

Глад

**Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана**

Е. Н. Баранов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 1. Машины постоянного тока

Конспект лекций по курсу ТОЭ

**Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана
1994**

Рецензенты: *В.С.Семенов, О.И.Миссюк*

Б25 Баранов Е.Н. Электрические машины. Ч.1. Машины постоянного тока /Под ред. С.С.Николаева: Конспект лекций по курсу ТОЭ. М.: Изд-во МГТУ, 1994. — 28 с., ил.

ISBN 5-7038-1214-3

Рассмотрены принцип действия и конструкция машины постоянного тока; изложены основы теории, характеристики и способы регулирования и управления, а также перспективы развития этого класса машин — создание бесколлекторной машины постоянного тока (вентильного электродвигателя). Основное внимание уделено применению машины постоянного тока как элемента автоматизированного электропривода для исполнительного устройства систем регулирования и управления.

Ил. 20. Библиограф. 6 назв.

ВБК 31.261

Редакция заказной литературы

Евгений Николаевич Баранов

Электрические машины.
Ч. 1. Машины постоянного тока

Заведующая редакцией *Н.Г.Ковалевская*

Редактор *Г.А.Нилова*

Корректор *Л.И.Малютина*

ISBN 5-7038-1214-3

© МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1994.

Подписано в печать 10.04.94. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 2.

Печ. л. 1,75. Усл. печ. 1,63. Уч.-изд. л. 1,62. Тираж 500 экз.

Изд. № 4. Заказ № *334 с 417*

Издательство МГТУ, типография МГТУ,
107005, Москва Б-5, 2-я Гуманская, 5.

Электрические машины относятся к обширному классу устройств, называемых в общем случае электромеханическими преобразователями. Для таких устройств преобразование электромагнитной энергии в механическую и обратное преобразование — существенная и полезная сторона изучаемого процесса. В этом их основное отличие от электрических цепей, в которых происходят преобразования энергии лишь в самой электромагнитной системе (взаимные преобразования электрического и магнитного полей), а также же необратимые процессы тепловых потерь энергии в активных сопротивлениях. Следует отметить, что электромеханические устройства обладают свойством обратимости, т.е. без каких-либо принципиальных конструктивных изменений их можно использовать как в режиме преобразования электромагнитной энергии в механическую (в качестве электродвигателя), так и для обратного преобразования энергии (в качестве электрогенератора).

В практике современного инженера-приборостроителя количество электромеханических устройств, с проектированием и применением которых ему приходится иметь дело, весьма велико и имеет тенденцию к дальнейшему росту. Это прежде всего электродвигатели различного типа, используемые в качестве исполнительных устройств систем автоматического регулирования и управления. При этом возрастает потребность в устройствах особых типов (линейные и волновые электродвигатели, машины с вентильной коммутацией, двигатели-маховики), а также электромеханические устройства, используемые в качестве информационных датчиков, например, датчики угловых перемещений и скоростей, датчики крутящего момента).

Цель данного пособия — ознакомление студентов с работой реальных существующих устройств. Пособие в определенной степени служит теоретической базой для новых разработок.

1. Простейшая модель машины постоянного тока.

Принцип действия

Простейшая модель машины постоянного тока представлена на рис.1. Она состоит из системы возбуждения — индуктора, представленного постоянными магнитами N , S , между полюсами которых существует неподвижное в пространстве и неизменное во времени магнитное поле, обмотки якоря (ротора), состоящей в простейшем случае из одного витка с активными проводниками aa и bb , и так называемого коллектора. Последний состоит из двух изолированных между собой полуклец, к каждому из которых припаян один из концов обмотки якоря, и угольно-графитовых щеток, соединенных проводами с клеммами источника питания постоянного тока с выходным напряжением U . Между щетками и полукольцами в процессе вращения ротора осуществляется скользящий электрический контакт. Таким образом обеспечивается замкнутый путь электрического тока, причем I — ток, потребляемый от источника питания, i — ток в обмотке якоря.

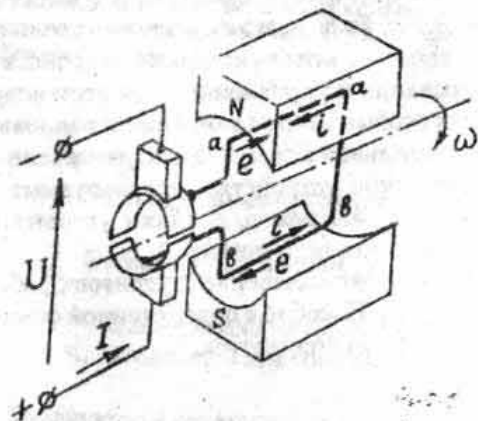


Рис. 1

На рис.2 изображено поперечное сечение такой простейшей машины при определенном пространственном положении обмотки

якоря относительно полюсов возбуждения. Силовые линии магнитного поля возбуждения показаны пунктиром. На активные части проводников с током в магнитном поле действуют электромагнитные силы F_3 , создающие крутящий момент, который приводит ротор во вращение. Направление действия сил легко определить, пользуясь известным правилом левой руки. При повороте ротора с обмоткой на угол $\alpha = \pi/2$ момент станет равным нулю, так как проводники с током находятся в очень слабом магнитном поле, к тому же сила F_3 может иметь в этом случае только радиальную составляющую.

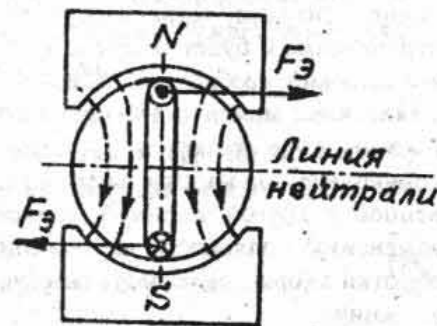


Рис. 2

Линию, проходящую через центр вращения ротора и перпендикулярную магнитной оси полюсов возбуждения, называют линией геометрической нейтралли машины. Момент машины обращается в нуль, когда плоскость обмотки (секции) якоря совмещается с линией нейтралли машины.

Если бы ток в секции обмотки якоря был постоянным, то неизменным оставалось бы и направление сил F_3 при любом пространственном положении обмотки; это означало бы, что после прохождения обмоткой линии нейтралли ($\alpha > \pi/2$) направление крутящего момента изменялось бы на обратное. В целом закон изменения момента от угла поворота $M(\alpha)$ соответствовал бы кривой, представленной на рис.3. Среднее значение момента за каждый оборот ротора было бы равно нулю, и режим непрерывного вращения был бы невозможен.

Для обеспечения режима непрерывного вращения необходимо изменять направление дейст-

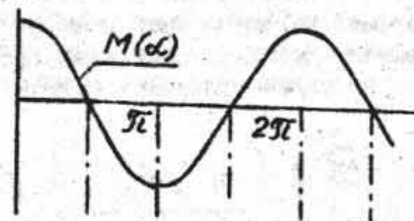


Рис. 3

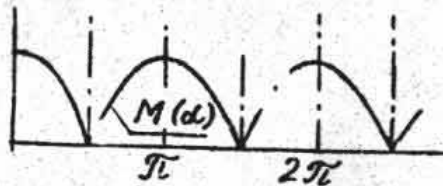


Рис. 4

виз силы F_2 каждый раз в момент прохождения плоскостью секции линии нейтрали, тогда направление крутящего момента останется неизменным и будет соответствовать кривой на рис.4. Практически это означает необходимость изменять направления тока в обмотке в указанные моменты времени. Подобная искусственная коммутация тока и осуществляется коллектором. Через каждые пол-оборота полукольцо коллектора начинает контактировать со щеткой, соединенной с другой клеммой источника питания, что соответствует изменению полярности напряжения, подводимого к концам секции обмотки якоря, следовательно, и к изменению направления тока i в секции.

Таким образом, устройство называют двигателем постоянного тока, имея в виду лишь тип источника питания: если ток I — постоянный по направлению, то ток i — переменный. Коллектор машины постоянного тока, используемой в режиме двигателя, выполняет функцию инвертора, т.е. преобразователя постоянного тока в переменный ток регулируемой частоты. Частота ω переменного тока в обмотке якоря равна угловой скорости ω ротора двигателя (которую часто называют частотой вращения).

На рис.5 показан примерный характер кривой магнитной индукции B поля возбуждения в пределах каждого полюсного деления τ . Полюсное деление — дуга окружности ротора, соответствующая зоне влияния одного полюса $\tau = \frac{2\pi r}{2p} = \frac{\pi r}{p}$, где p — число пар полюсов возбуждения. В данном случае $p=1$, полюсное деление равно половине окружности ротора. В расчетах часто заменяют реальное распределение индукции под полюсом его средним значением $B_{ср}$.

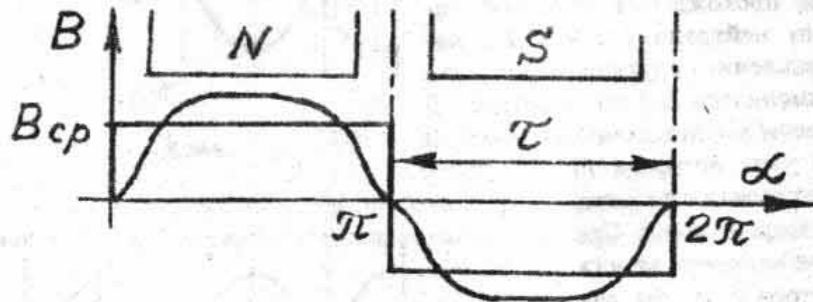


Рис. 5

Вследствие вращения обмотки ротора потокосцепление этой обмотки с неподвижным в пространстве потоком возбуждения меняется по закону, близкому к синусоидальному (рис.6):

$$\psi = \psi_m \cdot \sin \alpha = \psi_m \cdot \sin \omega t. \quad (1)$$

Изменение во времени потокосцепления контура, согласно закону электромагнитной индукции, связано с наведением в нем ЭДС (см. рис.6):

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\omega \psi_m \cos \omega t = -\omega \psi_m \cos \alpha. \quad (2)$$

В отличие от ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции, наводимых в контуре переменным во времени магнитным потоком, существование рассматриваемой ЭДС определяется механическим перемещением контура относительно силовых линий магнитного поля: поток во времени постоянный, но потокосцепление контура с этим потоком переменное. Такую ЭДС называют ЭДС вращения. Направление этой ЭДС легко определить по правилу правой руки; в режиме двигателя ЭДС направлена против тока (см. рис.1), и согласно общему правилу, электрическую мощность $e \cdot i$ следует считать потребляемой от источника. Уравнение баланса мощностей для данного устройства имеет вид

$$Ui = i^2 \cdot r_a + e \cdot i. \quad (3)$$

Здесь Ui — мощность, потребляемая от источника питания; $i^2 r_a$ — мощность нагрева активных сопротивлений цепи якоря (главным образом, нагрева обмотки); $e \cdot i$ — электрическая мощность, потребляемая от источника питания и целиком преобразующаяся в механическую мощность на валу (т.е. полезная мощность).

Наличие ЭДС вращения означает, что машина постоянного тока обладает обратимостью и ее можно использовать в качестве генератора, если обеспечить принудительное вращение якоря, а вместо источника с напряжением U подключить к клеммам сопротивление нагрузки. ЭДС e в этом случае единственная в контуре, ток i совпадает с ней

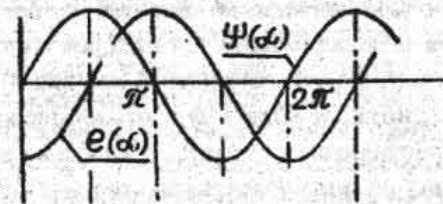


Рис. 6

по направлению. Мощность e_i является генерируемой электрической мощностью (за счет затраты механической энергии на вращение вала). Электромагнитный момент, развиваемый машиной в режиме генератора, будет тормозным; его-то и преодолевает первичный двигатель, вращающий вал генератора.

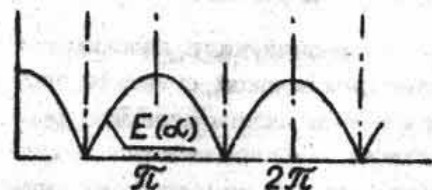


Рис. 7

Интересно отметить, что если ЭДС e в обмотке якоря — переменная, то ЭДС E , измеренная на клеммах нагрузки, будет уже неизменной по направлению (рис. 7). Следовательно, коллектор в режиме генератора выполняет функцию выпрямителя.

Рассмотренная простейшая модель машины постоянного тока обладает существенными недостатками. Электромагнитный момент имеет пульсирующий характер, при некоторых пространственных положениях ротора этот момент равен нулю; запуск двигателя из такого положения невозможен. При использовании в режиме генератора недостатком является пульсирующий характер ЭДС (рис. 7).

Для создания поля возбуждения чаще используют электромагниты постоянного тока с обмоткой возбуждения, состоящей из двух последовательно и согласно соединенных катушек (см. рис. 8), иногда — постоянные магниты, особенно в конструкциях машин малой мощности.

Пути замыкания магнитного потока возбуждения показаны на рис. 8 пунктиром. Магнитное поле возбуждения неподвижно в пространстве.

На рис. 9 представлена конструкция так называемой простой волновой обмотки с диаметральным шагом. В каждом из шести пазов в простейшем случае расположено по два активных проводника (внутренний и внешний). Каждая секция обмотки состоит из двух диаметрально противоположных проводников: внешнего в одном пазу и внутреннего в другом, соединенных между собой проводниками, расположенными на торцевых поверхностях цилиндра ротора. Соединения по переднему торцу изображены в пределах окружности ротора (как это и имеет место в действительности), соединения по заднему торцу условно вынесены за пределы окружности ротора. Последние представляют собой соединения внешних проводников (начала секций) с внутренними (концы секций), в то время как проводники, расположенные в пределах переднего торца, соединяют концы каждой секции с началом следующей (например, K_1 с L_2 , и т.д.). От каждого такого соединения сделан отвод (точки a, b, c, d, e, f), связанный с одной из пластин коллектора. Коллектор — совокупность таких изолированных между собой пластин, закрепленных на роторе. Их число равно числу секций обмотки якоря.

Коллектор — совокупность таких изолированных между собой пластин, закрепленных на роторе. Их число равно числу секций обмотки якоря.

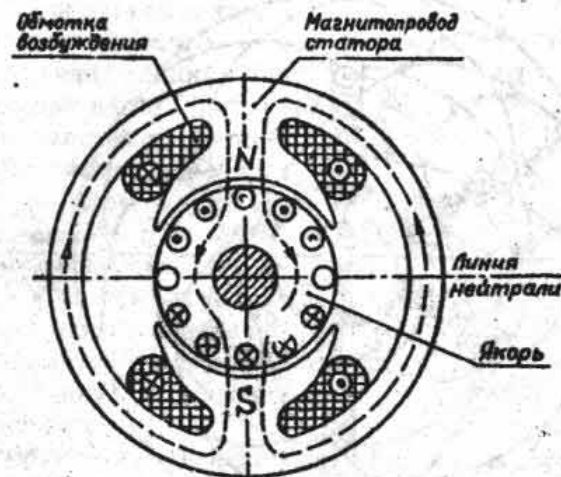


Рис. 8

2. Конструкция машины постоянного тока

Более совершенной является машина с многосекционной обмоткой якоря. В этом случае активные проводники секций равномерно распределены по окружности ротора (см. рис. 8), каждой секции принадлежат проводники, лежащие на противоположных концах диаметра (секции с диаметральным шагом). В каждой секции, находящейся в данный момент на линии нейтрали, должен коммутироваться ток, тогда все проводники, расположенные в зоне действия одного полюса (т.е. в пределах одного полюсного деления), обтекаются токами одного направления; электромагнитные моменты всех проводников суммируются.

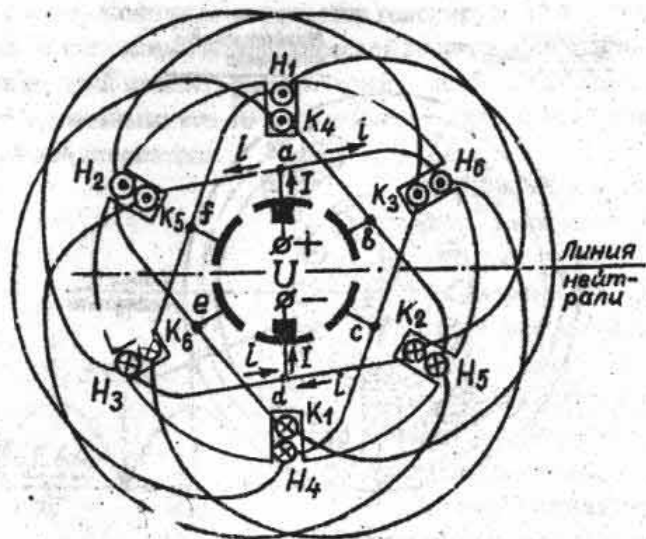


Рис. 9

Принципиальная схема соединений секций между собой и с пластинами коллектора, соответствующая конструкции обмотки на рис. 9, показана на рис. 10. Секции образуют замкнутый контур с отводами. На рис. 9, 10 показаны также щетки, соединенные с клеммами источника питания, неподвижно закрепленные на статоре и контактирующие с двумя диаметрально расположенными пластинами коллектора.

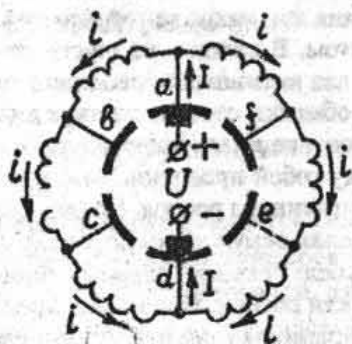


Рис. 10

При повороте ротора вместе с коллектором относительно оси щеток на 30° , например, против часовой стрелки, активные проводники третьей и шестой секций совместятся с линией нейтрали, причем щетки будут одновременно контактировать с двумя со-

седними пластинами коллектора и замкнут накоротко отводы a , и c ; d соответствующих секций. При повороте ротора на 60° (рис. 11) точками разветвления станут отводы f , c , в связи с чем секции третья и шестая войдут в состав других параллельных ветвей, а в их активных проводниках направления токов изменятся на противоположные по сравнению с исходным положением, показанным на рис. 10. В остальных секциях направления токов не изменятся.

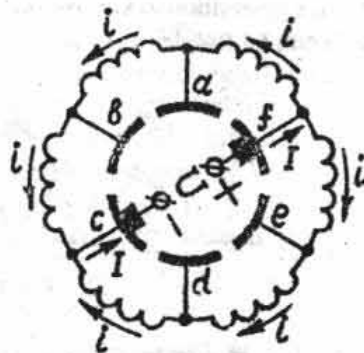


Рис. 11

Таким образом, при непрерывном вращении ротора происходит последовательная во времени коммутация токов в секциях обмотки якоря, проходящих через линию геометрической нейтрали машины. Токи в секциях образуют двухполюсное (N' , S') магнитное поле реакции якоря (рис. 12), неподвижное в пространстве, с осью, совпадающей с линией нейтрали. Следовательно, магнитные оси поля возбуждения и поля реакции якоря взаимно перпендикулярны.

Следует отметить, что в реальных конструкциях количество секций обмотки якоря обычно больше шести (до нескольких десятков у крупных машин), причем секции не одновитковые как показано на рис. 9, а многовитковые. Такие машины значительно совершеннее, чем разобранные выше конструкции с одной секцией. В создании электромагнитного момента принимают участие активные проводники всех секций, кроме двух, находящихся в данный момент времени на линии нейтрали.

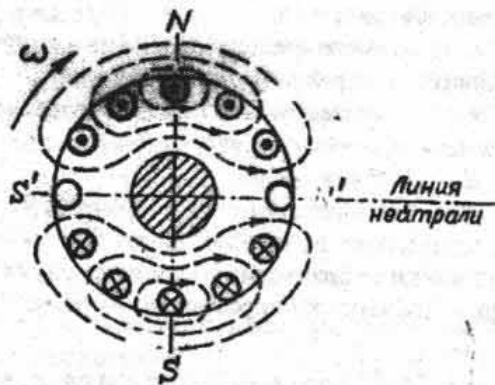


Рис. 12

Принципиальная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением показана на рис. 13. Она состоит из контура обмотки якоря и контура обмотки возбуждения (ОВ), питающихся от двух

независимых источников. Соответствующая расчетная схема замещения приведена на рис. 14.

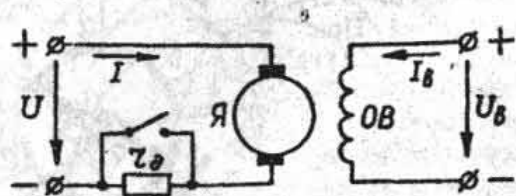


Рис. 13

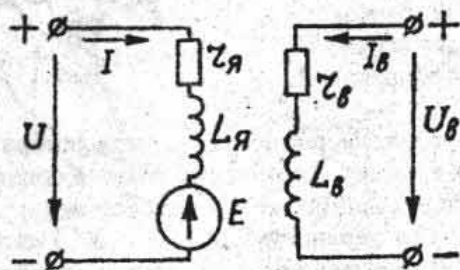


Рис. 14

Принятые на схеме обозначения:

$r_я, L_я$ — активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря соответственно;

$r_в, L_в$ — активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения соответственно;

$r_д$ — дополнительное активное сопротивление, включаемое иногда в цепь обмотки якоря;

E — ЭДС вращения.

Индуктивности обмоток учитывают в схеме замещения при анализе переходных процессов двигателя постоянного тока, при расчете статических характеристик соответствующие участки на схеме замещения показывают короткозамкнутыми.

3. Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока

Определим ЭДС, наводимую в обмотке якоря машины постоянного тока. Для этого удобно воспользоваться законом электромагнитной индукции в формулировке Фарадея и трактовать при этом эффект наведения ЭДС как результат пересечения проводниками обмотки якоря силовых линий магнитного поля обмотки возбуждения (в § 1

была приведена формулировка Максвелла, где причиной возникновения ЭДС считалось изменение потокосцепления контура). Введем следующие обозначения:

N — полное число активных проводников обмотки якоря;

a — число параллельных ветвей обмотки якоря;

p — число пар полюсов системы возбуждения.

ЭДС, индуцированную в одном активном проводнике, определяют по известной формуле

$$e = B_{cp} \cdot l \cdot V, \quad (4)$$

где B_{cp} — среднее значение магнитной индукции под полюсом (см. рис. 5); l — длина активного проводника (равная осевой длине ротора и полюсов статора); V — линейная скорость перемещения проводника относительно силовых линий поля возбуждения.

Как можно видеть на рис. 10, направление тока во всех секциях обмотки якоря, входящих в одну из двух параллельных ветвей, одинаково, а направления токов в двух параллельных ветвях взаимно противоположно (при круговом обходе контура обмотки якоря). Направление ЭДС в режиме двигателя противоположно направлению тока во всех секциях, а в режиме генератора — совпадает с направлением тока. Следовательно, в любом из этих режимов суммируются только ЭДС секций, входящих в одну параллельную ветвь обмотки якоря. Наличие же нескольких параллельных ветвей (в данном случае двух) влияет не на значение выходной ЭДС, а на соотношение тока i в секциях и тока I во внешней цепи машины. В нашем случае в любой момент времени $I = 2i$, в общем случае $I = a \cdot i$. Так как в одной параллельной ветви содержится N/a активных проводников, ЭДС одной параллельной ветви (и в целом ЭДС машины постоянного тока)

$$E = e \cdot \frac{N}{a}.$$

Линейная скорость $V = \omega \cdot \frac{d}{2}$, где ω — угловая скорость вращения ротора; d — диаметр ротора. Заметим также, что длина окружности ротора $\pi d = \tau \cdot 2p$, следовательно,

$$E = B l \omega \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{N}{a} \cdot \frac{\pi}{\pi} = B l \omega \cdot \frac{N}{2a\pi} \cdot \tau \cdot 2p.$$

Поскольку величина τl представляет собой площадь одного полюса, то $\tau l B = \Phi$ — это магнитный поток в расчете на один полюс.

В таком случае, обозначая величину $\frac{Np}{a\pi} = k_e$, получим

$$E = k_e \Phi \omega, \quad (5)$$

где k_e — постоянный для данной конструкции коэффициент ЭДС.

Определим теперь электромагнитный крутящий момент машины постоянного тока. Сила, действующая на проводник с током, находящимся во внешнем магнитном поле,

$$F = B l i. \quad (6)$$

Крутящий момент одного проводника $M_{\text{пр}} = B l i \cdot \frac{d}{2}$, причем как уже отмечено, $i = I/a$. Общее число активных проводников в обмотке якоря равно N , следовательно, суммарный крутящий момент

$$M = l \frac{I}{a} \cdot N \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{\pi}{\pi} = B l I \cdot \frac{N}{2 a \pi} \cdot \tau \cdot 2 p.$$

Обозначая величину $\frac{N l}{a \pi} = k_m$ запишем

$$M = k_m \Phi I. \quad (7)$$

Полученное совпадение значений конструктивных коэффициентов ЭДС и момента $k_e = k_m$ справедливо лишь при условии, что суммарное магнитное поле машины есть поле обмотки возбуждения. Это отвечает действительности лишь при компенсации поля реакции якоря с помощью тока в специальной компенсационной обмотке, которую предусматривают, как правило, лишь в конструкциях машин постоянного тока большой мощности. В остальных случаях магнитное поле машины является результатом сложения полей обмотки возбуждения и обмотки якоря. Наличие потока реакции якоря приводит, в основном, к неблагоприятным последствиям: ухудшение процессов коммутации, уменьшение крутящего момента при заданных значениях Φ и I по сравнению с величиной, определенной по формуле (7). Следует также учитывать, что значение ЭДС и момента определены, в сущности, для машины с компенсацией потока реакции якоря; в иных случаях формулы (5), (7) будут приближительными. В частности, коэффициенты k_e и k_m , полученные экспериментально или по номинальным данным машины, могут существенно отличаться.

1. Механическая и регулировочная характеристики исполнительного электродвигателя постоянного тока

В системах автоматики и телемеханики, в схемах управления и контроля в настоящее время широко применяют управляемые электрические двигатели постоянного тока сравнительно небольшой мощности, с помощью которых преобразуется электрический сигнал (напряжение управления) в механическое перемещение (вращение вала). Такие электрические двигатели обычно называют исполнительными.

Двигатели постоянного тока по сравнению с другими обладают лучшими регулировочными характеристиками и большим пусковым моментом. Основным недостатком машин постоянного тока, ограничивающим область их применения, является наличие скользящих контактов: коллектора и щеток.

В качестве исполнительных чаще всего используют двигатели с независимым возбуждением или (при малых мощностях) — двигатели с постоянными магнитами.

Схема включения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением представлена на рис. 13. Обмотка возбуждения питается от источника с напряжением U_b . Ток возбуждения I_b , протекая по обмотке, создает магнитный поток полюсов машины Φ . Цепь якоря (Я) двигателя питается от источника с напряжением U . При вращении проводников обмотки якоря в магнитном поле возбуждения в них наводится ЭДС E , направленная встречно току I .

Уравнение равновесия моментов для двигателя может быть записано следующим образом:

$$M_d - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

где $M_d = k_m \Phi I$ — движущий момент; M_c — момент сопротивления на валу двигателя; J — момент инерции якоря; $d\omega/dt$ — угловое ускорение якоря.

Отметим, что в статическом режиме (при работе с постоянной скоростью, когда $d\omega/dt = 0$, $M_d = M_c$) развиваемый двигателем момент полностью определяется моментом сопротивления на валу: $M_c = M_2 + M_0$, где M_2 — момент полезной нагрузки; M_0 — момент сопротивления, создаваемый трением в подшипниках, трением между щетками и коллектором, а также трением вращающихся частей о воздух.

При условии $M_d > M_c$ ($d\omega/dt > 0$) двигатель увеличивает скорость вращения, при $M_d < M_c$ ($d\omega/dt < 0$) — сбрасывает скорость. Поскольку момент сопротивления M_c задается извне и в общем случае непостоянен, двигатель должен обладать некоторым внутренним механизмом приведения крутящего момента к моменту сопротивления без которого достижение какого-либо установившегося режима работы ($\omega = \text{const}$) было бы невозможно. Такой механизм легко проследить, анализируя соотношения (5), (6), (7). Действительно, всякое неравенство моментов M_d и M_c вызывает изменение скорости ω , скорость влияет на ЭДС машины, ЭДС E определяет ток в цепи якоря I при заданном напряжении питания U , а всякое изменение тока воздействует на момент M_d . Все эти изменения переменных в переходном режиме продолжаются, очевидно, до тех пор, пока моменты не уравновесятся ($M_d = M_c$), т.е. пока не будет достигнут новый установившийся режим.

Электрическая схема замещения для цепи якоря представлена на рис. 14. Уравнение второго закона Кирхгофа в установившемся режиме ($I = \text{const}$, $L_{я} \cdot \frac{dI}{dt} = 0$) имеет вид

$$U = E + I(r_{я} + r_{д}). \quad (8)$$

Ток якоря

$$I = \frac{U - E}{r_{я} + r_{д}} = \frac{U - k_e \Phi \omega}{r_{я} + r_{д}}. \quad (9)$$

В режиме вращения с номинальной скоростью ЭДС E близка по значению к напряжению питания U , и ток якоря ограничен. В момент включения напряжения скорость $\omega = 0$, ЭДС $E = 0$, и ток $I = U / (r_{я} + r_{д})$ может превышать номинальное значение в десятки раз. В дальнейшем, по мере разгона ротора и увеличения ЭДС E , ток уменьшается и достигает своего установившегося значения. Чтобы избежать слишком большого выброса тока при пуске, его проводят при пониженном напряжении, или на время пуска в цепь якоря вводят добавочное сопротивление (пусковой реостат).

После подстановки в уравнение второго закона Кирхгофа значения E получим

$$\omega = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{(r_{я} + r_{д})}{k_e \Phi} \cdot I. \quad (10)$$

Это уравнение называют скоростной характеристикой двигателя. Подставив $I = M / k_m \Phi$ в уравнение механической характеристики, найдем

$$\omega = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{r_{я} + r_{д}}{k_e k_m \Phi^2} \cdot M. \quad (11)$$

Механическую характеристику $\omega = f(M)$ определяют при $U = \text{const}$, $\Phi = \text{const}$. Это же соотношение можно считать характеристикой управления, если эксперимент проводить при условии $M = \text{const}$, $\Phi = \text{const}$. Таким образом, характеристика управления (регулирующая) — это зависимость $\omega = f(U)$.

5. Способы регулирования скорости двигателя постоянного тока

Уравнение механической характеристики позволяет определить все основные способы регулирования скорости двигателя постоянного тока.

1. Регулирование скорости изменением напряжения в цепи якоря (якорное управление). Пусть механическая характеристика 1 (рис. 15)

$$I = \frac{-k_e \Phi \omega}{r_{я} + r_{д}}; \quad \omega = - \frac{r_{я} + r_{д}}{k_e k_m \Phi^2} M$$

получена при напряжении питания U_1 и потоке возбуждения Φ_1 . Изменение напряжения приведет к тому, что изменится скорость идеального холостого хода $\omega_0 = U / k_e \Phi$, т.е. скорость при моменте сопротивления, равном нулю (реально при отсутствии полезной нагрузки на валу действует момент сопротивления M_0).

Наклон характеристики, определяемый коэффициентом $(r_{я} + r_{д}) / k_e k_m \Phi^2$, не зависит от напряжения. Характеристика 2 (см. рис. 15) соответствует значению $U_2 < U_1$.

Этот способ регулирования следует признать основным для двигателя постоянного тока. Он позволяет осуществлять регулирование скорости в широких пределах при сохранении постоянного наклона ("жесткости") характеристик. Способ экономичен: уменьшение механической мощности на валу $P_2 = \omega M$ достигается уменьшением потребляемой от сети электрической мощности $P_1 = UI + U_{я} I_{я}$ за счет уменьшения напряжения U . Основной недостаток способа — большая мощность регулирования UI , что требует применения соответствующих по мощности управляющих устройств.

2. Регулирование скорости изменением потока возбуждения (полюсное управление). Изменение потока возбуждения приводит к одновременному изменению скорости холостого хода и наклона механической характеристики. Данный способ регулирования применяют обычно в том случае, когда необходимо повысить скорость вращения двигателя при условии, что дальнейшее повышение напряжения в цепи якоря невозможно.

На рис. 15 характеристика 4 соответствует значению потока возбуждения $\Phi_2 < \Phi_1$.

Способ регулирования экономичен, мощность управления (т.е. мощность, потребляемая цепью обмотки возбуждения) невелика. Однако следует заметить, что при неизменном моменте нагрузки уменьшение потока Φ ведет к увеличению тока якоря I (за счет уменьшения ЭДС якоря). Поэтому данный способ регулирования скорости обычно используют при моменте нагрузки на валу, меньшем номинального.

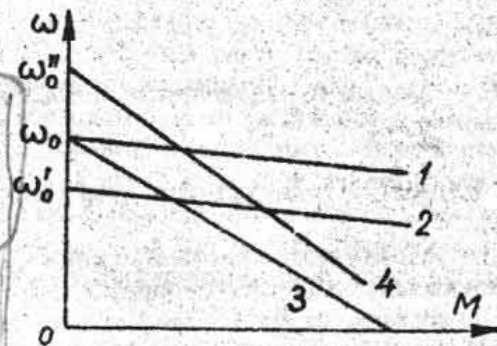


Рис. 15

3. Регулирование скорости изменением добавочного сопротивления в цепи якоря. При увеличении r_d меняется лишь наклон механической характеристики, скорость же идеального холостого хода $\omega_0 = U/k_e$ остается неизменной (см. рис. 15, характеристику 3). Нетрудно видеть, что при разных значениях момента нагрузки диапазоны изменения скорости, соответствующие введению в цепь якоря одного и того же добавочного сопротивления r_d , резко различаются (чем больше момент, тем быстрее снижается скорость).

Способ неэкономичен: значительная часть потребляемой от сети электрической мощности рассеивается в виде тепла на добавочном сопротивлении. Его применяют главным образом для ручной регулировки скорости в небольших пределах.

6. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока

Такие характеристики представляют собой зависимости тока якоря I , скорости вращения ω , момента полезной нагрузки M_2 , КПД от полезной (механической) мощности на валу двигателя P_2 . Мощность P_2 можно рассчитать по формуле

$$P_2 = \omega M_2 = \frac{\pi n}{30} \cdot M_2, \quad (12)$$

где ω — 1/с; n — об/мин; M_2 — Н·м; P_2 — Вт.

Значения I , ω , M_2 определяют в процессе испытаний экспериментально. КПД определяют по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{U I + U_a I_a}, \quad (13)$$

где P_1 — электрическая мощность, потребляемая цепями якоря и возбуждения.

7. Способы торможения двигателя постоянного тока

Отдельным участкам механической характеристики двигателя постоянного тока соответствует определенный режим работы двигателя, как это показано на рис. 1. Участок характеристик, лежащий в квадранте I (или III), соответствует двигательному режиму работы, а участки характеристик в квадрантах II и IV характеризуют три возможных способа электрического торможения. Их общим признаком является переход электродвигателя в режим генератора.

Торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное) осуществляется, когда скорость вращения оказывается выше скорости ω_0 идеального холостого хода, а ЭДС двигателя E больше напряжения питания U . Поэтому ток I (см. уравнение (9)) меняет направление на

обратное по сравнению с режимом двигателя и совпадает по направлению с ЭДС E . Следовательно, двигатель работает в режиме генератора параллельно с сетью, которой он отдает электрическую энергию. Электромагнитный момент двигателя также меняет знак (направление) и становится тормозным. Этому режиму соответствует участок характеристики в квадранте II.



Рис. 16

Динамическое торможение происходит при отключении двигателя от сети и замыкании его на резистор. Этому соответствует значение $U = 0$ в формуле (9). Ток поддерживается в цепи якоря за счет ЭДС вращения и становится равным нулю при скорости $\omega = 0$, так как в этом случае $E = 0$. Таким образом осуществляется торможение до полной остановки двигателя. Кинетическая энергия, запасенная в двигателе и движущихся элементах механизма, на который он работает, преобразуется в электрическую и выделяется в виде тепла на сопротивлениях в цепи якоря. Механическая характеристика двигателя в этом режиме проходит через начало координат.

Торможение противовключением (режим электромагнитного тормоза) происходит в том случае, когда обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а якорь двигателя под воздействием внешнего активного момента (или сил инерции) вращается в противоположную сторону. Механическая характеристика является в этом случае продолжением характеристики двигательного режима в области квадранта IV.

8. Переходные процессы в электродвигателе постоянного тока

При изменении напряжения питания, дополнительного сопротивления в цепи якоря, момента сопротивления на валу электродвигатель до достижения нового установившегося режима работает в переходном

(динамическом) режиме. Он характеризуется изменениями ЭДС якоря, угловой скорости, тока в цепи якоря и электромагнитного момента. В переходном режиме в системе электродвигатель — исполнительный механизм взаимосвязанно действуют переходные механические и электромагнитные процессы, в совокупности называемые электро-механическим переходным процессом.

Уравнение электрического равновесия в переходном режиме имеет вид

$$U = e + ir + L_{\text{я}} \cdot \frac{di}{dt} \quad (14)$$

Уравнение механического равновесия определяется соотношением

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{д}} - M_{\text{с}} \quad (15)$$

Величины e , i — мгновенные значения ЭДС и тока в переходном режиме, одновременно E и I будем считать по-прежнему установившимися значениями этих величин.

В соотношения (5), (7) можно ввести коэффициенты $c_e = k_e \Phi$, $c_m = k_m \Phi$, так как магнитный поток Φ в большинстве случаев выступает как величина постоянная. В таком случае соотношения (14), (15) можно преобразовать следующим образом:

$$U = c_e \omega + ir + L_{\text{я}} \cdot \frac{di}{dt} \quad (16)$$

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = c_m i - M_{\text{с}} \quad (17)$$

Если по уравнению (17) определить значение тока и подставить его в (16), а затем разделить левую и правую части уравнения на c_m , то после преобразований получим

$$\frac{L_{\text{я}}}{r} \cdot \frac{Jr}{c_e c_m} \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{Jr}{c_e c_m} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{c_e} - \frac{r}{c_e c_m} \cdot M_{\text{с}},$$

или

$$T_{\text{э}} T_{\text{м}} \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_{\text{м}} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{c_e} - \frac{r}{c_e c_m} \cdot M_{\text{с}} \quad (18)$$

где $T_{\text{м}} = Jr / c_e c_m$ — электро-механическая постоянная времени;

$T_{\text{э}} = L_{\text{я}} / r$ — электромагнитная постоянная времени цепи якоря.

Как правило, $T_{\text{м}}$ существенно больше $T_{\text{э}}$ и определяет длительность переходных процессов в двигателе (применительно к исполнительным двигателям — их быстродействию). В связи с этим при анализе часто

пренебрегают электромагнитной постоянной времени, т.е. считают, в первом приближении, что $L_{\text{я}} = 0$. В таком случае переходный процесс описывают дифференциальным уравнением первого порядка

$$T_{\text{м}} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{c_e} - \frac{r}{c_e c_m} \cdot M_{\text{с}};$$

электро-механическая постоянная $T_{\text{м}}$ имеет смысл постоянной времени переходного процесса.

При условии $\frac{d^2 \omega}{dt^2} = 0$, $\frac{d\omega}{dt} = 0$, $\omega = \text{const}$ уравнение (18) представляет собой уравнение механической характеристики (11) для определения установившегося значения скорости.

При расчете электро-механических переходных процессов следует учитывать, что не только ток в цепи якоря, обладающей индуктивностью (если ею не пренебречь), но и скорость тела, имеющего массу (или момент инерции, применительно к вращательному движению), не могут изменяться скачком. Следовательно, начальные условия для тока и скорости являются независимыми и могут быть определены на основе анализа докоммутационного установившегося режима. В остальном расчет электро-механических переходных процессов не отличается от расчета переходных процессов в электрических цепях.

Скорость $\omega_0 = U / c_e$ (при условии $M_{\text{с}} = 0$) называют скоростью холостого хода, момент $M_{\text{к}}$, определенный при условии $\omega = 0$, — моментом короткого замыкания. Заметим, что $M_{\text{к}} = V \cdot c_m / r$. Так как $\omega_0 / M_{\text{к}} = r / c_e c_m$, то

$$T_{\text{м}} = \frac{Jr}{c_e c_m} = J \cdot \frac{\omega_0}{M_{\text{к}}} \quad (19)$$

Таким образом, $T_{\text{м}}$ тем больше, чем больше момент инерции и чем меньше так называемая жесткость механической характеристики, определяемой отношением $M_{\text{к}} / \omega_0$. (Идеально жесткая характеристика — прямая, параллельная оси моментов.) Отметим, что способ регулирования скорости за счет изменения значений напряжения питания U — единственный из всех возможных, не связанный с уменьшением жесткости характеристик в процессе регулирования (см. рис.15). Он является наилучшим из всех и в смысле обеспечения наибольшего быстродействия устройства.

9. Генератор постоянного тока

В этом режиме ротор машины постоянного тока получает движение от какого-либо приводного механизма, обеспечивающего крутящий момент M и скорость вращения ω его вала. Направления электромагнитного и крутящего моментов машины противоположны. Нагрузкой служит, в простейшем случае, некоторое резисторное сопротивление r_H (рис. 17), иногда — двигатель постоянного тока соизмеримой мощности (так называемая система генератор — двигатель (ГД)).

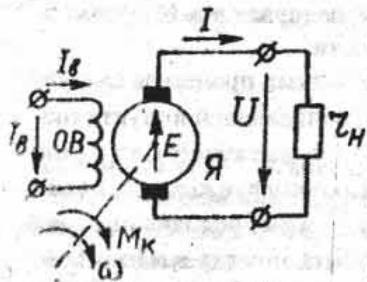


Рис. 17

На рис. 17 изображена схема с независимым возбуждением: обмотка возбуждения питается от дополнительного источника, в связи с чем ток возбуждения I_a легко регулировать, и он не зависит от режима цепи якоря. Известны также способы параллельного возбуждения (ОВ включена параллельно якорю и нагрузке, первоначальное возбуждение достигается за счет остаточной намагниченности магнитопровода), последовательного (ОВ включена последовательно с якорем, ток I является одновременно и током возбуждения), а также смешанного.

В генераторах малой мощности возможно и возбуждение с помощью постоянных магнитов, при этом характеристики идентичны характеристикам генератора с независимым возбуждением, но отсутствует возможность регулирования потока возбуждения. Остановимся на особенностях генератора с независимым возбуждением.

Уравнение второго закона Кирхгофа для цепи якоря имеет вид

$$E = I \cdot r_a + U, \text{ или } U = E - I \cdot r_a. \quad (20)$$

Здесь $E = k_e \Phi \omega$ — ЭДС генератора; r_a — сопротивление обмотки якоря; U — выходное напряжение генератора.

Регулирование ЭДС генератора за счет изменения скорости вращения ω его якоря технически сложно; его применяют редко. Наиболее простой метод регулирования ЭДС (а тем самым и выходного напряжения U) заключается в изменении потока возбуждения Φ за счет тока возбуждения I_a . Ток I_a может изменяться от нуля до значений, обеспечивающих насыщение магнитной цепи машины, дальнейшее увеличение тока бессмысленно и приводит только к излишнему нагреву ОВ и падению КПД. На рис. 18 представлена серия так называемых внешних характеристик генератора $U = f(I)$ при трех различных значениях тока возбуждения, причем $I_{a1} > I_{a2} > I_{a3}$.

Уравнение (20) показывает, что микромашина постоянного тока в режиме генератора может служить в качестве датчика угловой скорости (тахогенератора) любого механизма, с которым она будет соединена своим валом. Действительно, можно записать

$$U = k_e \Phi \omega - I \cdot r_a.$$

Так как $U = I \cdot r_H$, то, подставив в уравнение $I = U/r_H$ и решив его относительно U , получим:

$$U = \frac{k_e \Phi}{1 + \frac{r_a}{r_H}} \cdot \omega. \quad (21)$$

Выходное напряжение U можно считать пропорциональным угловой скорости ω при условии $\frac{k_e \Phi}{1 + r_a/r_H} = \text{const}$. Следовательно, необходимо обеспечить постоянство магнитного потока Φ , за счет применения стабильных постоянных магнитов или поддержания тока возбуждения, обеспечивающего режим насыщения магнитной цепи; в последнем случае поток мало зависит от возможных изменений тока возбуждения. Кроме того, следует обеспечить выполнение условия $r_a/r_H = \text{const}$. Так как стабильность этих сопротивлений нереальна (они могут меняться при нагреве и по другим причинам), то достаточно выполнить условие $r_a/r_H \ll 1$, или $1 + r_a/r_H \approx 1$, т.е. выбрать $r_H \gg r_a$, обеспечивая для генератора режим, близкий к режиму холостого хода ($r_H = \infty$). Тахогенераторы постоянного тока широко применяют в аппаратуре управления.

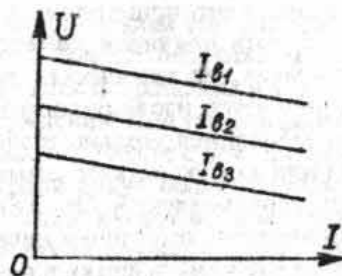


Рис. 18

10. Бесколлекторный электродвигатель постоянного тока (вентильный электродвигатель)

Двигатель постоянного тока обладает многими достоинствами, из которых важнейшее — возможность глубокого регулирования режимов его работы сравнительно простыми техническими средствами. Однако наличие механического коммутатора (коллектора) во многих случаях воспринимается как крупный конструктивный недостаток машины постоянного тока. Процесс механической коммутации сопровождается искрением под щетками. Это, с одной стороны, является источником сильных радиопомех в широком диапазоне частот, что

затрудняет его применение в электронной аппаратуре. С другой — может быть причиной пожара, взрыва при применении в шахтных установках, на химических производствах. Коллектор механически изнашивается, изоляционные промежутки между пластинами коллектора забиваются угольно-графитовой пылью, что угрожает утечками тока или даже коротким замыканием источника питания непосредственно через коллектор. Эта же пыль существенно снижает срок службы подшипников, особенно в машинах малой мощности. Необходимость плотно прижимать щетки к поверхности коллектора приводит к появлению большого момента трения скольжения, значительному току холостого хода и к возникновению зоны нечувствительности в процессе регулирования. Отметим, кроме того, что коллектор не может работать в жидких средах, условиях открытого космоса.

С целью устранения указанных недостатков разработан так называемый бесколлекторный (бесконтактный) двигатель постоянного тока, у которого функции механического коммутатора (коллектора) выполняет специальный электронный коммутатор, являющийся, как и коллектор традиционной машины постоянного тока, преобразователем постоянного тока в переменный с частотой вращения ротора. Коммутатор, в свою очередь, управляется сигналами бесконтактного датчика углового положения ротора (ДПР) — индуктивного, трансформаторного, оптического, на основе эффекта Холла, и т.п. Его задача аналогична задаче обычного механического коллектора: обеспечение изменения направления тока в любой секции обмотки якоря при переходе активных проводников этой секции через линию нейтрали. ДПР непосредственно связан с валом двигателя.

В классической машине постоянного тока коммутируемые секции обмотки якоря располагают на вращающемся роторе, а обмотка возбуждения — на статоре. Попытка использования традиционной конструкции при создании бесколлекторного двигателя привела бы к тому, что вся энергия на ротор должна была бы передаваться трансформаторным путем через воздушные зазоры (двигатель должен остаться при этом бесконтактным). Коммутирующие электронные приборы (транзисторы, тиристоры) тоже пришлось бы размещать вместе с секциями на роторе. Такое техническое решение абсурдно. Поэтому применяют обращенную конструкцию, обмотки якоря располагают на статоре, систему возбуждения (для машин малой мощности удобны постоянные магниты) — на роторе. Электронный коммутатор может быть изготовлен в этом случае в виде отдельного блока.

Такая обращенная конструкция внешне может и не отличаться от традиционной (см. рис. 8). Предположим, что бывший ротор с обмоткой якоря закреплен, а бывший статор с системой возбуждения превращен в ротор, тогда электромагнитный момент приведет во вращение систе-

му возбуждения (при заданных на рис. 8 направлениях токов и потока возбуждения — против часовой стрелки). Линию нейтрали можно определить как прямую, проходящую через центр вращения и перпендикулярную магнитной оси системы возбуждения. При вращении этой системы линия нейтрали вращается, очевидно, вместе с ней. В следующие моменты времени на линии нейтрали будут последовательно оказываться активные проводники всех секций, и в них в эти моменты должны меняться направления токов. В таком случае картина пространственного распределения токов обмотки якоря обоих направлений относительно полюсов системы возбуждения останется во времени неизменной (см. рис. 8). Соответственно, постоянным будет и значение электромагнитного момента.

В бесколлекторном электродвигателе вполне возможно оставить неизменной и конструкцию обмотки якоря (см. рис. 9, 10, 11). Но в этом случае подключение клемм источника питания последовательно к точкам *a, d, f, c* и т.д. должно происходить не вследствие перемещения пластин коллектора относительно щеток (или щеток относительно пластин в обращенной конструкции), а за счет работы электронного коммутатора. Однако следует отметить, что такое прямое заимствование традиционной конструкции обмотки якоря для вентильных двигателей используют редко.

Рассмотренная обращенная конструкция с внутренним статором и внешним ротором вполне отвечает требованиям к двигателю-маховику (например, гидродвигателю). Для исполнительного электродвигателя она неприемлема и из-за большого момента инерции и, следовательно, большой постоянной времени /см. формулу (19)/. Поэтому в основном статор с обмоткой якоря выполняют как внешнюю часть машины, а вращающуюся систему возбуждения (индуктор) — как внутреннюю (рис. 19). Результатом такого двойного обращения по отношению к традиционной машине постоянного тока является то, что конструкция полностью соответствует классической синхронной машине и отличается от нее лишь наличием ДПР. Многие авторы предпочитают поэтому называть бесконтактный двигатель постоянного тока синхронной машиной с самосинхронизацией. Кроме того источником питания коммутатора на практике часто служит источник не постоянного, а переменного тока. В этом случае в качестве коммутирующих приборов (вентелей) удобно применять тиристоры. В силу сказанного в последнее время за такого рода конструкциями закрепилось нейтральное название вентильный электродвигатель.

Один из возможных вариантов блок-схемы управления вентильным электродвигателем представлен на рис. 19. В простейшем случае обмотка якоря имеет две секции (H_1K_1 и H_2K_2), оси которых взаимно перпендикулярны. Каждая секция подключена к выходу одного из

каналов (K_1 или K_2) двухканального вентиляльного коммутатора. Каждый канал коммутирует ток в своей секции якоря по сигналам U_{y1} или U_{y2} датчика положения ротора, связанного с валом двигателя. Общим источником питания является источник постоянного тока с выходным напряжением U_n .

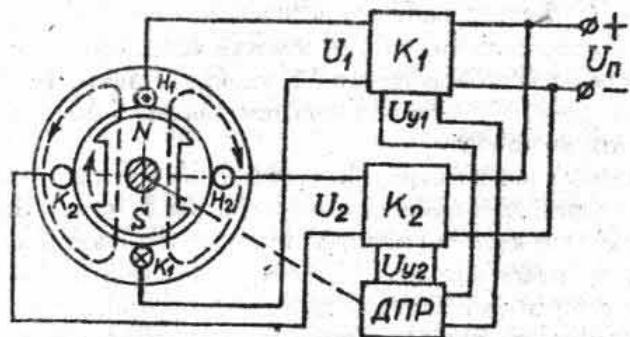


Рис. 19

На рис. 20 представлены графики выходных напряжений U_1 , U_2 каналов коммутатора K_1 и K_2 как функции угла поворота α ротора. Так как $\alpha = \omega t$, где ω — угловая скорость ротора, эти графики при условии $\omega = \text{const}$ можно рассматривать и как функции времени. Начало отсчета соответствует пространственному положению ротора на рис. 19. В первый момент включена только обмотка H_1K_1 (вторая находится на линии нейтрали). При повороте ротора (в данном случае по часовой стрелке) дополнительно к первой подключается вторая обмотка, при повороте ротора на угол, близкий к 90° , первая обмотка оказывается на линии нейтрали и отключается, затем в ней меняется направление тока, и т.д.

С целью регулирования скорости двигателя можно или изменять ширину импульсов тока в обмотках (широтно-импульсное регулирование), или управлять значениями импульсов тока.

При использовании всего двух секций обмотки якоря и двухканального коммутатора упрощается конструкция машины и электронного блока, но при этом имеются и недостатки. В частности, велики пульсации момента в пределах одного оборота ротора, а это в ряде случаев, особенно при использовании двигателя в режиме датчика момента, совершенно неприемлемо. Значительное увеличение числа секций привело бы к решению задачи, но и существенно усложнило бы конструкцию. Есть и другое решение, состоящее в формировании напряжений U_1 и U_2 и, следовательно, токов в секциях в виде двух синусоид

(см. рис. 20, пунктир). Пульсации момента в пределах оборота можно в этом случае свести к минимуму, но конструкция электронного блока, разумеется, будет более сложной.

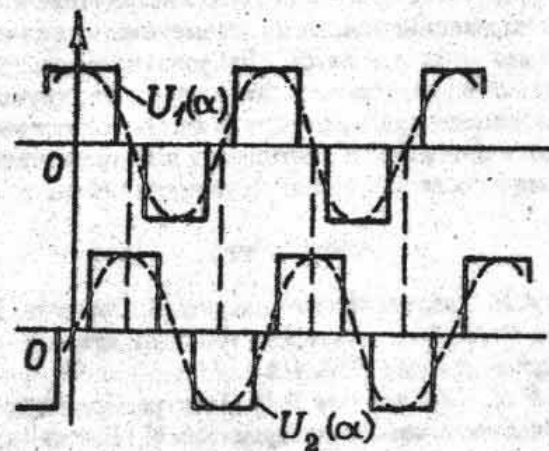


Рис. 20

В настоящее время разработки вентиляльных электродвигателей вышли из стадии лабораторного экспериментирования и создания макетных образцов. Их конструкции применяют достаточно широко, в основном, в диапазоне малых мощностей (хотя известны, например, попытки применения вентиляльных двигателей в качестве тяговых двигателей тепловоза). В дальнейшем их использование, несомненно, будет расширяться. Несмотря на разнообразие конструкций собственно двигателей и схемных решений электронных коммутаторов, все они базируются на изложенных выше общих принципах и имеют механические и регулировочные характеристики, близкие к характеристикам двигателей постоянного тока традиционного исполнения.

Заключение

Электрические машины постоянного тока, в соответствии с принципом обратимости, используют в качестве генераторов и в качестве двигателей. Область применения генераторов постоянного тока не слишком широка, так как задача создания источников постоянного тока, в том числе регулируемых, достаточно просто решается за счет выпрямления переменного тока. Однако в качестве мощного источника постоянного тока, главным образом в автономных системах (авиационных, судовых, в теплоэлектрических приводах тепловозов и мощ-

ных колесных машин), генераторы постоянного тока имеют преимущество.

Двигатели постоянного тока находят широкое применение во всем диапазоне используемых мощностей. Высокие энергетические показатели, простота управления делают их незаменимыми в качестве исполнительных элементов систем автоматизированного электропривода. В тех же случаях, когда известные недостатки их конструкции, связанные с наличием коллектора, препятствуют их использованию, альтернативой является применение вентильных электродвигателей, в разработке которых в последнее время достигнуты значительные успехи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 839 с.
2. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматического устройства. М.: Высшая школа, 1976. 416 с.
3. Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики: Учебное пособие для студентов. М.: Высшая школа, 1986. 336 с.
4. Доброгурский С.О., Казаков В.А., Титов В.К. Счетно-решающие устройства. М.: Оборон. лз, 1959. 463 с.
5. Чилик. и М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергиздат, 1981. 576 с.
6. Микродвигатели для систем автоматики: Технологический справочник // Под. ред. Э.А.Лодочникова, Ф.М.Юферова. М.: Энергия, 1969. 232 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Простейшая модель машины постоянного тока. Принцип действия	4
2. Конструкция машины постоянного тока	8
3. Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока	12
4. Механическая и регулировочная характеристики исполнительного электродвигателя постоянного тока	14
5. Способы регулирования скорости двигателя постоянного тока	16
6. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока	18
7. Способы торможения двигателя постоянного тока	18
8. Переходные процессы в электродвигателе постоянного тока	19
9. Генератор постоянного тока	22
10. Бесколлекторный электродвигатель постоянного тока (вентильный электродвигатель)	23
Заключение	27
Литература	28