

ПРЕДИСЛОВИЕ

Опыт работы со студентами инженерных факультетов Санкт-Петербургского Государственного Аграрного университета (СПбГАУ) показывает, что наиболее трудными для понимания и усвоения являются взаимосвязанные физические явления и процессы электромеханического преобразования энергии, происходящие в электрических машинах и аппаратах, системах электрического привода. Поэтому основная задача автора заключалась в том, чтобы просто и ясно при умеренном объеме изложить материал по указанным вопросам — от физических основ электромеханического преобразования до устройства, режимов работы и эксплуатационных характеристик электрических машин.

В первой главе рассматриваются физические законы, баланс и запас энергии в электромеханических системах, природа и общие уравнения сил и моментов, выраженные посредством изменения энергии магнитного поля, индуктивности и магнитного сопротивления.

Вторая глава посвящена общим вопросам устройства, классификации и режимов работы электрических машин, потерь и нагревания, зависимости характеристик от главных размеров и электромагнитных нагрузок.

В третьей, четвертой и пятой главах описаны коллекторные машины постоянного тока, асинхронные и синхронные, наиболее широко применяемые в народном хозяйстве в качестве генераторов и двигателей. В приложениях приведены основные справочные данные по физике и электротехнике.

Пособие не претендует на то, чтобы стать заменой основополагающих учебников по электрическим машинам, однако оно может облегчить восприятие учебного материала, посвященного электромеханическому преобразованию энергии, характеристикам электрических машин.

При написании учебного пособия использовались основополагающие работы и учебники по электротехнике (В. Ф. Миткевич, Л. Р. Нейман, Л. А. Бессонов, К. А. Крут), электромеханике (Н. Шмидт, Д. Новотный, И. П. Копылов, В. В. Попов), электрическим машинам (М. П. Коценко, Л. М. Пиотровский, А. И. Вольдек, А. И. Важнов, В. В. Домбровский, Ю. Г. Шакарян), электроприводу (А. А. Булгаков, Н. Ф. Ильинский, В. А. Елисеев, М. Г. Чиликин).

ВВЕДЕНИЕ

Без электрической энергии нельзя представить современное промышленное и сельскохозяйственное производство, быт и в целом жизнь цивилизованного общества. Благодаря успехам электротехники стал возможен технический прогресс вообще и научно-техническая революция последнего времени. Широкое применение электрической энергии обусловлено возможностями ее производства, распределения, передачи на большие расстояния, управляемостью, а также высоким КПД преобразования в другие виды энергии.

Почти вся электроэнергия в мире вырабатывается электрическими машинами-генераторами, установленными на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях (в развитых странах вырабатывается до 20 000 кВт·ч и более электроэнергии в год на человека). Большая часть ($\approx 60 \div 70\%$) электрической энергии после распределения преобразуется в механическую также электрическими машинами — двигателями. Чтобы распределить и использовать выработанную энергию, необходимо иметь на каждую единицу установленной мощности на электрических станциях 5 \div 7 единиц мощностей трансформаторов. Необходимы, кроме того, различного рода электрические аппараты — коммутационные, управления, защиты, где в качестве привода используются также электромеханические преобразователи — электромагниты.

Самые крупные электрические машины — турбо- и гидрогенераторы, установленные на электростанциях, имеют мощность в одной единице до 500 \div 1200 МВт, а самые маленькие — до нескольких милливатт. Самые

быстроходные электродвигатели имеют частоту вращения до 300 тыс. об/мин, а тихоходные — несколько оборотов в сутки и меньше. КПД электрических машин достигает 98,5%, а использование материалов до 2 кВт/кг и более.

Несмотря на большое разнообразие электромеханических преобразователей по назначению и конструктивному исполнению, их объединяет общее — единый механизм преобразования электрической энергии в механическую или наоборот. Это преобразование осуществляется на основе фундаментальных физических законов и описывается сходными уравнениями.

История электромеханики начинается с открытия М. Фарадея, который в 1821 г. преобразовал электрическую энергию в механическую, а в 1831 г. открыл закон электромагнитной индукции. В 1834 г. русский ученый Б. С. Якоби создал электродвигатель мощностью 1 кВт и применил его для привода гребного винта катера, который мог везти 14 пассажиров против течения реки Невы. Это было первое практическое применение электрической машины. В 1860–1870 гг. созданы первые промышленные генераторы постоянного тока, а в 1873 г. — машина переменного тока (В. Сименс). Братья Гопкинсоны сформулировали закон магнитной цепи и в 1884 г. предложили трансформатор с замкнутым сердечником. В 1888 г. М. О. Доливо-Добровольский предложил систему трехфазного тока, а в 1889 г. создал асинхронный электродвигатель. В том же году под его руководством была создана электропередача переменного тока напряжением 15 кВ длиной 175 км. Тогда же появляется и синхронный генератор.

В дальнейшем с конца XIX в. идет быстрое наращивание мощностей электростанций, качественное улучшение всего электрооборудования, интенсификация процессов производства и передачи электроэнергии, расширение сфер использования электрической энергии. Особенно расширяются сферы использования электропривода на основе новой полупроводниковой техники и постоянных магнитов с высокими энергетическими показателями.

Машины постоянного тока используются главным образом в качестве двигателей из-за благоприятных характеристик и высокой перегрузочной способности в системах регулируемого электропривода (электротранспорт,

прокатные станы, гребные двигатели судов мощностью до 10 000 кВт) и др. Генераторы выпускаются на небольшие мощности и применяются иногда в качестве источников автономного питания, например для питания обмоток возбуждения тяговых двигателей последовательного возбуждения в тормозных режимах.

Асинхронные машины в большинстве своем нашли применение как двигатели в системах электропривода, нерегулируемого и регулируемого, при питании через преобразователь частоты. В качестве генераторов небольшой мощности асинхронные машины применяются в ветроустановках. Кроме того, в генераторном режиме асинхронные двигатели могут работать при торможении электроприводов.

Синхронные генераторы сравнительно небольшой мощности — от десятков до нескольких тысяч киловатт — достаточно широко применяются в системах автономного электроснабжения (дизель-генераторы, газотурбогенераторы), на котельных для лучшего использования оборудования, в качестве промежуточного звена в электротрансмиссиях тепловозов, судов, большегрузных самосвалов, строительной техники по схеме: дизель — синхронный генератор — выпрямитель — тяговый двигатель постоянного тока.

Синхронные двигатели мощностью более 100 ÷ 200 кВт успешно конкурируют с асинхронными в системах нерегулируемого электропривода при частотах вращения от 250 об/мин.

Управляемые синхронные двигатели (вентильные машины) находят все большее применение в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, в быту. Особенно резко увеличилось их использование с разработкой высокоэнергетических и относительно дешевых постоянных магнитов (Nd—Fe—B). В сочетании с полупроводниковыми полностью управляемыми преобразователями такие машины вне конкуренции по экономичности, компактности (степени миниатюризации) и надежности в авиации, автомобилестроении, приборостроении, приводах мотор-колесо различных мелких транспортных средств. Сфера их применения и диапазон мощностей неуклонно расширяются.

В целом научно-технический прогресс в электромашиностроении во многом определяет уровень развития других отраслей науки и техники.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Электромеханика изучает взаимодействие электрических и механических систем, т. е. процессы преобразования энергии — электрической в механическую или наоборот — механической в электрическую. Сами устройства, осуществляющие такие преобразования, называют электромеханическими преобразователями (ЭМП) энергии. Математически процессы преобразования описываются уравнениями электрических цепей и законов механики. Однако процесс преобразования невозможен без участия магнитного поля как промежуточного вида энергии. Другими словами, электромеханическое преобразование энергии представляется взаимосвязанными электрическими, магнитными и механическими явлениями.

Поэтому наиболее общий подход к решению задач электромеханики состоит в использовании уравнений электромагнитного поля (Максвелла), однако их анализ достаточно сложен, особенно для студентов при изучении и понимании физических основ электромеханического преобразования энергии.

Наиболее практическим, в то же время достаточно точным методом решения задач электромеханики является метод анализа электрических и магнитных цепей с сосредоточенными параметрами, которые, в свою очередь, могут зависеть от механических координат — перемещения, скорости. При этом сам электромеханический преобразователь (ЭМП) рассматривается как совокупность токо- и магнитопроводов, т. е. электрических и магнит-

ных цепей. Вследствие малых скоростей протекания физических процессов и низких частот изменения величин в ЭМП, динамические уравнения движения зачастую возможно формулировать на основе статических параметров, определяемых из опыта или путем расчетов. При этом параметры и режимы электрической цепи во многом определяют состояние магнитных процессов и наоборот, т. е. они, эти цепи, являются взаимообусловленными. Кроме того, уравнения механического движения содержат члены, являющиеся функциями электрических и магнитных величин.

1.1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Основными физическими законами, устанавливающими связи между электрическими, магнитными и механическими величинами, являются законы электромагнитной индукции и электромагнитного взаимодействия.

Закон электромагнитной индукции определяет процесс наведения ЭДС в контурах или проводниках, находящихся в магнитном поле. Индуцированная (наведенная) ЭДС количественно равна скорости изменения потокосцепления (формулировка Максвелла) [3, 5].

$$e = -d\psi/dt. \quad (1.1)$$

ЭДС может возникать как в неподвижном контуре при изменении во времени сцепленного с ним потока (рис. 1.1, а), так и при движении контура (или проводника)

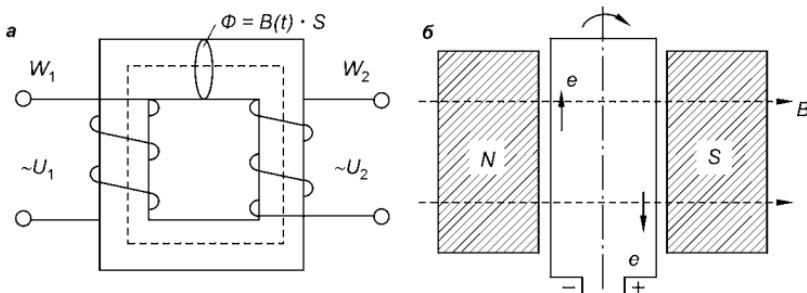


Рис. 1.1
К закону электромагнитной индукции

в магнитном поле (см. рис. 1.1, б). В общем случае могут иметь место оба вида изменения потокосцепления

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial t} dt + \frac{\partial \psi}{\partial x} dx, \quad (1.2.)$$

а наведенная ЭДС

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\left(\frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} \right) = -\left(\frac{d\psi}{dt} + v \frac{d\psi}{dx} \right), \quad (1.3)$$

где $v = dx/dt$ — относительная скорость движения контура в магнитном поле.

Первый член (1.3), $d\psi/dt$, представляет ЭДС пульсации (или трансформации), второй, $v d\psi/dx$ — ЭДС движения (или вращения).

В трансформаторах встречается только ЭДС трансформации (см. рис. 1.1, а), а в электрических машинах, главным образом, ЭДС движения (см. рис. 1.1, б).

Для трансформатора ($v = 0$), если поток в сердечнике $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$, то мгновенное значение ЭДС

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d(\Phi \cdot w)}{dt} = \omega \cdot w \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t = E_m \cdot \cos \omega t, \quad (1.4)$$

где $E_m = 2\pi f \cdot w \cdot \Phi_m$ — амплитудное значение.

Действующее значение

$$E = E_m / \sqrt{2} = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_m, \quad (1.5)$$

где $\Phi = B_m \cdot S$; B_m — амплитудное значение магнитной индукции в сердечнике, $B_m = 1,4 \div 1,6$ Тл; S — площадь поперечного сечения; w — число витков обмотки.

Для электрических машин, когда стороны катушек находятся под разными полюсами N и S (см. рис. 1.1, б), ЭДС катушки при $w = 1$

$$e = d\Phi/dt = 2Blv, \quad (1.6)$$

где $d\Phi = Bldx = Blvdt$.

Для одного проводника, движущегося в магнитном поле при взаимно перпендикулярных направлениях B , l , v , закон электромагнитной индукции (формулировка Фарадея)

$$e = Blv. \quad (1.7)$$

Эту ЭДС можно представить как результат пересечения проводником линий магнитного поля [5], а ее направление определяется по правилу правой руки (рис. 1.2, а).

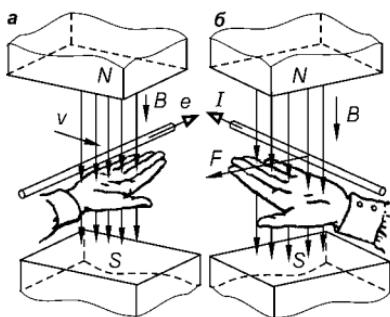


Рис. 1.2
Определение
направления ЭДС (а)
и силы взаимодействия (б)

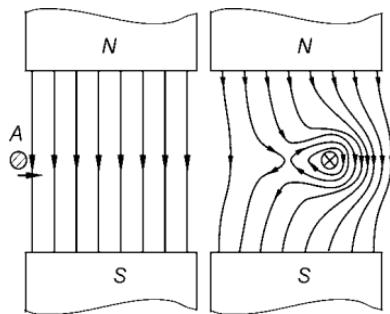


Рис. 1.3
Картина взаимодействия
магнитного поля и проводника
с током

Закон электромагнитных сил (закон Ампера) выражает связь между магнитным полем B , током I в проводнике длиной l и действующей на проводник силой $F_{\text{эм}}$

$$d\bar{F}_{\text{эм}} = I [d\bar{l} \cdot \bar{B}], \quad \bar{F}_{\text{эм}} = \int_l I [d\bar{l} \bar{B}]. \quad (1.8)$$

В случае однородного поля и взаимной перпендикулярности \bar{B} , $d\bar{l}$.

$$F_{\text{эм}} = BlI. \quad (1.9)$$

Направление силы определяется по правилу левой руки (рис. 1.2, б) или исходя из физических представлений о взаимодействии магнитных полей [5] (рис. 1.3). При этом в результате наложения двух магнитных полей — внешнего B и поля проводника, суммарное поле деформируется так, что с одной стороны от проводника оно ослабляется, а с другой усиливается. Сила будет действовать (рис. 1.3) справа налево так, что она стремится вытолкнуть проводник, а поле сделать однородным (тяжение магнитных линий, разность магнитных давлений по [5]).

Умножим (1.7) на I , а (1.9) на v . Получим

$$\left. \begin{aligned} eI &= BlvI, \\ Fv &= BlvI. \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

Видно, что электрическая (eI) и механическая (Fv) мощности определяются через одни и те же величины — B , l , v , I . Эти соотношения и определяют физическую сущность электромеханического преобразования энергии, т. е. взаимное влияние электрической (eI), магнитной (B) и механической (Fv) частей системы. При этом

магнитное поле выступает в качестве энергоносителя, т. е. посредника (или «рабочего тела» подобно пару в паросиловых установках), а само значение индукции (магнитного поля) определяет эффективность преобразования.

В разряд основных следует отнести и закон магнитной цепи. Само понятие «магнитная цепь» во многом условно, т. к. магнитная проницаемость ферромагнитных участков, определяющая способность проводить магнитный поток (магнитную проводимость), больше проницаемости немагнитных материалов (μ_0) в $100 \div 10\,000$ раз, в зависимости от типа материала и уровня насыщения ($\mu_r = \mu_{Fe}/\mu_0 = 100 \div 10\,000$). Следовательно, для магнитного потока нет изоляторов (для цепи электрической отношение удельных электропроводностей проводников и изоляторов $\gamma_{pr}/\gamma_{iz} \approx 10^{16}$). Поэтому законы Ома и Кирхгофа для магнитной цепи имеют лишь формальное сходство с законами для цепи электрической, отличаясь принципиально соотношением магнитных проницаемостей.

В ЭМП стальные элементы (участки) формируют и локализуют магнитный поток, проводя его через немагнитный зазор, причем на каждом из них напряженность магнитного поля H с достаточной точностью можно считать постоянной, а закон полного тока представляется в виде конечной суммы

$$\oint_l \bar{H} d\bar{l} = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + \dots + H_n \cdot l_n = \sum I, \quad (1.11)$$

где $H_1 \cdot l_1, H_2 \cdot l_2 \dots$ — магнитодвижущие силы участков; $\sum I = wI = F$ — намагничивающая сила катушки (обмотки).

Магнитная индукция, поток и магнитное сопротивление

$$B = \mu H, \quad \Phi = B \cdot S = \frac{F}{\sum_{i=1}^n R_{\mu_i}}, \quad R_{\mu_i} = \frac{l_i}{\mu_i \cdot S_i}, \quad (1.12)$$

где l_i, S_i — длина средней магнитной линии участка и площадь его поперечного сечения соответственно.

Расчеты магнитных цепей ведутся аналогично расчетам электрических цепей (рис. 1.4) с использованием следующих формальных аналогий (табл. 1.1)

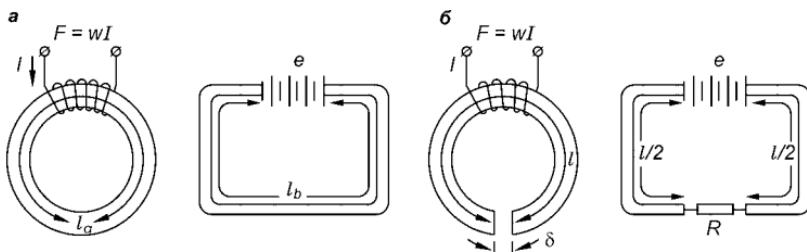


Рис. 1.4
Аналогии магнитной (а) и электрической (б) цепей

Таблица 1.1

Аналогии магнитной и электрической цепей

Цепь электрическая	R_s , Ом	I , А	U , В	J , А/м ²	E , В/м	γ , См/м
Цепь магнитная	R_μ , А/Вб	Φ , Вб	F , А	B , Тл	H , А/м	μ , Гн/м

ПРИМЕР. Катушка намотана на ферромагнитный сердечник с зазором $\delta = 5$ мм. Площадь поперечного сечения сердечника $S = 100$ см², длина средней линии индукции $l = 50$ см. Число витков катушки $w = 500$, ток $I = 6$ А. Определить магнитный поток, индукцию, напряженность магнитного поля, если: а) $\mu_{Fe} \gg \mu_0$; б) $\mu_{Fe} = 100\mu_0$.

Решение. Магнитные поток и индукция

$$\Phi = \frac{F}{R_\mu}, \quad B = \frac{\Phi}{S}, \quad H = \frac{B}{\mu}.$$

а) магнитное сопротивление при $\mu_{Fe} \gg \mu_0$

$$R_\mu = R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 10^{-4}} = 4 \cdot 10^5 \text{ А/Вб.}$$

Намагничающая сила

$$F = I \cdot w = 6 \cdot 500 = 3000 \text{ А.}$$

Магнитные поток и индукция

$$\Phi = \frac{F}{R_\delta} = \frac{3000}{4 \cdot 10^5} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}; \quad B = \frac{\Phi}{S} = \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-4}} = 0,75 \text{ Тл};$$

$$H_\delta = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,75}{12,56 \cdot 10^{-7}} = 6 \cdot 10^5 \text{ А/м}; \quad H_{Fe} = 0.$$

б) магнитное сопротивление сердечника при $\mu_{Fe} = 100\mu_0$

$$R_{\mu_{Fe}} = \frac{l}{\mu_{Fe} \cdot S} = \frac{50 \cdot 10^{-2}}{100 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 4 \cdot 10^5 \text{ А/Вб};$$

$$\Phi = \frac{F}{R_{\mu_{Fe}} + R_\delta} = \frac{3000}{8 \cdot 10^5} = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ Вб};$$

$$B = 0,375 \text{ Тл}; H_\delta = 3 \cdot 10^5 \text{ А/м}; H_{Fe} = 3 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

1.2. БАЛАНС ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

При перемещении подвижных частей ЭМП — якоря электромагнита контактора (рис. 1.5) или ротора электродвигателя [18] (рис. 1.6, вентильный реактивный двигатель — ВРД) происходит обмен энергией между электрической цепью, механической системой и магнитным полем.

Потребляемый обмоткой из сети ток создает магнитный поток, замыкающийся через ферромагнитные элементы и зазор δ . Якорь электромагнита притягивается

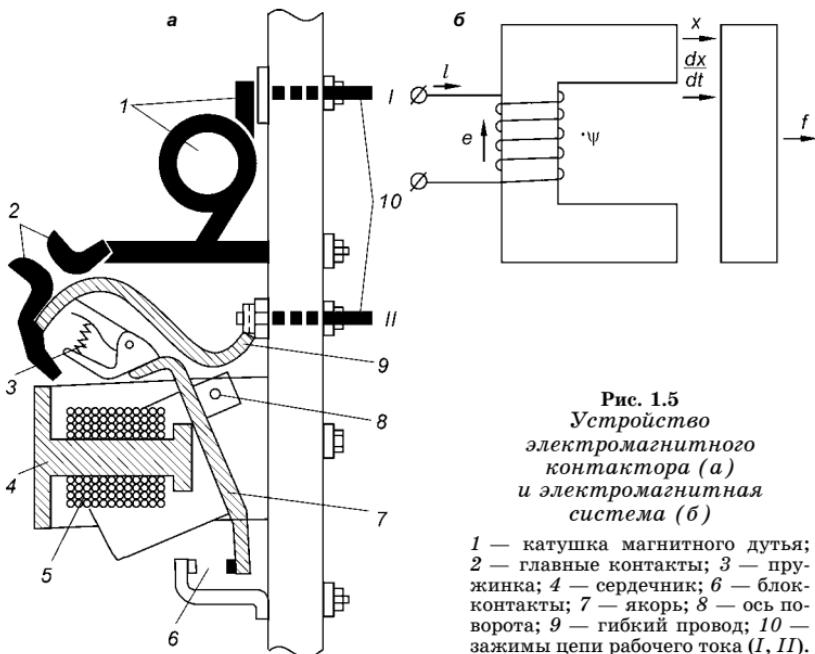


Рис. 1.5
Устройство
электромагнитного
контактора (а)
и электромагнитная
система (б)

1 — катушка магнитного дутья;
2 — главные контакты; 3 — пружинка;
4 — сердечник; 6 — блок-контакты;
7 — якорь; 8 — ось поворота;
9 — гибкий провод; 10 — зажимы цепи рабочего тока (I, II).

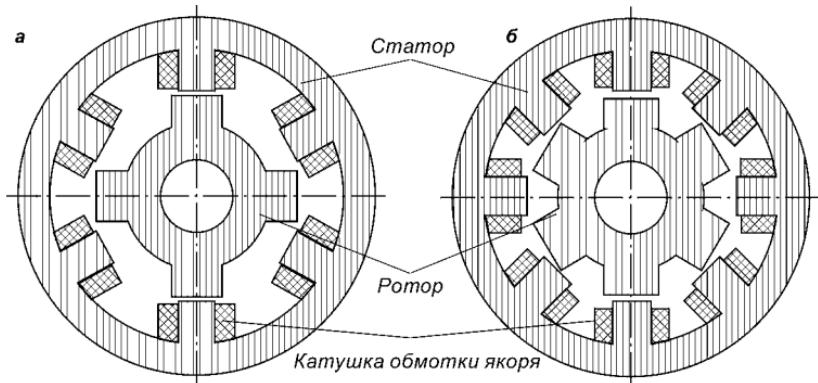


Рис. 1.6

Устройство магнитной системы вентильного реактивного двигателя с сочетанием числа полюсов статора и ротора 6/4 (а) и 8/6 (б)

(выбирается зазор), ротор ВРД поворачивается на некоторый угол, при этом изменяются потокосцепление ψ обмотки и ее индуктивность $L = w^2/R_\mu$, магнитное сопротивление $R_\mu = R_{\mu Fe} + R_{\mu \delta}$. Из сети потребляется электрическая энергия ΔW_e , за счет которой совершается механическая работа ΔW_m , а энергия поля изменяется на величину ΔW_f . Уравнение баланса связывает основные виды изменения энергии в системе (без учета потерь в токо- и магнитопроводах)

$$\Delta W_e = \Delta W_f + \Delta W_m. \quad (1.13)$$

При этом за положительные принимаются: изменение электрической энергии ΔW_e , если она отдается электромагнитному полю; механической энергии ΔW_m , если электромагнитная энергия преобразуется в механическую (двигатели); энергии магнитного поля ΔW_f , если ее запас увеличивается.

Из (1.13) видно, что если электрическая энергия превышает энергию поля, то часть ее переходит в механическую. Кроме того, видна и роль энергии поля как промежуточного вида энергии в процессе преобразования. Таким образом, упрощенно процесс преобразования электрической энергии в механическую можно представить так: электрическая сеть постоянно пополняет запас энергии в магнитном поле, а механическая работа производится за счет ее изменения. В электромагнитах этот процесс носит релейный характер (срабатывание),

а в электрических машинах — непрерывное преобразование. Наиболее важным выводом из (1.13) является то, что механическая работа может быть выражена через две электрические величины — ψ или i и механическую — x .

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_m(i, x) &= \Delta W_e(i, x) - \Delta W_f(i, x), \\ \Delta W_m(\psi, x) &= \Delta W_e(\psi, x) - \Delta W_f(\psi, x). \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

Средняя сила, действующая на якорь на пути Δx (см. рис. 1.5)

$$\left. \begin{aligned} f_{cp} &= \frac{\Delta W_m}{\Delta x}, \\ f_{cp}(i, x) &= \frac{\Delta W_e(i, x)}{\Delta x} - \frac{\Delta W_f(i, x)}{\Delta x}, \\ f_{cp}(\psi, x) &= \frac{\Delta W_e(\psi, x)}{\Delta x} - \frac{\Delta W_f(\psi, x)}{\Delta x}. \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Можно заключить, что запас энергии в электромеханических системах индуктивного типа связан с магнитными полями, создаваемыми в устройстве, а механические силы и ЭДС — со способностью системы изменять запасенное в ней количество энергии. При этом сила (момент) рассчитываются исходя из электрической энергии и энергии поля.

1.3. ЗАПАС ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В общем случае запасенная энергия выражается через ее плотность в энергетическом поле. В большинстве же практических случаев, когда анализируется работа (характеристики) существующей системы, наибольший интерес представляют зависимости между входными и выходными величинами — током, напряжением с одной стороны, силой и перемещением — с другой. Задача эта достаточно сложная вследствие характеристик используемых материалов — нелинейности, гистерезиса, вихревых токов. Для линейных систем анализ может быть выполнен относительно просто и строго, являясь в то же время первым количественным приближением и основой для понимания физических процессов преобразования энер-

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru