

ПРЕДИСЛОВИЕ

Опыт работы со студентами инженерных факультетов Санкт-Петербургского государственного аграрного университета показал, что наиболее трудными для понимания являются взаимосвязанные физические явления и процессы электромеханического преобразования энергии, происходящие в электрических машинах и системах электрического привода. Поэтому основная задача автора заключалась в том, чтобы по возможности доступно и физично при умеренном объеме изложить материал по электромеханическому преобразованию энергии — от физических основ до устройства, режимов работы и эксплуатационных характеристик электрических машин постоянного и переменного тока.

Первая глава посвящена физическим основам электромеханического преобразования энергии. В ней рассматриваются законы электротехники применительно к электрическим машинам, роль магнитного поля в процессах преобразования, общие уравнения сил и моментов, выраженные через изменение энергии магнитного поля, индуктивности и магнитного сопротивления, условия непрерывного преобразования.

Вторая глава является логическим продолжением первой и включает описание общих вопросов устройства, принципа действия и режимов работы, потерь и нагревания электрических машин, зависимости их характеристик от главных размеров и электромагнитных нагрузок. Приводятся общие выражения электромагнитного момента в различных формах.

Разделы 3, 4, 5, 6 содержат материал, традиционный для учебников по электрическим машинам, посвященный трансформаторам, асинхронным машинам, синхронным и машинам постоянного тока.

Вышедшее в 2004 г. учебное пособие «Электромеханические преобразователи энергии» вошло в книгу составной частью, с изменениями и дополнениями, касающимися в основном асинхронных машин.

В приложениях приведены основные справочные данные по физике и электротехнике, необходимые при решении практических задач.

При написании книги использовались работы и учебники по электротехнике (В. Ф. Миткевич, Л. Р. Нейман, П. Л. Калантаров, Л. А. Бессонов, К. А. Круг), электромеханике (Н. Шмитц, Д. Новотный, И. П. Копылов, В. В. Попов), электрическим машинам (П. П. Костенко, Л. М. Пиотровский, А. И. Вольдек, А. И. Важнов, В. В. Домбровский, Ю. Г. Шакарян, Б. В. Сидельников, И. П. Копылов), электроприводу (А. А. Булгаков, Н. Ф. Ильинский, В. А. Елисеев, М. Г. Чиликин, Ю. А. Сабинин, С. А. Ковчин, И. Я. Браславский), а также статьи и монографии по специальным машинам.

Замечания и пожелания с благодарностью будут приняты по адресу: 196608, Санкт-Петербург–Пушкин, Петербургское ш., д. 2, СПбГАУ.

автор

ВВЕДЕНИЕ

Без электрической энергии нельзя представить современное промышленное и сельскохозяйственное производство, было 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 выработка электроэнергии составляет 20 000 кВт · ч и более 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 на электрических станциях, необходимо иметь на каждую единицу установленной мощности генераторов $5 \div 7$ единиц мощностей трансформаторов. Необходимы, кроме того, различного рода электрические аппараты — коммутационные, управления, защиты, в которых 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 200 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, механизм преобразования электрической энергии в механическую (и наоборот) для них является общим. Это преобразование осуществляется на основе фундаментальных физических законов и описывается уравнениями электромеханики.

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 появился и синхронный генератор.

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 области 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, выпускаемые на небольшие мощности, применяются иногда в качестве источников автономного питания, например, для питания обмоток возбуждения тяговых двигателей последовательного возбуждения в тормозных режимах.

Асинхронные машины основное применение нашли как двигатели в системах нерегулируемого и регулируемого электроприви-

вода, 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), в 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 $100 \div 200$ 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 после разработки высокоэнергетических и относительно дешевых постоянных магнитов (Nd—Fe—B). В сочетании с полупроводниковыми полностью управляемыми преобразователями такие машины не имеют конкуренции по экономичности, компактности (степени миниатюризации) и надежности в авиации, автомобилестроении, приборостроении, приводах мотор—колес различных мелких транспортных средств. Сфера их применения и диапазон мощностей неуклонно расширяются.

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

Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Электромеханика изучает взаимодействие электрических и механических систем, т. е. процессы преобразования энергии — электрической в механическую и 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 представляет собой взаимосвязанные электрические, магнитные и механические явления.

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

Наиболее практическим и 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 рассматривается как совокупность токо- и магнитопроводов, т. е. электрических и магнитных 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 элек-

трической цепи во многом определяют состояние магнитных процессов и, наоборот, т. е. 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) в магнитном поле (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 и магнитного поля.

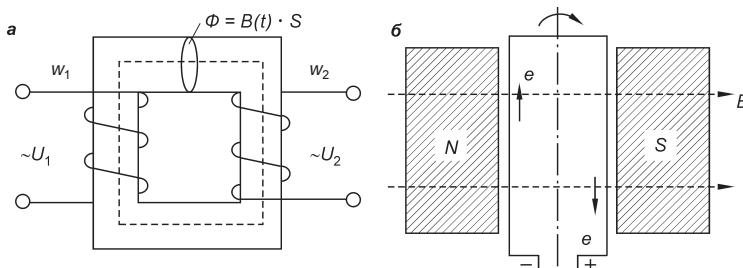


Рис. 1.1
К закону электромагнитной индукции

Первый член (1.3), $d\psi/dt$, представляет ЭДС пульсации (или трансформации), второй, $vd\psi/dt$ — 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 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, то мгновенное значение ЭДС

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

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

Действующее значение

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

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

Для электрических машин, когда стороны катушек находятся под разными полюсами N и S (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*).

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

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

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

$$\bar{F}_{\text{эм}} = BlI. \quad (1.9)$$

Направление силы определяется по правилу левой руки (рис. 1.2, *б*) или исходя из физических представлений о взаимо-

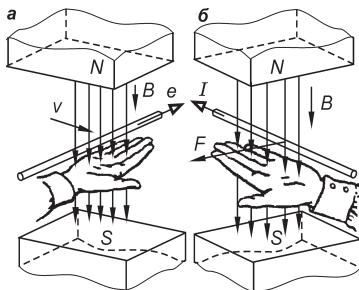


Рис. 1.2

Определение направления ЭДС (а) и силы взаимодействия (б)

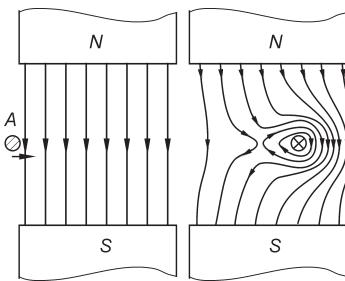


Рис. 1.3

Картина взаимодействия магнитного поля и проводника с током

действии 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 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 энергосителя, 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, так как 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 изолаторов (для цепи электрической отношение удельных электропроводностей проводников и изолаторов $\gamma_{pr}/\gamma_{iz} \approx 10^{16}$). Поэтому законы Ома и Кирхгофа для магнитной цепи

имеют лишь формальное сходство с цепью 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

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

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

Магнитная индукция, поток и магнитное сопротивление

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

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).

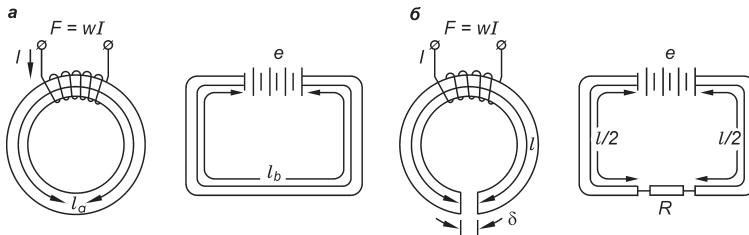


Рис. 1.4
Аналогии магнитной (а) и электрической (б) цепей

Таблица 1.1

Аналогии магнитной и электрической цепей

Цепь электрическая	R_s, Ω	I, A	U, V	$J, A/m^2$	$E, B/m$	$\gamma, Cm/m$
Цепь магнитная	$R_{\mu}, A/B$	Φ, B	F, A	B, Tl	$H, A/m$	$\mu, Gm/m$

Пример. Катушка намотана на ферромагнитный сердечник с зазором $\delta = 5$ мм. Площадь поперечного сечения сердечника $S = 100 \text{ см}^2$, длина средней линии индукции $l = 50 \text{ см}$. Число витков катушки $w = 500$, ток $I = 6 \text{ А}$. Определить маг-

нитный 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 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$

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

Намагничивающая сила

$$F = Iw = 6 \cdot 500 = 3000 \text{ A.}$$

Магнитные поток и индукция

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

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

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

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

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

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

1.2. БАЛАНС ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

При перемещении подвижных частей ЭМП — якоря электромагнитного контактора (см. рис. 1.5) или ротора электродвигателя [18] (см. рис. 1.6) 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 (выбирается зазор), ротор вентильного реактивного двигателя (ВРД) поворачивается на некоторый угол, при этом изменяются потокосцепление обмотки ψ 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

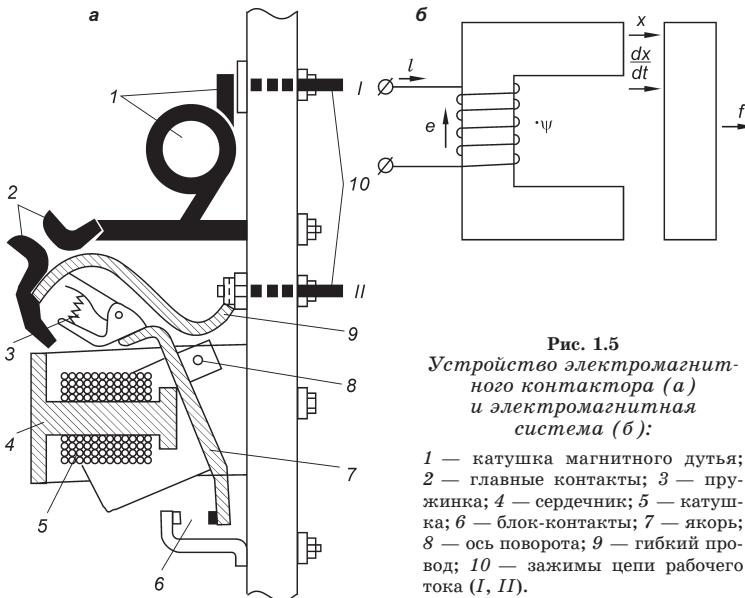


Рис. 1.5
Устройство электромагнитного контактора (а)
и электромагнитная система (б):

1 — катушка магнитного дутья;
2 — главные контакты; 3 — пружина;
4 — сердечник; 5 — катушка;
6 — блок-контакты; 7 — якорь;
8 — ось поворота; 9 — гибкий провод;
10 — зажимы цепи рабочего тока (I, II).

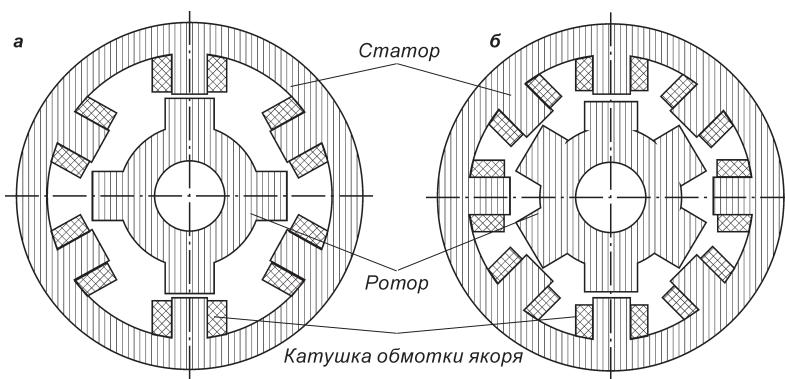


Рис. 1.6
Устройство магнитной системы вентильного реактивного двигателя
с сочетанием числа полюсов статора и ротора 6/4 (а) и 8/6 (б)

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 изменения 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 выражения (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 выражения (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 (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 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) рассчитывается 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,

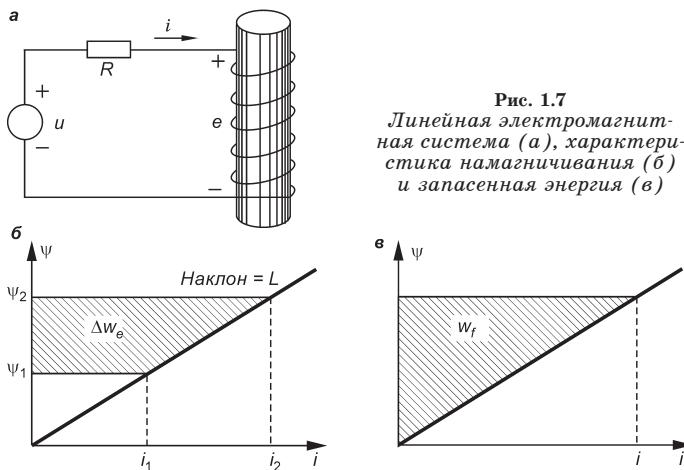


Рис. 1.7
Линейная электромагнитная система (а), характеристика намагничивания (б) и запасенная энергия (в)

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 энергии. Кроме того, электромеханические устройства представляют собой, как правило, катушки на ферромагнитных сердечниках с зазором, поэтому их анализ зачастую ведется при допущении $\mu_{\text{Fe}} \gg \mu_0$, а насыщение учитывается отдельно. В некоторых случаях используют кусочно-линейную аппроксимацию характеристики намагничивания. В реальных системах гистерезис играет незначительную роль, а влияние вихревых токов снижается выполнением сердечников из тонкой листовой стали.

Итак, соотношение между током в катушке (возбуждающим сигналом) и ее потокосцеплением (реакцией) в системе по рис. 1.7, а линейное.

Задача: определить энергию, потребляемую катушкой при увеличении тока в ней до некоторой величины.

Уравнение напряжений (2-й закон Кирхгофа)

$$u = iR + e, \quad (1.16)$$

где R — активное сопротивление катушки; e — наведенная ЭДС; i — ток.

Умножим обе части равенства на i и определим полную энергию, поступающую от источника за интервал времени $dt = t_2 - t_1$,

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru