, величина и частота которого плавно увеличиваются до номинальных значений. При этом двигатель сразу начинает работать в синхронном режиме.

Недостаток способа – высокая стоимость мощных преобразователей частоты и напряжения.

3 Асинхронный пуск синхронного двигателя. Наиболее часто синхронные двигатели включают асинхронным способом. Для этого двигатели оборудуют дополнительной короткозамкнутой обмоткой, размещённой в полюсных наконечниках ротора (рис. 3.25).

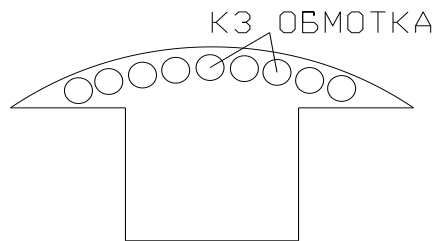


Рис. 3.25. Сердечник полюса ротора СД с короткозамкнутой обмоткой

Как вариант для асинхронного пуска СД полюсы ротора выполняются сплошными (массивными), для того чтобы по ним могли течь вихревые токи.

При асинхронном пуске обмотка статора невозбуждённой машины включается в трёхфазную сеть, и двигатель начинает работать в асинхронном режиме, так как будет создаваться момент за счёт взаимодействия токов в короткозамкнутой обмотке ротора с вращающимся магнитным полем. Когда частота вращения ротора достигнет величины, близкой к синхронной, в обмотку ротора подают ток возбуждения и ротор двигателя толчком втягивается в синхронизм. Двигатель начинает работать в синхронном режиме.

Рассмотрим схему для осуществления асинхронного пуска СД (рис. 3.26).

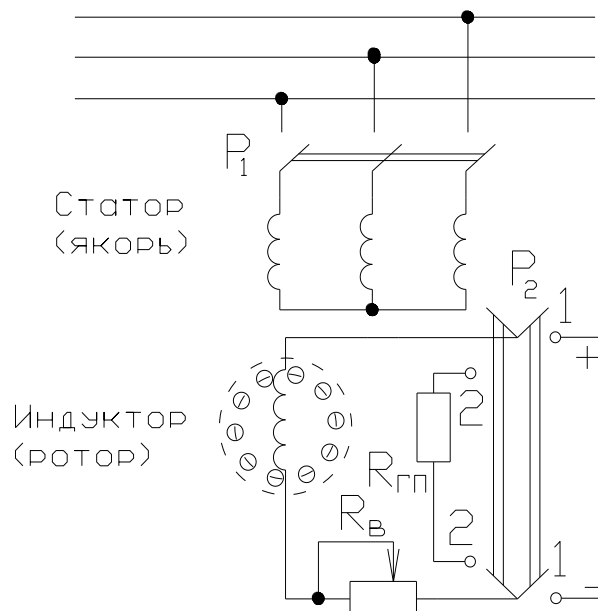


Рис. 3.26. Схема асинхронного пуска синхронного двигателя

Рассмотрим последовательность процесса включения синхронного двигателя. В начале рубильник P_2 (см. рис. 3.26) включают в положение 2-2, затем

включают рубильник P_1 , и ротор двигателя начинает вращаться под действием асинхронного момента, а когда частота вращения ротора будет близка к синхронной, рубильник P_2 переключают в положение 1-1, подавая возбуждение в ротор, и двигатель толчком втягивается в синхронизм. При включении рубильника P_1 обмотка ротора замыкается на сопротивление во избежание её повреждения (иначе возможен пробой изоляции).

3.15 Внезапное короткое замыкание синхронного генератора

Под **внезапным коротким замыканием синхронного генератора** подразумевается время переходного процесса от момента возникновения к. з. до момента, когда ток короткого замыкания достигнет своего установившегося значения. Это время переходного процесса короткого замыкания, которое обычно составляет несколько долей секунды.

Токи короткого замыкания вызывают усиленный нагрев обмоток машины и создают большие электродинамические усилия, которые способны привести к механической поломке генератора.

Причинами аварийных коротких замыканий могут быть:

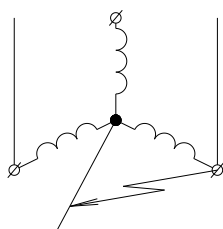
- витковые замыкания;
- пробой на землю;
- ошибочные действия персонала.

Короткое замыкание может случиться в линии (в сети) и на выводах (зажимах) генератора. Наиболее опасными являются короткие замыкания на выводах генератора.

Короткие замыкания могут быть одно-, двух- и трехфазными. Обычно возникает одно- или двухфазное к. з., которое переходит в трёхфазное короткое замыкание.

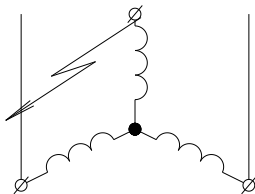
Покажем схематически виды коротких замыканий (рис. 3.27).

Обмотка якоря СГ



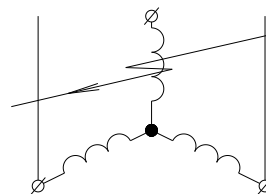
Однофазное к. з.
(на землю)

Обмотка якоря СГ



Двухфазное к. з.

Обмотка якоря СГ



Трехфазное к. з.

Рис. 3.27. Виды коротких замыканий синхронного генератора

В основу анализа процессов при внезапном коротком замыкании СГ положено понятие о *сверхпроводящем контуре*.

Схематически изобразим сверхпроводящий контур на рисунке 3.28.

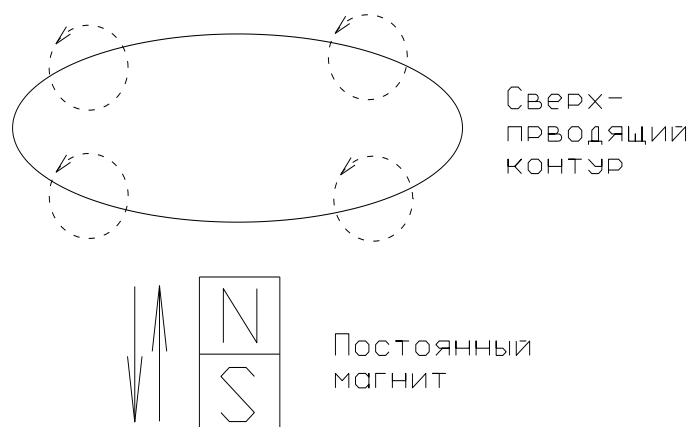


Рис. 3.28. Взаимодействие сверхпроводящего контура с магнитом

Если к сверхпроводящему контуру придвигать или отодвигать постоянный магнит, потокосцепление которого с контуром составит ψ_n , то под действием ЭДС

$$e_n = -\frac{d\psi_n}{dt}$$

в контуре потечёт ток i , который создаст свой магнитный поток, и в контуре будет наводиться и ЭДС самоиндукции e_L :

$$e_L = -\frac{d(Li)}{dt} = -\frac{d\psi_L}{dt},$$

где L – индуктивность сверхпроводящего контура; i – ток контура.

На основании второго закона Кирхгофа можно записать:

$$e_n + e_L = ir.$$

Так как $r = 0$ (контур – сверхпроводник), то тогда

$$\begin{aligned} e_n + e_L &= 0; \\ -\frac{d\psi_n}{dt} &= -\frac{d\psi_L}{dt} = 0. \end{aligned}$$

Из последнего уравнения следует, что:

$$\psi_n + \psi_L = \text{const},$$

т. е. потокосцепление сверхпроводящего контура в любой момент времени одинаково. Именно это и положено в основу анализа процессов, происходящих в синхронном генераторе при внезапном коротком замыкании.

В синхронном генераторе имеются три контура с очень малыми значениями активных сопротивлений:

- 1) обмотка якоря;
- 2) обмотка возбуждения;
- 3) демпферная (успокоительная) обмотка.

Эти контуры в момент наступления внезапного к. з. рассматриваются при анализе как сверхпроводящие. Подробно процессы внезапных коротких замыканий в синхронных генераторах рассматриваются в специальных курсах электрических машин.

3.16 Синхронный компенсатор

Синхронный компенсатор – это электрическая машина, предназначенная для снабжения линий электропередач и электрических сетей ёмкостными токами для компенсации реактивной мощности с целью повышения их энергетических характеристик и поддержания номинального значения напряжения в местах сосредоточения потребительских нагрузок.

В качестве синхронных компенсаторов (СК) могут быть использованы как синхронные генераторы, так и синхронные двигатели. Для компенсации реактивной мощности синхронная машина должна работать в режиме перевозбуждения, т. е. в таком режиме эксплуатации величина постоянного тока в обмотке ее ротора превышает номинальное значение. Покажем область работы синхронного компенсатора на U-образной характеристике синхронной машины, работающей на холостом ходу (на рис. 3.29 эта область заштрихована). В заштрихованной части U-образной характеристики ток статора синхронного компенсатора становится по отношению к току сети ёмкостным. Величина ёмкостного тока СК может плавно регулироваться в достаточно широких пределах, причём этот процесс может быть автоматизирован.

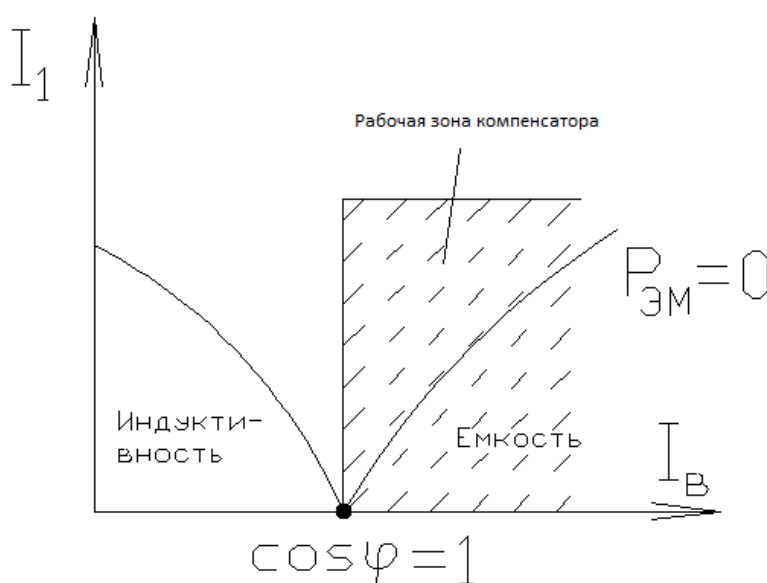


Рис. 3.29. U-образная характеристика синхронного компенсатора

На практике в качестве синхронных компенсаторов используются специально изготовленные синхронные двигатели, работающие на холостом ходу, поэтому их конструкция имеет ряд особенностей, а именно их валы выполняются облегченными (они имеют меньшие площади поперечных сечений), так как валы СК не передают вращающие моменты электрическим приводам, а сечение проводников обмоток возбуждения увеличено, потому что токи возбуждения превышают номинальные значения.

Для пуска в ход синхронных компенсаторов используется асинхронный способ включения, для реализации которого в полюсных наконечниках роторов устанавливают короткозамкнутые обмотки, или же сердечники полюсов выполняются сплошными.

Синхронные компенсаторы устанавливают в конце длинных линий электропередач, на районных трансформаторных подстанциях и на промышленных предприятиях. Гидрогенераторы электростанций в ряде случаев в маловодные годы используются также и в качестве синхронных компенсаторов, одновременно вырабатывая электроэнергию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 **Копылов, И. П.** Электрические машины : учебник для академического бакалавриата. В 2 т. Т. 1 / И. П. Копылов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2019. – 267 с. – ISBN 978-5-534-03222-2.

2 **Жуловян, В. В.** Электрические машины: электромеханическое преобразование энергии : учебное пособие для вузов / В. В. Жуловян. – Москва : Юрайт, 2021. – 425 с. – ISBN 9785534042924.

3 Основы электромеханики : учебное пособие / В. П. Кочетков, В. Я. Беспалов, Е. Я. Глушкин [и др.] ; под редакцией В. П. Кочеткова. – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 639 с. – ISBN 978-5-4486-0259-7.

4 **Игнатович, В. М.** Электрические машины и трансформаторы : учебное пособие для академического бакалавриата / В. М. Игнатович, Ш. С. Ройз. – 6-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2019. – 181 с. – (Серия : Университеты России). – ISBN 978-5-534-00881-4.

5 **Соломин, В. А.** Электрические машины : учебное пособие. В 3 ч. Ч. 1 : Трансформаторы / В. А. Соломин, Л. Л. Замшина, Н. А. Трубицина ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2020. – 76 с. – ISBN 978-5-88814-909-6.

6 **Соломин, В. А.** Линейные асинхронные тяговые двигатели для высокоскоростного подвижного состава и их математическое моделирование : научное издание / В. А. Соломин, Л. Л. Замшина, А. В. Соломин. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 164 с. – ISBN 978-5-89035-829-5 : 750 экз.

7 **Трубицина, Н. А.** Принцип действия и конструкция электрических машин и трансформаторов : учебно-методическое пособие к лабораторным работам / Н. А. Трубицина, М. А. Трубицин ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : [б. и.], 2015. – 39 с. – ЭБС РГУПС.

Учебное издание

Соломин Владимир Александрович
Замшина Лариса Леонидовна
Трубицина Надежда Анатольевна

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 3

МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Редактор Т. И. Исаева
Техническое редактирование и корректура Т. И. Исаевой

Подписано в печать 08.12.2021. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 5,58. Тираж 500 экз. Изд. № 56. Заказ .

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2, www.rgups.ru