

ПРЕДИСЛОВИЕ

Опыт работы со студентами инженерных факультетов показал, 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 авторов заключалась в том, чтобы по возможности просто и в умеренном объеме изложить указанные вопросы — от физических основ электромеханического преобразования энергии до устройства, режимов работы и эксплуатационных характеристик электрических машин.

Первая глава посвящена физическим основам электромеханического преобразования энергии. Рассмотрены основные законы, лежащие в основе работы любого электромеханического преобразователя, начиная с простейшего (электромагнит контактора) и заканчивая электрическими машинами; природа и общие уравнения ЭДС, сил и моментов через изменение по координате энергии магнитного поля, индуктивности и магнитного сопротивления; условия непрерывного преобразования энергии.

Вторая глава во многом является логическим продолжением первой. Здесь описываются общие вопросы принципа действия и устройства электрических машин различных типов, режимы их работы, потери и нагревание, зависимость характеристик от главных размеров и электромагнитных нагрузок. Приводятся общие выражения электромагнитного момента в различных формах. Эта часть учебника, по сути, является основой курса «Введение в электромеханику» (раздел I), который логически связан как единое целое с дисциплиной «Электрические машины».

Главы 3, 4, 5, 6, 7 и 8 содержат традиционный для учебников по электрическим машинам материал: трансформаторы, общие вопросы машин переменного тока, асинхронные машины, синхронные машины, машины постоянного тока и специальные машины (раздел II).

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

При написании учебника использовались основополагающие работы и учебники по электротехнике (В. Ф. Миткевич, Л. Р. Нейман,

Л. А. Бессонов, К. А. Круг), электромеханике (Н. Шмитц, Д. Новотный), электрическим машинам (М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский, А. И. Вольдек, А. И. Важнов, В. В. Домбровский, Ю. Г. Шакарян, Б. В. Сидельников, И. П. Копылов, В. Н. Ванурин), электроприводу (А. А. Булгаков, Н. Ф. Ильинский, В. А. Елисеев, М. Г. Чиликин, Ю. А. Сабинин, С. А. Ковчин, И. Я. Браславский), статьи и монографии по специальным электрическим машинам, а также наработки авторов.

Авторы признательны за помощь при оформлении и подготовке книги к изданию студентам Николаю Окишеву, Анастасии Апсит и Марии Чернышёвой.

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 имеет место благодаря возможности удобного ее производства, распределения, передачи на большие расстояния, управляемости и высокому 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 до 20 000 и более кВт·ч электроэнергии в год на человека). Большая часть (≈60—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—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—1200 МВт, а самые маленькие — до нескольких Вт. Самые быстрые 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 и более кВт/кг.

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 году преобразовал электрическую энергию в механическую, а в 1831 году он же открыл закон электромагнитной индукции.

В 1834 году 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 годах созданы первые промышленные генераторы постоянного тока, а в 1873 году — машина переменного тока (В. Сименс).

Братья Гопкинсоны сформулировали закон магнитной цепи и в 1884 году предложили трансформатор с замкнутым сердечником.

В 1888 году М. О. Доливо-Добровольский предложил систему трехфазного тока, а в 1889 году 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 века 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 или машинно-вентильных систем на основе новой полупроводниковой техники и постоянных магнитов с высокими энергетическими показателями.

Машины постоянного тока используются в основном 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.

За рубежом (в развитых странах) машины постоянного тока выпускаются в основном по индивидуальным заказам, а основной тип электропривода — частотно-регулируемый асинхронный и вентильный в зависимости от мощности и требований к системе в целом.

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 кВт — 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—В). В сочетании с полупроводниковыми полностью управляемыми преобразователями такие машины вне 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.

Линейные асинхронные двигатели находят применение в приводах возвратно-поступательного движения механизмов, в монорельсовых транспортных системах, различных регуляторах подачи сыпучих материалов и др.

Линейные синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов используются в сервоприводах, когда требуется обеспечить динамические характеристики и точное позиционирование.

Линейные электромагнитные двигатели применяются в машинах ударного действия — разрушение пород, обрушение сводов, забивание мелких свай, ручной инструмент и т. д.

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

Раздел I
ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКУ

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Электромеханика изучает взаимодействие электрических и механических систем, то есть 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 законами 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 практичным, в то же время достаточно точным для практических расчетов 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, то есть 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 расчетом. При этом параметры и режимы электрической цепи во многом определяют состояние магнитных процессов и наоборот, то есть 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 [1, 2, 3, 5, 11].

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

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (1.1)$$

где потокосцепление

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \Phi_i w_i,$$

Φ_i — поток, сцепленный с i -м витком w_i [1, 3]. В частном случае, когда обмотка располагается на ферромагнитном сердечнике (большинство ЭМП), потокосцепление $\Psi = \Phi w$. При этом предполагается, что с каждым витком сцеплен одинаковый поток Φ .

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

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

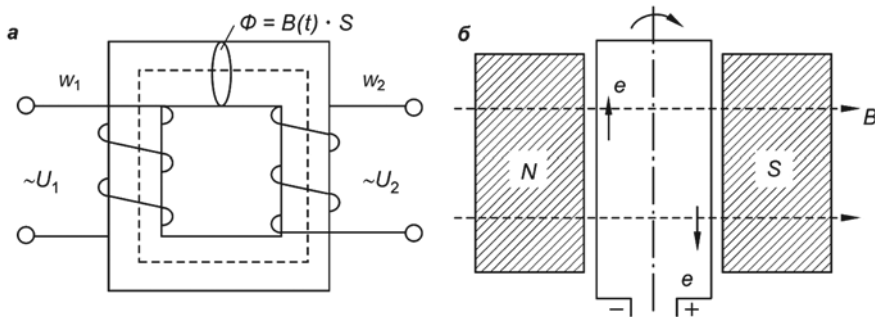


Рис. 1.1. К закону электромагнитной индукции

где $v = \frac{dx}{dt}$ — относительная скорость движения контура в магнитном поле.

Первый член (1.3), $\frac{d\Psi}{dt}$, представляет ЭДС пульсации (или трансформации), второй, $v \frac{d\Psi}{dx}$ — ЭДС движения (или вращения).

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

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

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

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

Действующее значение

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

где $\Phi_m = B_m S$; Φ_m и B_m — амплитудные значения потока и 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 (рис. 1.1, б), ЭДС катушки при $w = 1$

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = 2Blv, \quad (1.6)$$

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 её 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 $F_{эм}$:

$$d\bar{F}_{эм} = I [d\bar{l} \bar{B}], \quad \bar{F}_{эм} = \int_1 I [d\bar{l} \bar{B}]. \quad (1.8)$$

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

$$F_{эм} = BIl. \quad (1.9)$$

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

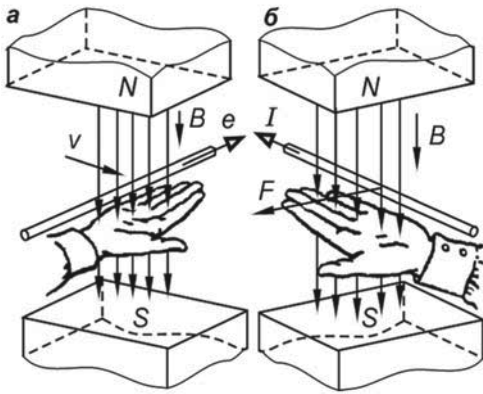


Рис. 1.2. Определение направления ЭДС (а) и силы взаимодействия (б)

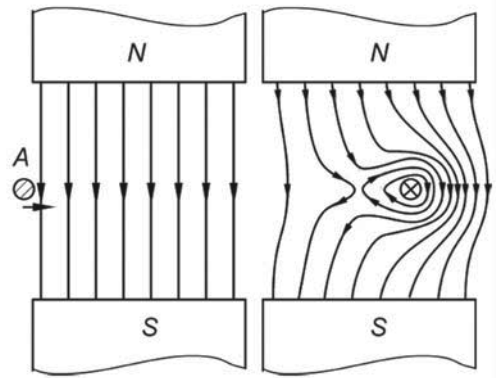


Рис. 1.3. Картина взаимодействия магнитного поля и проводника с током

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, то есть взаимное влияние электрической (eI), магнитной (B) и механической (Fv) частей системы. При этом магнитное поле выступает в качестве энергоносителя, то есть 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 относительная магнитная проницаемость ферромагнитных участков, определяющая способность проводить магнитный поток (магнитную проводимость), больше проницаемости немагнитных материалов (μ_0) в 100—10 000 раз в зависимости от типа материала и уровня насыщения $\left(\mu_r = \frac{\mu_{Fe}}{\mu_0} = 100 \div 10\,000 \right)$.

Величина $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (магнитная постоянная) определяет магнитную проводимость зазора. Следовательно, для магнитного потока

нет изоляторов (для цепи электрической отношение удельных электропроводностей проводников и изоляторов $\frac{\gamma_{\text{пр}}}{\gamma_{\text{из}}} \approx 10^{16}$).

Поэтому законы Ома и Кирхгофа для магнитной цепи имеют лишь формальное сходство с цепью электрической, отличаясь принципиально соотношениями удельных электропроводностей ($\gamma_{\text{пр}}$, $\gamma_{\text{из}}$) и магнитных проницаемостей (μ_{Fe} , μ_0) материалов.

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:

$$\oint_1 \bar{H} d\bar{l} = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = \sum I, \quad (1.11)$$

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

Магнитная индукция, поток и магнитное сопротивление определяются соотношениями, представленными в работе [1]. Закон Ома для магнитной цепи:

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

где l_i , S_i — длина средней магнитной линии участка и его поперечное сечение соответственно.

Закон Ома в дифференциальной форме для проводника $\bar{J} = \gamma \bar{E}$ аналогичен соотношению $\bar{B} = \mu \bar{H}$, где J и B — плотности тока и потока соответственно.

Расчеты магнитных цепей ведутся аналогично цепям электрическим (рис. 1.4) с использованием формальных аналогий (табл. 1.1).

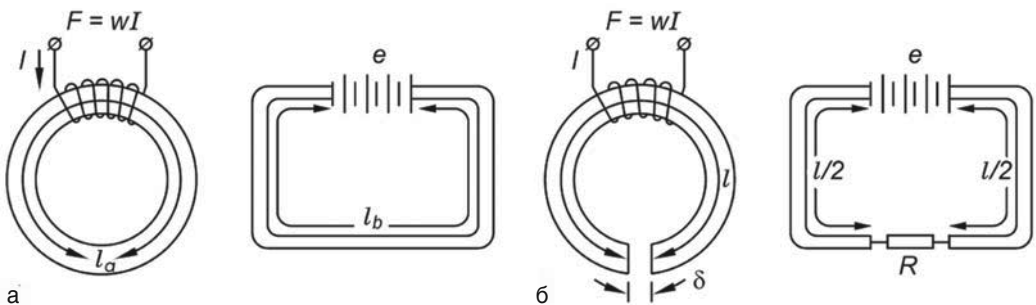


Рис. 1.4. Аналогии магнитной (а) и электрической (б) цепей

Таблица 1.1. Аналогии магнитной и электрической цепей

Цепь электрическая	$R, \text{ Ом}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$J, \text{ А/м}^2$	$E, \frac{\text{В}}{\text{м}}$	$\gamma, \frac{\text{См}}{\text{м}}$
Цепь магнитная	$R_\mu, \frac{\text{А}}{\text{Вб}}$	$\Phi, \text{ Вб}$	$F, \text{ А}$	$B, \text{ Тл}$	$H, \frac{\text{А}}{\text{м}}$	$\mu, \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$

Пример. Катушка намотана на ферромагнитный сердечник с зазором $\delta = 5$ мм. Площадь поперечного сечения сердечника $S = 100 \text{ см}^2$, длина средней линии индукции $l = 50$ см. Число витков катушки $w = 500$, ток $I = 6$ А. Определить магнитный поток, индукцию, напряженность магнитного поля, если: а) $\mu_{\text{Fe}} \gg \mu_0$; б) $\mu_{\text{Fe}} = 100\mu_0$.

Р е ш е н и е.

Магнитные поток и индукция:

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

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

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

Магнитодвижущая сила $F = Iw = 6 \cdot 500 = 3000$ А.

Магнитные поток и индукция:

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

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

б) Магнитное сопротивление сердечника при $\mu_{\text{Fe}} = 100\mu_0$:

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

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

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

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru