

Моделирование управления электроприводом

Для решения задач управления двигателями нужно иметь относительно простое математическое описание двигателя, чтобы можно было анализировать сущность развития процессов в электродвигателе и уметь строить для этого описания системы управления.

Электромеханические преобразователи строятся на пяти основных физических явлениях:

1. На проводник с током в магнитном поле действует сила. При этом не существенно, какова природа поля — создано ли оно постоянным магнитом, специальной катушкой или соседним контуром с током.
2. На ферромагнитный материал в магнитном поле действует сила, стремящаяся переместить его в зону, обеспечивающую минимальное магнитное сопротивление.
3. На обкладки заряженного конденсатора и диэлектрик в электрическом поле действует сила. При взаимном перемещении изменяется или заряд, или напряжение на обкладках, или и то и другое.
4. Некоторые кристаллы слегка деформируются приложении напряжения в определенном направлении. Если такие кристаллы деформировать, возникает электрический заряд. Это явление известно как пьезоэффект.
5. Многие ферромагнитные материалы слегка деформируются под влиянием магнитного поля. И наоборот, будучи деформированы, эти материалы изменяют свои магнитные свойства. Такое явление называют магнитострикцией.

1. Характеристики в электромагнитной системе

Рассмотрим простейшую электромагнитную систему, состоящую из катушки, имеющей w витков, с ферромагнитным сердечником, которую можно подключать к электрическому источнику питания. Для любой электрической цепи с источником питания и индуктивностью применимо уравнение электрического равновесия:

$$u = iR + \frac{d\Psi}{dt} = iR + e$$

где u — напряжение питания; i — ток цепи; R — активное сопротивление; $\Psi = w\Phi$ — потокосцепление, e — электродвижущая сила.

$$uidt = i^2Rdt + \frac{d\Psi}{dt}idt$$

$$uidt = i^2Rdt + id\Psi$$

Левая часть уравнения содержит составляющую элементарной энергии, переданной цепи источником питания. Правая часть содержит элементарные омические потери и элементарное изменение энергии магнитного поля. Формулу можно переписать через непосредственные переменные энергий:

$$dW_{\text{ист}} = d\Delta W + dW_{\text{эм}}$$

Энергия электрического источника за вычетом потерь превратится в электромагнитную энергию. Изменение потокосцепления, связанное с электромагнитной энергией, может быть обусловлено как изменением запаса электромагнитной энергии поля, так и механическим движением, либо обеими этими причинами и, т.е.

$$dW_{\text{эм}} = dW_{\text{поля}} + dW_{\text{мех}} \quad (1.1)$$

$$W_{\text{поля}} = \frac{1}{2} i\Psi \quad (1.2)$$

Для линейной магнитной системы, где потокосцепление определяется произведением индуктивности и тока $\Psi = L(x) \cdot i$, энергия поля запишется как

$$W_{\text{поля}}(\Psi, x) = \frac{1}{2} i\Psi = \frac{L(x)i^2}{2} = \frac{\Psi^2}{2L(x)}$$

Электромагнитная сила –

$$F = -\frac{\partial}{\partial x} \frac{\Psi^2}{2L(x)} = \frac{\Psi^2}{2L(x)^2} \frac{dL(x)}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (1.3)$$

Для вращающейся электромеханической системы выражения для момента:

$$M = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1.4)$$

Характеристики системы с двумя обмотками

Для системы, представленной на рис.1.1 по аналогии с выражением (1.1) имеем

$$dW_{\text{эм}} = dW_{\text{поля}} + Md\theta \quad (1.5)$$

Потокосцепление $\Psi_1 = w_1(\Phi_{1\sigma} + \Phi_1) + w_1 \Phi_2$, где Φ_1 – поток, обусловленный обмоткой w_1 и сцепленный с обеими обмотками; $\Phi_{1\sigma}$ – поток рассеяния, сцепленный с витками первой обмотки, Φ_2 – поток, обусловленный обмоткой w_2 . Аналогично $\Psi_2 = w_2(\Phi_{2\sigma} + \Phi_2) + w_2 \Phi_1$

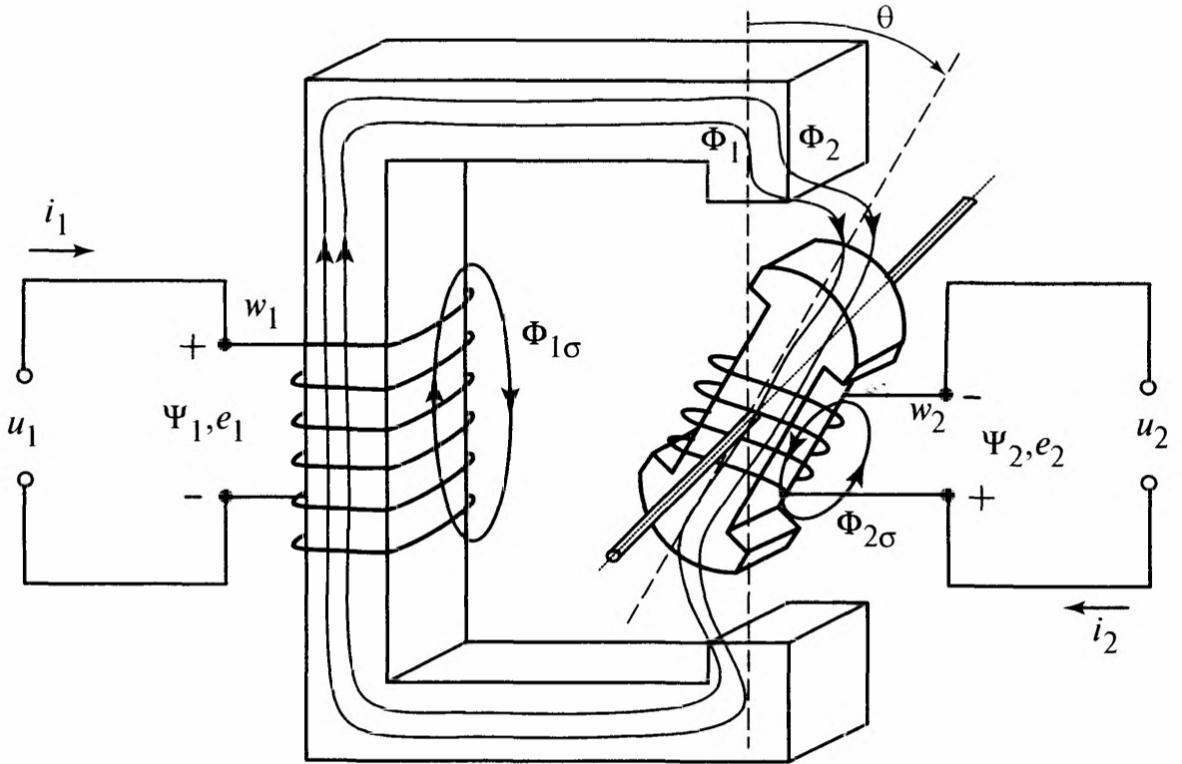


Рис. 1.1. Система с двумя обмотками

Приняв, как и прежде, что система линейна, определим индуктивности каждой обмотки L_{jk} как отношение k-го потока, сцепленного с j-й обмоткой, к k-му току в этой или другой обмотке:

$$\Psi_1 = L_{11}i_1 + L_{12}i_2;$$

$$\Psi_2 = L_{21}i_1 + L_{22}i_2.$$

$$dW_{\text{эм}} = i_1 d\Psi_1 + i_2 d\Psi_2 = i_1 d(L_{11}i_1 + L_{12}i_2) + i_2 d(L_{21}i_1 + L_{22}i_2)$$

$$W_{\text{поля}} = \frac{1}{2} L_{11}i_1^2 + \frac{1}{2} L_{22}i_2^2 + L_{12}i_1 i_2$$

$$\frac{1}{2} i_1^2 dL_{11} + i_1 i_2 dL_{12} + \frac{1}{2} i_2^2 dL_{22} = M d\theta \quad (1.6)$$

$$M = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{11}}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_{22}}{d\theta} \quad (1.7)$$

Обобщенная электрическая машина

В основу машины положена абстрактная электромагнитная конструкция с двухфазным явнополюсным статором и двухфазным неявнополюсным ротором. Было доказано, что любую n-фазную машину можно свести к двухфазной путем фазных преобразований.

Следует ввести новое понятие — электрический момент, то есть это момент приведенный к электрической скорости вращения двигателя (электрическая часть живет в своих координатах, а механическая часть в своих, и приводятся они друг к другу через число пар полюсов машины).

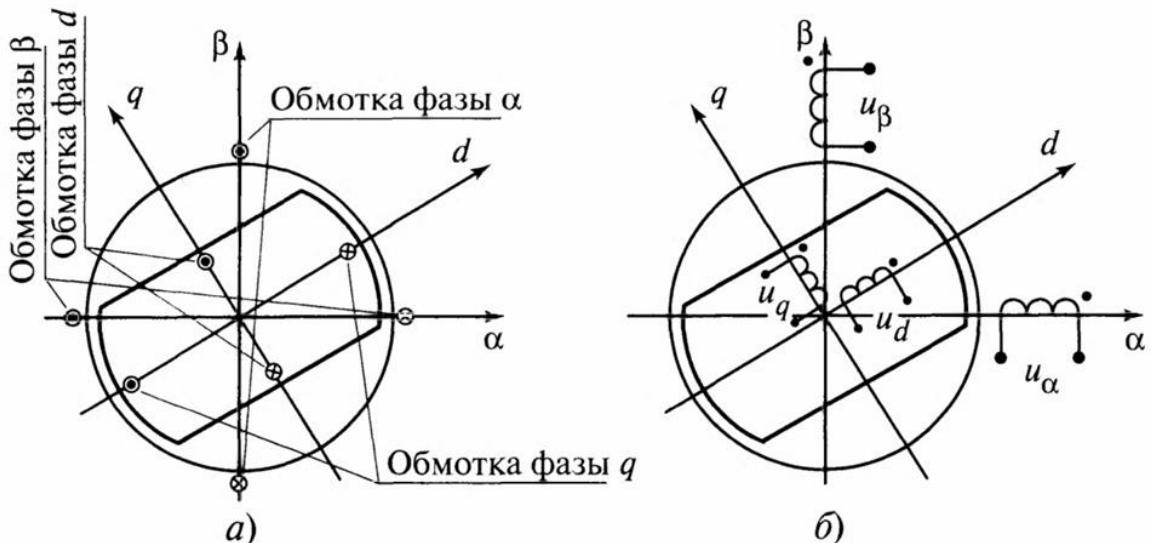


Рис. 1.2. Конструкция обобщенной электрической машины

Оси α, β связаны с неподвижным статором, на котором намотаны две ортогональные обмотки. Уравнения для обмоток:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha} &= i_{s\alpha} R_s + \frac{d\Psi_{sa}}{dt} \\ u_{s\beta} &= i_{s\beta} R_s + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} \end{aligned} \quad (1.8)$$

$u_{s\alpha}$ — напряжение статора фазы α ; $i_{s\alpha}$ — ток напряжение статора фазы α ; R_s — сопротивление обмоток статора; Ψ_{sa} — потокосцепление статора фазы α . Аналогично для характеристик статора фазы β .

Оси d, q связаны с положением ротора и его обмотками. Уравнения для этих обмоток:

$$\begin{aligned} u_{rd} &= i_{rd} R_r + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} \\ u_{rq} &= i_{rq} R_r + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Для момента $M_{\text{элек}}$, имеем

$$M_{\text{элек}} = \Psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{s\alpha} \quad (1.10)$$

Координатные преобразования

В ортогональных осях α, β формировались напряжения, токи и потокосцепления статора, а в осях d, q, повернутых относительно осей α, β на угол Θ , характеристики ротора

2. Модели типовых двигателей

Модель асинхронного двигателя на базе уравнений обобщенной электрической машины

Асинхронный двигатель питается со стороны статора. Его ротор сделаем короткозамкнутым. Тогда уравнения электрического равновесия обмоток запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha} &= i_{s\alpha} R_s + \frac{d\Psi_{sa}}{dt} \\ u_{s\beta} &= i_{s\beta} R_s + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} \\ 0 &= i_{rd} R_r + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} \\ 0 &= i_{rq} R_r + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Для токов имеем-

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Полученные токи записаны в неподвижных осях α, β . Чтобы их использовать в уравнениях (2.1) необходимо выполнить координатные преобразования из α, β в d, q. Для расчета падений напряжения на сопротивлениях обмоток, вектор токов следует перемножить на диагональную матрицу сопротивлений -

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

По формуле (1.10), которая использует имеющиеся потокосцепления статора и токи статора, можно рассчитать момент. Динамический момент,

определяющий темп изменения угловой частоты, рассчитывается как разность между моментом, развивающимся двигателем, и моментом сопротивления. Угловое положение ротора получается путем интегрирования угловой частоты. Его значение используется в координатных преобразованиях. Результирующая схема представлена на рис. 2.1.

Если на входы модели подать синусоидальное и косинусоидальное напряжения частотой 50 Гц и амплитудой 312 В ($220\sqrt{2}$ В), то двигатель будет вести себя как при питании от сети.

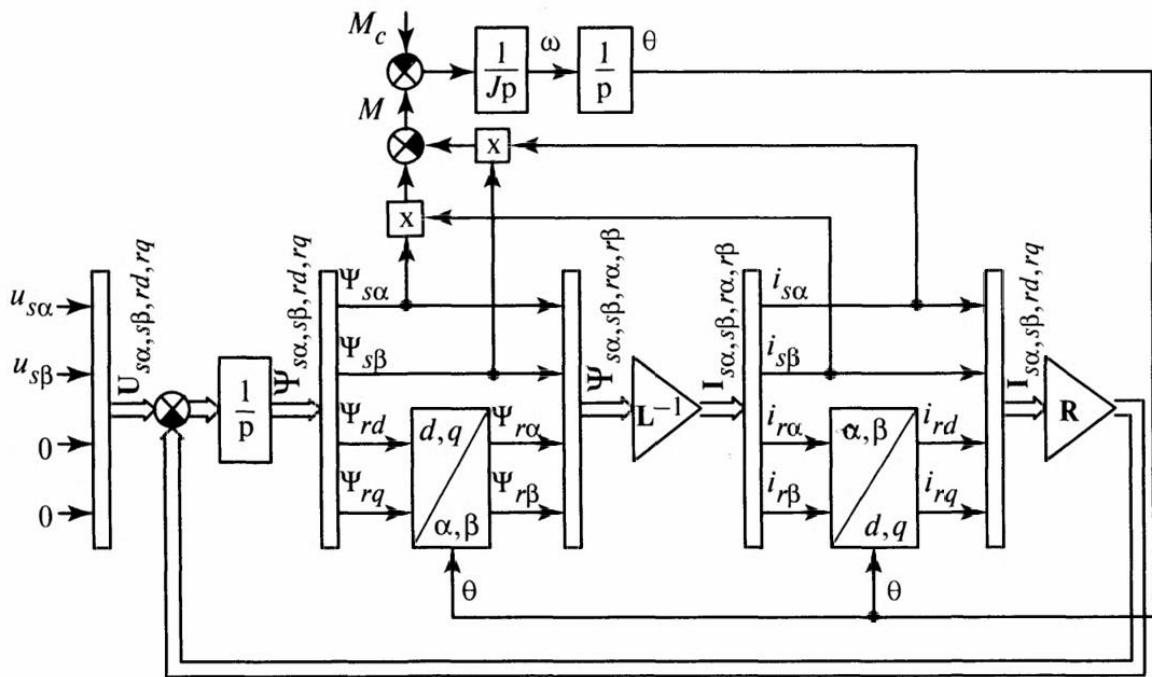


Рис.2.1. Модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Модель неявнополюсного синхронного двигателя с постоянными магнитами на базе уравнений обобщенной электрической машины

Неявнополюсная синхронная машина с постоянными магнитами имеет в уравнениях потокосцепления постоянную составляющую $\Psi_{\text{пп}}$. Ее можно учесть в потокосцеплениях статора, добавив к составляющим, формируемым током статора через собственные индуктивности, проекции вектора потокосцепления постоянного магнита на оси α и β :

$$\begin{aligned}\Psi_{s\alpha} &= L_s i_{s\alpha} + \Psi_{\text{пп}} \cos \theta; \\ \Psi_{s\beta} &= L_s i_{s\beta} + \Psi_{\text{пп}} \sin \theta.\end{aligned}\quad (2.3)$$

Уравнения равновесия статора соответствуют системе уравнений (2.1) или в форме Коши

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi_{sa}}{dt} &= u_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_s \\ \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} &= u_{s\beta} - i_{s\beta} R_s\end{aligned}\quad (2.4)$$

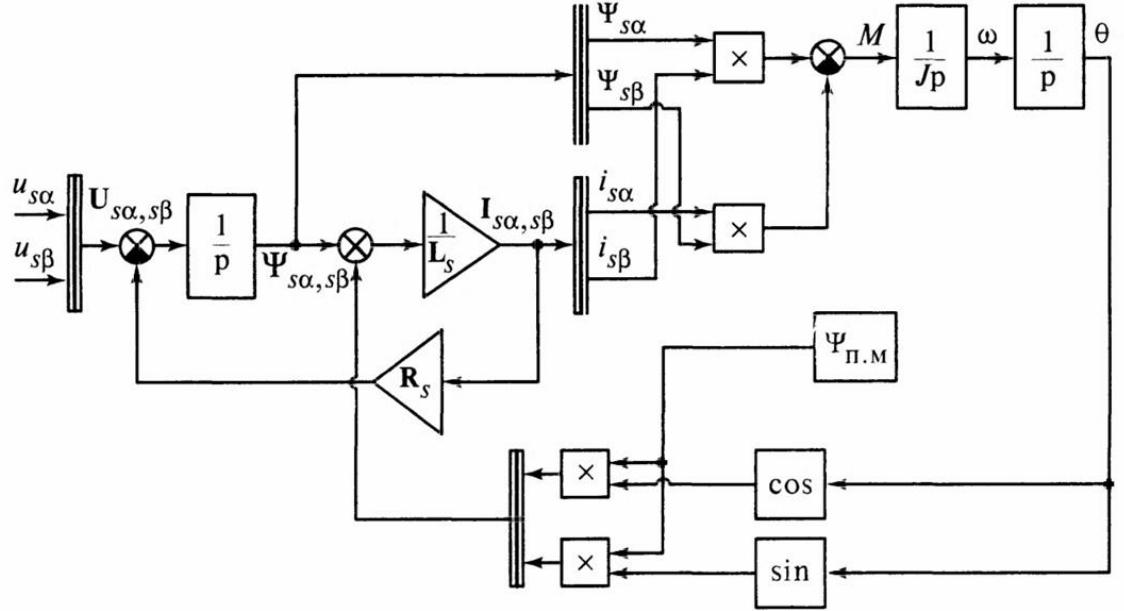


Рис.2.2. Модель синхронного неявнополюсного двигателя с постоянными магнитами

Модель двигателя постоянного тока независимого возбуждения на базе уравнений обобщенной электрической машины

Пусть обмоткой возбуждения выступает фаза β статора. Питание якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) будем осуществлять от преобразователя частоты, который будет выдавать напряжение на роторные обмотки обобщенной электрической машины так, чтобы вектор напряжения ротора всегда был на оси α . С учетом этих условий перепишем системы уравнений (2.1) -

$$\begin{aligned}u_{s\beta} &= i_{s\beta} R_s + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} \\ u_{r\alpha} &= i_{r\alpha} R_r + \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + \omega\Psi_{r\beta}\end{aligned}\quad (2.5)$$

В обозначениях для ДПТ НВ -

$$\begin{aligned}u_{o.b.} &= i_{o.b.} R_{o.b.} + \frac{di_{o.b.}}{dt} ; \\ u_\alpha &= i_\alpha R_\alpha + L_\alpha \frac{di_\alpha}{dt} + k\Phi\omega,\end{aligned}\quad (2.6)$$

где $k\Phi = L_m i_{\text{o.v.}}$ – коэффициент ЭДС, равный произведению потока Φ на конструктивный коэффициент двигателя k .

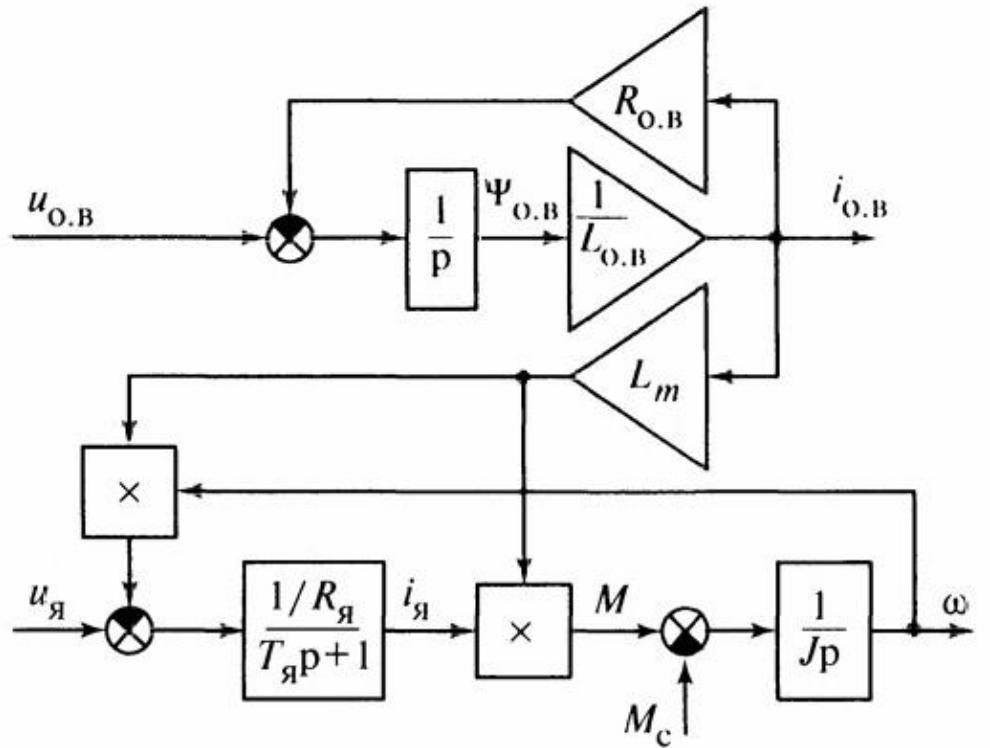


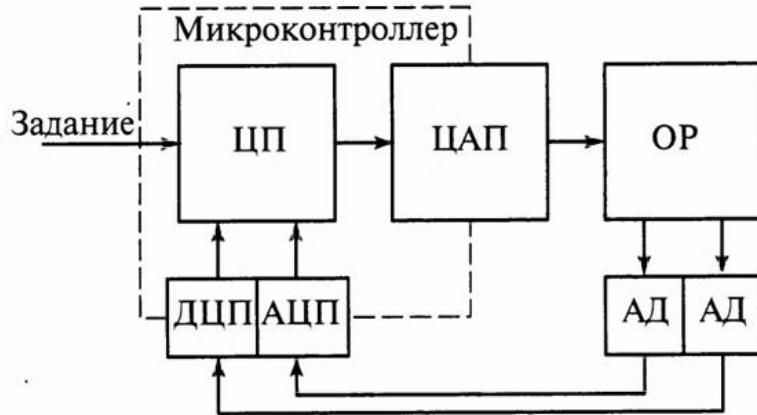
Рис.2.3. Модель двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Были рассмотрены подходы к получению уравнений произвольных электромеханических преобразователей энергии. При необходимости данный аппарат может быть применен для получения моделей других типов машин — постоянного тока смешанного и последовательного возбуждения, асинхронных с фазным ротором, огромного класса синхронных машин с регулируемым возбуждением или вентильно-индукторных.

3. Цифровые системы управления

3.1. Обобщенная структура цифровых систем управления

В общем виде структура цифровой системы управления представлена на рисунке.



В состав схемы входят: АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ДЦП — дискретно-цифровой преобразователь; ЦР — цифровой регулятор; ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь и ОР — объект регулирования, к которому подключены АД аналоговые датчики и ДД — дискретные датчики.

Объект регулирования имеет некоторое количество переменных состояния, доступных для измерения и организации обратных связей.

Обычно это токи и напряжения, которые измеряются аналоговыми датчиками (датчики тока и датчики напряжения), имеющие на выходе сигнал в виде тока или напряжения, пропорциональный измеряемому. Скорость может измеряться аналоговым тахогенератором, а положение с помощью импульсного или абсолютного кодового датчика положения, которые можно отнести к дискретным датчикам.

Сигналы с датчиков поступают на АЦП и на ДЦП. Для аналоговых сигналов может осуществляться предварительная подготовка сигнала, такая как преобразование «ток->напряжение», масштабирование, сдвиг относительно нуля и фильтрация. АЦП преобразует сигнал и получает его цифровое значение, обычно линейно связанное с измеряемой величиной. ДЦП служит для преобразования дискретных сигналов. Так, импульсы с инкрементального (квадратурного) датчика положения ротора двигателя преобразуются в цифровой код положения и т.д.

Цифровой регулятор анализирует поступающие коды и обеспечивает расчет задающего воздействия, необходимого для корректировки значений переменных состояния ОР, и подает результат на ЦАП. В качестве ЦАП выступает инвертор преобразователя частоты в обмотке двигателя. Например, широтно-импульсное напряжение прикладывается к обмоткам, являющимися фильтрующим звеном, а на выходе система получает непрерывную аналоговую переменную состояния - ток.

Цифровые системы управления строятся на базе микроконтроллеров, которые выпускает множество фирм. Для управления источниками питания и электродвигателями в настоящее время наиболее популярны изделия фирмы Texas Instruments. Микроконтроллер содержит вычислительное ядро, оперативную память, Flash-память программ, встроенный модуль АЦП на 5-20

каналов, встроенный широтно-импульсный генератор на 6-24 канала, модуль захвата событий и модуль квадратурного декодирования для подключения датчиков положения, модули для подключения внешней энергонезависимой памяти параметров, Flash-карт, клавиатур и дисплеев, модуль асинхронного коммуникационного интерфейса (RS-232, RS-485), модуль CAN-интерфейс а (промышленная информационная сеть реального времени), а в современных микроконтроллерах USB и Ethernet.

Микроконтроллеры удобно использовать для задач управления, так как они являются «системой на кристалле», т.е. пользователю необходимо только подвести питание, подключить кварцевый резонатор (в некоторых случаях можно обойтись LC-цепочкой, если нет особых требований к стабильности частоты работы) и установить драйверы интерфейсов. Драйвером в данном случае называется аппаратное устройство, согласующее уровни сигналов между выводами микроконтроллера и внешней аппаратной частью. В общем виде структура микроконтроллерной системы управления представлена на рисунке –



Аналоговые датчики

Рассмотрим датчики тока, напряжения и тахогенератор. Датчики тока служат для ввода информации по току, напряжения по напряжению, а тахогенератор — для определения текущей частоты вращения двигателя.

Датчики тока можно разделить на несколько основных видов: шунтовые; трансформаторы тока; на эффекте Холла; компенсационного типа на эффекте Холла.

Шунтовые датчики. Самый простой способ измерить ток - это поставить малое сопротивление в цепь, где необходимо провести измерение, и измерить напряжение на этом малом сопротивлении. Измерительные сопротивления $R_{ш}$, называются шунтами.