

ГЛАВА 2 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

«Наша Вселенная представляет собой хорошо уравновешенную смесь положительных и отрицательных электрических зарядов...»

Профессор Э. М. Парселл, 1975г.

2.1 Электрические заряды, поля и силы. Основные понятия и единицы измерений

Вся совокупность электрических и магнитных явлений есть проявление существования, движения и взаимодействия *электрических зарядов* и их *полей*. *Электрический заряд* - это физическая величина, отражающая особые, электрические свойства его материальных носителей - элементарных частиц, микрочастиц и физических тел (в понятии электрического заряда часто отождествляют само свойство с его носителем). Существование электрического заряда является фундаментальным свойством материи и определяет один из четырех известных типов фундаментальных взаимодействий - *электромагнитное взаимодействие* (остальные три типа - *гравитационное, слабое и сильное*). Электрическим зарядом обладает большинство элементарных частиц (в частности, *электрон e* и *протон p*), которые совместно с электрически нейтральными (незаряженными) частицами образуют структуру вещества на всех его иерархических уровнях, начиная с атомов и молекул и заканчивая звездами с планетными системами и обитающими на них организмами.

Электрический заряд - физическая величина, определяющая особый тип сил - электромагнитные силы и характеризующая свойство электрически заряженных частиц и тел вступать в электромагнитные взаимодействия

Действие электрических зарядов проявляет их фундаментальные свойства [2.1- 2.3]:

1) **полярность (двойственность) зарядов** - существуют два вида электрических зарядов, противоположных друг другу по действию и условно названных *положительными (+)* и *отрицательными (-)*; *одноименные* электрические заряды в виде заряженных частиц или физических тел, приведенные в соприкосновение или пространственно удаленные друг от друга, *отталкиваются*, а *разноименные* - *притягиваются* (полярность электрических зарядов была установлена именно по этим механическим проявлениям действия электрических сил - перемещениям и вращениям, и в данном отношении эти силы отличаются от гравитационных, которые всегда являются силами только притяжения); *

2) **дискретность (квантуемость) зарядов** - величина электрического заряда q любой частицы или физического тела всегда кратна минимально возможному и постоянному кванту заряда - *наименьшему*, или *элементарному заряду e* , отрицательному или положительному, равному по величине электрическому заряду e^- электрона или e^+ позитрона (для протона $p^+=e^+$): $(q^+)=n \cdot (e^+)$ или $(q^-)=n \cdot (e^-)$, где n - количество элементарных зарядов e в физическом объекте; **

3) **создание электромагнитного поля** - каждый неподвижный в рассматриваемой системе отсчета электрический заряд создает в пространстве вокруг себя *электрическое (электростатическое)*, а движущийся - *электромагнитное поле* с силовым действием на другие электрические заряды, появляющиеся в этом поле. ***

* Причина существования этого универсального свойства пока не известна. Современная физика рассматривает двойственность зарядов как противоположные проявления одного качества, подобного свойствам «левый» и «правый» качества симметрии.

** Природа такого квантования электрических зарядов и точного равенства зарядов всех заряженных элементарных частиц, независимо от их массы, элементарному заряду не выяснена (например, для протона,

который в 1836 раз тяжелее электрона, установлено с относительной погрешностью измерения не более 10^{-20} [2.1], что он имеет тот же заряд, что и электрон). Современная теория элементарных частиц предполагает существование гипотетических частиц с дробным электрическим зарядом, кратным $1/3$ элементарного заряда, - *кварков*, которые образуют *барионы* (тяжелые элементарные частицы с массой не менее массы протона; к ним, в частности, относят *нуклоны* - протоны и нейтроны) и другие элементарные частицы (мезоны, резонансы), участвующие в *сильных* взаимодействиях (весь класс таких частиц именуют *адронами*) [2.3]. Существуют и *некварковые гипотезы* о структурном устройстве стабильных элементарных частиц, причем не только адронов, но и *лептонов* – легких частиц типа электрона (например, одна из гипотез, вопреки общепринятому мнению о том, что электрон не имеет никакой структуры и существует в виде материальной точки бесконечно малых размеров, рассматривает его как размерное образование - устойчивый вращающийся сгусток электромагнитного поля, т.е. не заряженная частица порождает поле, а, наоборот, поле порождает частицу).

*** поле является материальным носителем электромагнитных сил, самостоятельной физической реальностью, отличной от вещества, но существующей наряду и одновременно с ним; поле не сводится к механическим, тепловым или другим явлениям, но проявляет свои действия и через них; поле придает пространству локальное *свойство близкогодействия*, через которое осуществляется *дальнегодействие* удаленных друг от друга электрических зарядов; хотя и говорят, что вещество, т.е. носитель электрического заряда, «создает» поле, но поле существует вместе с веществом; электромагнитное поле возникает при изменении электромагнитного состояния вещества и может затем существовать в пространстве совершенно независимо, самостоятельно от него [2.4]; взаимодействие и взаимопревращения между веществом и полем во многом только предстоит еще исследовать и понять (возможно, один из путей к этому – исследование *среды физического вакуума*).

Отдельные *магнитные заряды (магнитные монополи)*, ни положительные, ни отрицательные, в отличие от электрических зарядов, в природе не обнаружены. Постоянное или переменное магнитное поле не имеет других источников, кроме движущихся электрических зарядов (электрических токов) и меняющегося во времени электрического поля. В свою очередь, меняющееся магнитное поле порождает переменное электрическое поле, замыкая цикл образования электромагнитного поля (взаимосвязь электрических и магнитных полей описывается *уравнениями Максвелла*). Таким образом, электрические и магнитные поля являются частной формой электромагнитного поля, которое может создаваться как электрическими зарядами, так и переменными электрическими и магнитными полями.

Микроскопическое магнитное поле возникает в физической среде как при направленном движении электрически заряженных микрочастиц (электронов, протонов, ионов) - *микротоках*, так и при вращательном движении микрочастиц вокруг собственных осей. В последнем случае говорят о *собственном (спиновом) магнитном моменте* микрочастиц. Им обладают многие элементарные частицы, ядра и электронные оболочки атомов и молекул. Микротоки и магнитные моменты электрически заряженных микрочастиц являются причиной *намагничивания* физических тел и создания ими *макроскопических магнитных полей и магнитных моментов*, которые в каждом магните проявляются в виде совместного и нераздельного действия его двух противоположных *полюсов*, условно названных «северным» и «южным» (модель полюсов магнита - противоположные стороны плоского витка с током, «*магнитного лепестка*»). Магнитное поле оказывает силовое действие на движущиеся электрические заряды (токи) и тела, обладающие магнитным моментом, независимо от того, движутся эти тела или покоятся в рассматриваемой системе отсчета.

К электромагнитному взаимодействию сводятся не только электрические и магнитные явления, но опосредовано и большинство наблюдаемых микро- и макроскопических явлений: механические, химические, оптические и многие другие. Электромагнитное взаимодействие по широте и разнообразию своих проявлений занимает первое место среди всех других известных видов взаимодействий, что обусловлено его фундаментальностью, дальнегодействием (в отличие от сильного взаимодействия, которое проявляет себя только на субъядерных расстояниях) и интенсивностью, превосходящей гравитационное и слабое взаимодействия на много порядков.

Все физические тела содержат электрические заряды обоих знаков, которые могут, как компенсировать друг друга, обеспечивая электрическую нейтральность тела в целом, так и создавать избыток зарядов того или иного знака. Для характеристики электрического состояния физического тела используют понятие **количества электричества**:

Количество электричества q - это разность количеств положительных (q^+) и отрицательных зарядов (q^-) в физическом теле: $q=(q^+) - (q^-)$

Если $q=0$, то тело электрически нейтрально, или незаряжено. То, что $q=0$, еще не означает, что тело не может участвовать в электромагнитных взаимодействиях: последние зависят от того, как физически взаимосвязаны и распределены в объеме тела противоположные заряды. Различают *свободные* (квасисвободные) электрические заряды, которые способны под воздействием электрического поля перемещаться в веществе на макроскопические расстояния, и *связанные* заряды, удерживаемые электрическими силами в составе атомов, молекул или кристаллической решетки вещества. В электрически нейтральных проводниках и диэлектриках, помещенных в электростатическое поле, под воздействием *электростатической индукции* происходит на отдельных участках поверхности или объема тела перераспределение свободных и смещение с переориентацией (*поляризация*) связанных зарядов с приданием телу в целом электрических свойств, присущих *электрическим диполям**. В результате, такие в целом электрически нейтральные тела вступают в электромагнитные взаимодействия.

Если $q>0$, то тело заряжено *положительно*, а если $q<0$ - *отрицательно* (явление изменения заряда тела называют *электризацией*). Для электрически изолированной системы зарядов действует **закон сохранения заряда**: *полный электрический заряд в системе, т.е. алгебраическая сумма положительного и отрицательного зарядов, остается постоянным* (Этот закон не запрещает создание новых или уничтожение старых зарядов в системе, но требует при этом их дополнителности по знаку и равенства по величине - невозможно появление или исчезновение зарядов только одного знака).

* *Электрический диполь* – совокупность двух равных по абсолютной величине разноименных точечных зарядов q , находящихся на некотором расстоянии l друг от друга. Диполь характеризуется вектором *дипольного момента* p , который численно равен произведению $p=q \cdot l$ и направлен от q^- к q^+ . Диполь проявляет свойства ненулевого электрического заряда.

Определение единицы количества электричества (единицы электрического заряда) зависит от используемой системы единиц. Естественным и простым образом эта единица устанавливается из классического **закона Кулона**, согласно которому *сила взаимодействия F в вакууме между двумя неподвижными точечными электрическими зарядами q_1 и q_2 прямо пропорциональна произведению величин этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними*:

$$\mathbf{F}=k \cdot q_1 q_2 / r^2 \text{ [Н; ед.СГСЭ]} \quad (2.1.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц и численно равный силе, с которой два единичных заряда взаимодействуют на единичном расстоянии. Для физической среды, отличной от вакуума, в знаменатель формулы (2.1.1) вводится безразмерная величина ϵ - *относительная электрическая проницаемость*, показывающая, во сколько раз уменьшается сила взаимодействия зарядов в среде по сравнению с вакуумом. Закон Кулона проверен и справедлив для расстояний от субатомных 10^{-13} см до километровых 10^5 см и более (на меньших, чем субатомные расстояния, действуют законы *квантовой механики*). Этот закон - фундамент электростатики.

Сила всегда является **вектором**, т.е. имеет количественное значение (абсолютную величину, или модуль), направление действия в пространстве и точку своего приложения. В

механике принято правило: если на тело действуют две силы в противоположном направлении, то та сила, которая совпадает с направлением перемещения тела и совершает работу, считается *положительной*, а противоположная ей, против которой совершается работа (например, сила трения), - *отрицательной* [2.5]. В том случае, когда каждая из сил может совершать перемещения тел в направлении своего действия, несмотря на противодействие другой силы, т.е. каждая из сил может считаться положительной, возникает вопрос: какую из них следует изначально выбрать как положительную или отрицательную? Так, для гравитационного поля *силу тяготения* источника поля изначально определяют как *отрицательную*, а силу, ее *преодолевающую*, - как *положительную* (при этом сила тяготения отрицательна по знаку, но максимальна по модулю вблизи источника поля, а на бесконечном удалении от него равна нулю). Аналогично, в электростатике силы *притяжения* разноименных зарядов признают *отрицательными*, а силы *отталкивания* одноименных зарядов - *положительными*. На рис.2.1.1 приведены примеры действия таких сил. В формуле закона Кулона знак силы формируется автоматически при записи положительных и отрицательных зарядов в виде $+q, -q$.

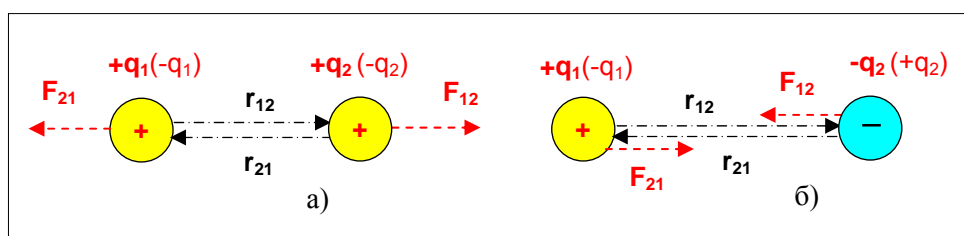


Рис.2.1.1 Силы электростатического взаимодействия между электрическими зарядами
а) положительные силы отталкивания между двумя одноименными зарядами, б) отрицательные силы притяжения между двумя разноименными зарядами (r_{12} и r_{21} - радиусы-векторы, F_{12} и F_{21} - силы, приложенные со стороны поля одного заряда к другому; в индексах первая цифра относится к источнику силы, а вторая - к телу, на которое действует сила поля источника)

В *абсолютной электростатической системе единиц СГСЭ* сила F измеряется в *динах* ($1 \text{ дин} = 1 \text{ г} \cdot 1 \text{ см} / \text{с}^2$), расстояние r - в *сантиметрах* и принимается $k=1$ [$\text{дин} \cdot \text{см}^2$]. Если $F=1 \text{ дин}$, $r=1 \text{ см}$ и $q_1=q_2=q$, то $q=1$, т.е. заряды *величиной в одну абсолютную электростатическую единицу (ед. СГСЭ_q)*; эта единица не имеет собственного наименования), *расположенные в вакууме на удалении 1 см друг от друга взаимодействуют с силой в одну дину*. В этой системе единиц *элементарный заряд* - заряд протона или электрона - равен $e \approx 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГСЭ}_q$. Если бы изначально заряд электрона был принят за единицу, то тогда заряд любого тела выражался бы целым числом элементарных зарядов. Но исторически элементарный заряд был измерен уже после выбора единицы заряда. Тем не менее, в целых единицах выражается заряд ядра атома: e^+Z , где Z - атомный номер, т.е. порядковый номер химического элемента в периодической системе элементов. *СГС* система единиц широко применяется в работах по теоретической физике и астрономии, но в технике используется *Международная система единиц (СИ)*.

В *СИ* единицей количества электричества является производная единица *кулон (Кл)*, которая определяется через основную единицу - единицу силы тока *ампер (А)* - как *количество электричества q , проходящее за 1 с через поперечное сечение проводника при токе $i=1 \text{ А}$: $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$ (или $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл} / \text{с}$). Элементарный заряд в *СИ* равен $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, а $1 \text{ Кл} \approx 6,25 \cdot 10^{18} e \approx 3 \cdot 10^9 \text{ ед. СГСЭ}_q$.*

Взаимосвязь силы тока и заряда:
 $i=q/t$ [А] ; $q=i \cdot t$ [Кл]

(2.1.2)

Причина введения кулона - простота отношений этой единицы с другими электрическими единицами СИ: ампером, вольт, омом и ваттом (в самом же законе Кулона при этом усложняется коэффициент $k=1/4\pi\epsilon_0$, где $\epsilon_0 \approx 8,8542 \cdot 10^{-12}$ - электрическая постоянная [$\text{Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2 = \Phi/\text{м}$]; в СГС системе единиц $\epsilon_0=1$). В СИ сила F измеряется в ньютонах ($1\text{Н}=1\text{кг} \cdot 1\text{м}/\text{с}^2=10^5\text{дин}$), расстояние r - в метрах ($1\text{м}=10^2\text{см}$), а коэффициент k в формуле закона Кулона принимает значение $k \approx (1/4\pi \cdot 8,8542 \cdot 10^{-12}) \approx 8,9875 \cdot 10^9 \approx 9 \cdot 10^9 [\text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2]$. Таким образом, два неподвижных точечных заряда по 1 Кл каждый, расположенные на расстоянии 1 м друг от друга, взаимодействуют с электрической силой $F \approx 9 \cdot 10^9 \text{Н}$, т.е. около миллиона тонн.

Для сравнения, гравитационное взаимодействие масс зарядов в 1 Кл по закону тяготения Ньютона $F = -G \cdot m_1 m_2 / r^2$, где m_1 и m_2 - массы тел (масса электрона $m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг; масса зарядов в 1 Кл, составленная из электронов, равна $m_1 = m_2 \approx 6,25 \cdot 10^{18} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \approx 5,58 \cdot 10^{-12}$ кг), а $G \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$ - гравитационная постоянная, происходит при $r=1\text{м}$ с гравитационной силой $F \approx 2 \cdot 10^{-33} \text{Н}$, которая в $4,5 \cdot 10^{42}$ раз меньше электрической силы (знак минус в формуле указывает, что сила притяжения отрицательна) [2.2]. Даже при гравитационном взаимодействии таких тяжелых заряженных элементарных частиц, как протоны, их сила тяготения при заряде в 1 Кл возрастет не более чем в $3,4 \cdot 10^6$ раз, оставаясь в $1,5 \cdot 10^{35}$ раз меньше электрической силы отталкивания зарядов. Таким образом, в земных масштабах гравитационным взаимодействием зарядов в электрических явлениях можно пренебречь.

Заряженные микрочастицы, как носители заряда, имеют столь малые размеры, что их структура и протяженность в большинстве электрических явлений не имеют значения. Например, из опытов по рассеиванию частиц высоких энергий на ядрах различных химических элементов известно, что электрический заряд протона не выходит за пределы области диаметром 10^{-13} см, а у тяжелых ядер - за 10^{-11} см [2.1]. Размеры же самих атомов, определяемые их внешними электронными оболочками с учетом их энергетических состояний, не превышают в невозбужденном состоянии 10^{-8} см, т.е. в 10^3 - 10^5 раз больше размеров ядер [2.3]. Для сравнения, если ядро атома представить в виде монеты диаметром 1 см, то атом по своим «габаритам» предстанет футбольным полем диаметром 100 м («пустота» вокруг ядра заполнена движущимися электронами и электромагнитным полем).

Основной количественной характеристикой электрического поля, создаваемого соответствующим источником - зарядом q_u , является **напряженность электрического поля**: векторная величина E , которая в данной точке пространства электрического поля определяется отношением силы F , действующей со стороны поля на положительный точечный пробный заряд q^+ , помещенный в эту точку, к величине заряда:

$$\begin{array}{l} \text{Напряженность электрического поля:} \\ E = F/q \text{ [Н/Кл; дин/ед. СГСЭ}_q\text{]} \end{array} \quad (2.1.3)$$

Единицы измерения E в СИ - [Н/Кл], в СГСЭ - [дин/ед. СГСЭ_q]; $1\text{Н/Кл} \approx 0,33 \cdot 10^{-4}$ дин/ед. СГСЭ_q. Из (2.1.3) следует, что $F = q \cdot E$, т.е. сила воздействия электрического поля на точечный заряд прямо пропорциональна величине заряда и напряженности поля в точке нахождения этого заряда. В частном случае, когда электрическое поле образовано точечным зарядом q_u , величина напряженности E в любой точке такого поля (в вакууме), согласно закону Кулона, равна

$$E = q_u / r^2, \quad (2.1.4)$$

т.е. прямо пропорциональна заряду источника поля q_u и обратно пропорциональна квадрату модуля радиуса-вектора r , проведенного от источника в данную точку поля. Чем больше заряд источника q_u и меньше радиус r , тем больше по абсолютной величине E (E не зависит

от пробного заряда q , так как при его увеличении пропорционально увеличивается сила F , а отношение F/q не изменяется). Для положительного заряда q^+ вектор напряженности направлен по радиусу от заряда, а для отрицательного q^- - к заряду.

Таким образом, напряженность электрического поля E в любой его точке указывает величину и направление силы, действующей на единицу положительного пробного заряда в этой точке, и зависит только от положения, или пространственных координат, точки в поле. Поля такого типа называют *потенциальными* (к ним, в частности, относятся и гравитационные поля). Описание любой точки электрического поля через ее вектор напряженности позволяет, во-первых, абстрагироваться от источника поля (не заниматься поиском и анализом источника или источников поля, если в этом нет необходимости), и, во-вторых, предсказать силу, которая будет действовать на любой заряд в рассматриваемой точке. Среди различных электрических полей особо выделяют поля, в которых векторы напряженности во всех точках поля равны, т.е. имеют одинаковую величину и направление (параллельны друг другу). Такие поля называют *однородными*.

В общем случае распределение электрического поля в пространстве наглядно изображают с помощью *силовых линий*, для которых векторы напряженности E направлены по касательным в каждой их точке (рис.2.1.2). Эти линии начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах или уходят в бесконечность. Для поля точечного заряда, как показано выше, силовые линии и векторы напряженности направлены радиально по радиусам. При исследовании напряженности электрического поля, созданного системой из нескольких зарядов-источников, используют *принцип суперпозиции, или принцип независимости действия электрических полей*: полная напряженность поля в данной точке определяется геометрической суммой напряженностей полей, создаваемых в этой точке отдельными зарядами-источниками. Иными словами, векторы напряженностей в точке от соответствующих источников складываются по правилу параллелограмма.

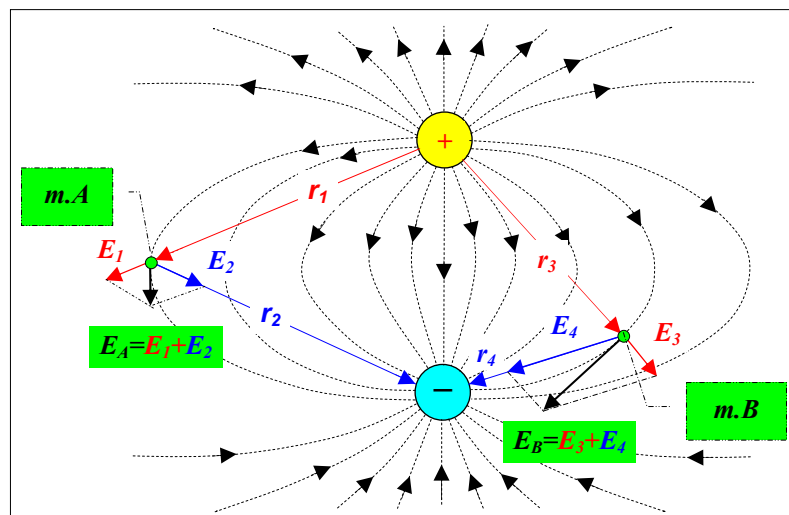


Рис.2.1.2 Силовые линии поля электрического диполя и определение напряженностей поля E_A, E_B в точках А и В по принципу суперпозиции

В физической среде, отличной от вакуума, электрическое поле характеризуется вектором *электрической индукции* D , равном сумме векторов напряженности поля E и *поляризации среды* $P = \kappa_e \epsilon_0 E$: $D = \epsilon_0 E + P = \epsilon \epsilon_0 E$; $\epsilon = 1 + \kappa_e$, где κ_e - *диэлектрическая восприимчивость среды* (в СИ - $D = E + 4\pi P = \epsilon E$; $\epsilon = 1 + 4\pi \kappa_e$). Вектор электрической индукции, в отличие от вектора напряженности, учитывает влияние на поле не всех, а только свободных электрических зарядов среды (влиянием ее связанных поляризационных зарядов пренебрегают), что упрощает исследования электрических процессов в средах [2.3].

Наряду с вектором напряженности E , определяющим силовое действие поля в любой его точке, используют и другую точечную характеристику поля - скалярную энергетическую величину, связанную с работой потенциальных сил поля по перемещению подвижного заряда из одной точки поля в другую, - **электрический потенциал φ точки поля**. Эта величина полнее характеризует поле, поскольку учитывает не только силы, но и расстояния, на которых они действуют, совершая соответствующую работу по перемещению зарядов в поле.

По определению, **работа A силы F** при перемещении физического тела в пространстве по прямолинейному пути L равна скалярному произведению векторов F и L : $A = F \cdot L = |F| \cdot |L| \cdot \cos(F, L)$, где (F, L) - угол между этими векторами. Если сила F изменяется при перемещении тела от одной точки пути к другой (например, от точки L_1 к точке L_2) или путь криволинеен, то для вычисления работы на малом отрезке пути dL (таком, что на нем можно пренебречь изменениями силы и направления перемещения) используют дифференциал $dA = F \cdot dL$, а на всем пути - интеграл $A = \int_{L_1}^{L_2} F(L) \cdot dL$. Если направление силы и перемещения совпадают, то $A = F \cdot L$; если сила перпендикулярна направлению перемещения, то $A = 0$ (так как $\cos 90^\circ = 0$); если угол между векторами острый, то работа положительна, а если тупой - отрицательна.

Работа связана с энергией следующим образом:

Работа A есть мера изменения энергии W физического тела или системы тел: $A = \Delta W$

Применительно к электростатическому полю, **работа A – это мера изменения потенциальной энергии U подвижного электрического заряда при его перемещении в этом поле, т.е. $A = \Delta U$** . Следует различать потенциальную энергию подвижного заряда в поле, созданном системой других (неподвижных) зарядов, и потенциальную энергию самой системы этих образующих поле зарядов. В первом случае потенциальная энергия подвижного заряда рассматривается относительно той точки поля, в которой он находится. Эта энергия зависит как от величины заряда, так и от потенциальной энергии поля в точке его нахождения, которая в свою очередь зависит от величины и взаиморасположения электрических зарядов, создающих поле (предполагается, что влиянием подвижного заряда на поле можно пренебречь).

Во втором случае потенциальная энергия образующих поле зарядов относится не к тому или иному из этих зарядов или к какой-либо точке их результирующего поля, а к системе в целом. Величина этой энергии зависит как от величины и данного взаимоположения зарядов, так и от того их начального положения, из которого они были переведены в данное. При этом потенциальная энергия системы определяется той работой, которую затратили внешние силы, чтобы, преодолевая силы электростатического отталкивания зарядов, объединить их в систему (эта работа может быть рассчитана на основе принципа суперпозиции, предполагая последовательное создание системы из отдельных зарядов). Если нас не интересует то, каким путем была получена эта система зарядов, то величину ее потенциальной энергии можно задать любой константой или нулем.

Потенциальная энергия U_i в любой i -ой точке поля ($i=1,2,\dots$), созданного системой электрических зарядов, также определяется работой A внешних сил, которые, преодолевая силы поля этой системы, могут поместить подвижный единичный заряд в данную точку поля. Работа этих сил зависит от конечного (в i -ой точке поля) и от начального (в некоторой другой j -ой точке поля) положения перемещаемого заряда и равна $A_{ij} = U_i - U_j$. Если в j -ой точке перемещаемый заряд значительно удален (теоретически на бесконечность) от системы зарядов, создающих поле, то его потенциальная энергия близка к нулю $U_j = 0$ и $A_i = A_{ij} = U_i$. В общем случае потенциальная энергия U_i любой i -ой точки поля меньше A_i и определяется как

$A_i=U_i-C$, где C – константа, значение которой зависит от удаленности рассматриваемой системы зарядов от той границы, относительно которой нормируется потенциальная энергия точек поля этой системы.

Потенциальная энергия электростатического поля, созданного системой неподвижных электрических зарядов, может рассматриваться как *способность этого поля производить работу, перемещая подвижные электрические заряды*. Потенциальная энергия любой точки поля, или подвижного заряда в этой точке, зависит от координат этой точки: *при перемещении полем заряда из одной точки в другую в направлении действия своих электрических сил поле совершает положительную работу, уменьшая тем самым потенциальную энергию заряда, и, наоборот, при перемещении заряда в поле внешними силами против направления действия электрических сил поля эти внешние силы производят отрицательную работу, изменяя положение заряда в поле и увеличивая тем самым его потенциальную энергию* [2.5,2.7].

Очевидно, что в электрическом поле точечного положительного заряда потенциальная энергия положительна и максимальна в точках, в которых подвижный одноименный заряд максимально приближен к заряду-источнику: в этом случае силы отталкивания зарядов способны произвести наибольшую работу, удаляя один заряд от другого. Напротив, в случае *разноименных зарядов*, их потенциальная энергия в состоянии сближения минимальна (отрицательна и максимальна по величине), но возрастает (становится более положительной) при удалении зарядов друг от друга под действием внешних сил. На определенном удалении разноименных зарядов их силы притяжения способны произвести наибольшую работу, сближая заряды. В обоих случаях, при теоретическом удалении зарядов на бесконечное расстояние друг от друга их потенциальная энергия становится равной нулю (из закона Кулона следует, что при $r=\infty F=0$), т.е. электрическое взаимодействие зарядов прекращается.

Рассмотрим подробнее простейший вариант электростатического поля - *поле положительного точечного заряда q_u* . Оно наглядно представляется в виде радиальных силовых линий с векторами напряженности (сил), направленных согласно (или против) радиус-векторам соответствующих точек поля (рис.2.1.3).

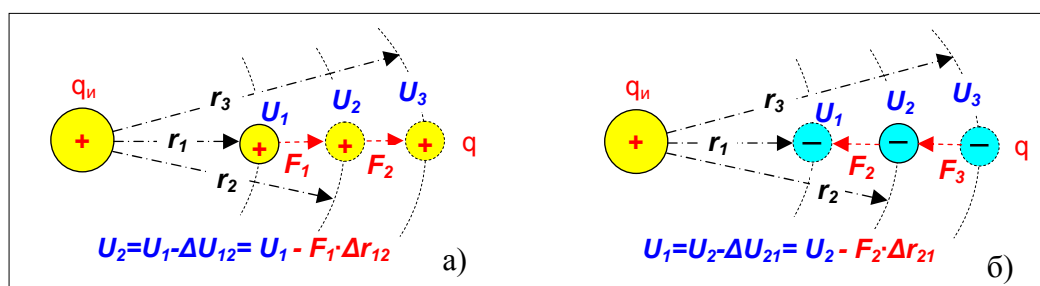


Рис.2.1.3 Работа сил потенциального электрического поля точечного заряда q_u по перемещению пробного заряда q : а) положительного q^+ , б) отрицательного q^- : (U_1 , U_2 и U_3 – потенциалы поля на плоском сечении эквипотенциальных поверхностей с радиус-векторами r_1 , r_2 и r_3 ; $\Delta r_{12}=\Delta r_{21}=r_2-r_1$ – приращение пути, совпадающего с направлением действия сил поля)

В соответствии с формулой (2.1.4), напряженность поля для точечного источника имеет одинаковую величину на каждой сфере с радиусом r_i , но разную величину - на сферах с разными радиусами, например, $E_1=q_u/r_1^2 > E_2=q_u/r_2^2$ (на рис.2.1.3 показано сечение сферы с поверхностью чертежа: сферы представляются окружностями с радиусами r_i). Вектор напряженности поля, как и радиус-вектор любой его точки, перпендикулярен окружности (сфере) и поэтому перемещение заряда по окружности (сфере) не требует преодоления электрических сил поля, выполнения работы против этих сил и не меняет потенциальной

энергии перемещаемого заряда. Такие линии (поверхности) называют в общем случае *линиями (поверхностями) равного потенциала, или эквипотенциальными*.

Наоборот, перемещения зарядов с одной эквипотенциальной линии (поверхности) на другую связаны с работой электрических сил поля, если перемещения производятся этими силами и в направлении их действия, или с работой внешних сил (по направлению или против направления действия электрических сил поля). В указанных случаях всегда меняется потенциальная энергия перемещаемого заряда, например, при *перемещении положительного заряда* из точки с радиусом r_1 в точку с радиусом r_2 поле выполняет работу $\Delta A = F_1 \cdot (r_2 - r_1) = F_1 \cdot \Delta r_{12}$ (полагаем, что расстояние Δr_{12} достаточно мало по сравнению с r_1 и поэтому изменением величины силы на этом отрезке пути можно пренебречь), и на эту же величину уменьшается (становится менее положительной) потенциальная энергия перемещенного заряда: $U_2 = U_1 - \Delta U_{12} = U_1 - F_1 \cdot \Delta r_{12}$ (рис.2.1.3,а). Аналогично, уменьшается (становится более отрицательной) потенциальная энергия при *перемещении отрицательного заряда* из точки с радиусом r_2 в точку с радиусом r_1 : $U_1 = U_2 - \Delta U_{21} = U_2 - F_2 \cdot \Delta r_{21}$ (рис.2.1.3,б).

В общем случае каждой точке поля можно сопоставить свое локальное значение потенциальной энергии $U_i \neq 0$, положительное или отрицательное, которое зависит от координат точки в поле (радиуса-вектора точки в случае точечного источника поля) и заряда (его величины и знака), находящегося в ней. Для анализа энергетической характеристики поля величина заряда, помещаемого в ту или иную точку поля, имеет второстепенное значение, и ее можно исключить из рассмотрения, взяв отношение величины потенциальной энергии к заряду. Тем самым *потенциальная энергия точки поля приводится к единице заряда* (аналогично, выше приводилась к единице заряда сила при определении напряженности поля).

Электрический потенциал ϕ точки поля определяют как *отношение потенциальной энергии пробного точечного заряда, помещенного в эту точку, к величине этого заряда*:

$$\text{Потенциал электрического поля: } \phi = U/q \text{ [Дж/Кл; В; эрг/ед. СГСЭ}_q\text{]} \quad (2.1.5)$$

Единица измерения потенциала в СИ - [Дж/Кл], а в СГСЭ - [эрг/ед. СГСЭ_q]. Из (2.1.5) следует, что $U = q \cdot \phi$, т.е. *потенциальная энергия в данной точке поля прямо пропорциональна величине заряда и потенциалу этой точки*.

Если пробный заряд q перемещается силами поля из точки поля с потенциалом ϕ_1 в другую точку с потенциалом ϕ_2 , то поле совершает работу $A = U_1 - U_2 = q(\phi_1 - \phi_2)$, где $\Delta\phi = (\phi_1 - \phi_2)$ - **разность электрических потенциалов**. Если $q=1$, то $\Delta U = U_1 - U_2 = (\phi_1 - \phi_2)$, т.е. *разность потенциалов двух точек электрического поля можно определить как работу, совершаемую полем при перемещении между ними единичного положительного заряда*. Работа по перемещению электрических зарядов производится электрическим полем всегда в направлении от большего своего потенциала к меньшему, от более положительного потенциала к более отрицательному, от положительного потенциала к отрицательному, но не наоборот.

Если между двумя близко расположенными точками 1 и 2 в электростатическом поле разность потенциалов равна $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$, а расстояние между ними по линии напряженности \mathbf{E} равно $\Delta l = r_2 - r_1$ (рис.2.1.4), то справедливо равенство:

$$\text{grad } \phi = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \Delta\phi/\Delta l = d\phi/dl = -\mathbf{E} \quad (2.1.6)$$

где $\text{grad } \varphi$ – **вектор градиента потенциала**. Этот вектор всегда направлен в сторону увеличения потенциала (противоположен по направлению вектору E , направленному в сторону уменьшения потенциала), а его модуль равен $d\varphi/dl=E$ (результат очевиден из того факта, что потенциал является работой по перемещению единичного заряда и равен произведению напряженности на перемещение в данной точки; предел отношения этого произведения к самому перемещению и дает напряженность поля в точке). Градиент потенциала, как и вектор напряженности электрического поля, направлен по нормали к эквипотенциальной поверхности в любой точке потенциального поля.

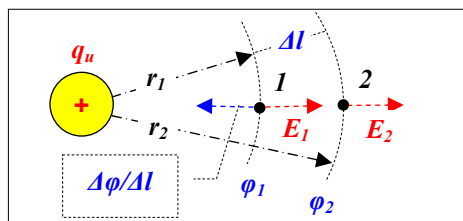


Рис.2.1.4 Градиент потенциала электростатического скалярного поля потенциалов

Разность потенциалов точек электрического поля является той причиной, которая вызывает направленное движение свободных электрических зарядов в поле. Перемещение зарядов в электрическом поле в обратном направлении, от низкого потенциала к более высокому, возможно только за счет действия *внешних (сторонних)* относительно данного электрического поля сил. Электростатические силы (как и гравитационные), *консервативны*, т.е. их работа не зависит от формы траектории перемещаемого в поле тела и определяется только значениями потенциалов начальной и конечной точек пути. Работа консервативной силы по произвольной замкнутой траектории всегда равна нулю, так как точки начала и конца такой траектории совпадают. Потенциал, как и напряженность, является “функцией точки”, т.е. зависит лишь от координат точек поля.

Единицей работы и энергии в СИ является **джоуль (Дж)** - работа, производимая силой в 1 ньютон при перемещении физического тела в направлении действия силы на 1 метр: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м}$ (в СГС - $1 \text{ эрг} = 1 \text{ дин} \cdot 1 \text{ см}$ и $1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$). **Единицей потенциала** в СИ является **вольт (В)** – потенциал точки поля, в которой пробный заряд в 1 Кл обладает потенциальной энергией в 1 Дж (в СГСЭ - ед. СГСЭ_v = $1 \text{ эрг} / 1 \text{ ед. СГСЭ}_q = 10^{-7} \text{ Дж} / (3 \cdot 10^9)^{-1} \text{ Кл} = 300 \text{ В}$; эту единицу иногда называют *стат-вольт*). Можно сказать, что для перенесения заряда в 1 Кл из одной точки электрического поля в другую, разность потенциалов между которыми составляет 1В, требуется работа в 1 Дж (это утверждение может рассматриваться как второе определение единицы потенциала В или разности потенциалов в 1В). С учетом введенной единицы измерения потенциала В можно переопределить единицы измерения напряженности поля: $[Н/Кл] = (\text{Дж}/\text{м}) / (\text{Дж}/\text{В}) = [\text{В}/\text{м}]$. Единица «вольт на метр» является наиболее распространенной единицей измерения напряженности электрического поля.

Таблица единиц измерения силы, работы (энергии), заряда, напряженности поля и потенциала

Физическая величина	Системы единиц		Эквивалентность единиц
	СИ	СГСЭ	
Сила F	ньютон(Н); newton, N $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ см} / \text{с}^2$	дина (дин); дына (dyn) $1 \text{ дин} = 1 \text{ г} \cdot 1 \text{ см} / \text{с}^2$	$1 \text{ Н} = 10^5 \text{ дин}$ $1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ Н}$

Работа A^* <i>(энергия W)</i>	джоуль (Дж); joule, J $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м}$	эрг; erg $1 \text{ эрг} = 1 \text{ дин} \cdot 1 \text{ см}$	$1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ эрг}$ $1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$
Заряд q^{**}	кулон (Кл); coulomb, C $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$	ед. СГСЭ_q	$1 \text{ Кл} = 3 \cdot 10^9 \text{ ед. СГСЭ}_q$ $\text{ед. СГСЭ}_q = (1/3) \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$
Напряженность E	Н/Кл ; В/м	дин/ ед. СГСЭ_q	$1 \text{ Н/Кл} = 0,33 \cdot 10^{-4}$ дин/ед. СГСЭ_q
Потенциал U	вольт (В); volt, V $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}$	ед. СГСЭ_v (стат-вольт, СВ); $1 \text{ СВ} = \text{эрг} / \text{ед. СГСЭ}_q$	$1 \text{ СВ} = 300 \text{ В}$ $1 \text{ В} = 1/300 \text{ СВ}$

* В физике микрочастиц используется внесистемная единица энергии – **электронвольт (eV, eV)** – энергия переноса элементарного заряда между точками электрического поля с разностью потенциалов в 1 В ; $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$

**Элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГСЭ}_q$

Приведенные понятия электрических зарядов, полей и сил, а также единицы измерений сил, зарядов, напряженности поля и его потенциалов, разности потенциалов и работы (энергии) важны для понимания в дальнейшем всех рассматриваемых электрических процессов.

2.2 Постоянный электрический ток. Законы Ома и Джоуля-Ленца

Атрибутом всех видов материи является движение. Философия выражает это фундаментальное свойство материи тезисом: «*Движение абсолютно - покой относителен*». Это всеобщее свойство распространяется и на электрические заряды (точнее, на их носители): они находятся в непрерывном движении того или иного рода, начиная с колебаний и собственных вращений протонов в атомных ядрах, собственных и орбитальных вращений электронов в оболочках атомов и оканчивая движением электрических зарядов в природных макропроцессах и технических системах. В этом смысле неподвижные электрические заряды и создаваемые ими электростатические поля, рассмотренные в предыдущем параграфе, являются всего лишь полезными абстракциями, позволяющими в ряде случаев пренебречь реальными движениями электрических зарядов в целях упрощения моделей электрических явлений и познания их сути.

Таким образом, **электрические заряды в веществе находятся постоянно в различных видах движения**, которые, как правило, упорядочены законами природы на микроуровне (уровне атомов и молекул) и на макроуровне в высокоорганизованной материи (в живых организмах), но несут хаотический, случайный характер на макроуровне в косной материи (неживом веществе). **Задача извлечения электрической энергии из вещества - это задача создания упорядоченного движения носителей электрических зарядов в технических системах с использованием для этого как упорядоченного, так и хаотического движения природных носителей электрических зарядов.** При перемещении электрического заряда в электрическом поле силами поля производится работа, которая может быть использована человеком. Создав упорядоченное движение носителей электрических зарядов в электрическом поле, мы тем самым даем возможность каждому заряду произвести соответствующий квант работы, т.е. полезно отдать свою электрическую энергию. Поскольку электрические силы велики (во много раз больше гравитационных сил), а элементарных зарядов в проводниках много, то огромна и отдаваемая ими в процессе движения суммарная энергия.

Перейдем к рассмотрению простейшего процесса упорядоченного движения электрических зарядов в технических системах - **постоянному электрическому току.**

Электрический ток - это упорядоченное (направленное) движение электрически заряженных частиц или заряженных макроскопических тел

За направление движения тока исторически принято направление движения положительно заряженных частиц. Если ток создается отрицательно заряженными

частицами (например, электронами), то направление тока считается противоположным направлению движения частиц. Различают **электрический ток проводимости**, связанный с движением заряженных частиц относительно среды, и **конвекционный электрический ток**, связанный с движением макроскопических заряженных тел (например, заряженных капель дождя в атмосфере или заряженной плазмы в звездном веществе) [2.3]. Далее рассматриваются только токи проводимости.

Электрический ток проводимости - это ток, связанный с упорядоченным движением заряженных частиц относительно среды внутри макроскопических тел (проводников)

Для возникновения и существования электрического тока проводимости необходимы два условия: а) наличие в проводнике свободных заряженных частиц, не связанных жестко с единой нейтральной электрической системой проводника, б) наличие внешней силы, создающей и поддерживающей упорядоченное движение заряженных частиц в проводнике. Проводники всегда содержат свободные или квазисвободные носители заряда - электроны (в металлах) или ионы - положительно или отрицательно заряженные атомы (в электролитах, в плазме). В первом случае говорят об **электронной**, а во втором - об **ионной проводимости** (существует и **смешанная проводимость**, при которой свободными носителями являются одновременно электроны и ионы). Силой, организующей направленное движение свободных носителей, выступает электрическое или электромагнитное поле внутри проводника. В частности, электрическое поле может быть создано разностью потенциалов на концах проводника за счет внешнего источника электрического поля - **источника электродвижущей силы**.

Электродвижущая сила (эдс) \mathcal{E} - это физическая величина неэлектростатической природы, разделяющая электрические заряды и создающая в источнике эдс на его полюсах разность электрических потенциалов

Перемещение зарядов в самом **источнике эдс** производится под действием **сторонних непотенциальных сил** (их работа зависит от траектории перемещения электрических зарядов) различного происхождения: химических, индукционных, тепловых и др. Эти силы разделяют электрические заряды внутри среды источника (поэтому их иногда называют **электроразделительными**) и **концентрируют разноименные заряды на его полюсах**, создавая тем самым между этими полюсами определенную разность электрических потенциалов.

В общем случае внешний проводник и **источник эдс (генератор)** образуют **замкнутую электрическую цепь**, в которой электрические заряды перемещаются в проводнике под действием внешней разности электрических потенциалов, или **электрического напряжения** $U = \varphi_1^+ - \varphi_2^-$ (рис.2.2.1). Величина напряжения U между двумя точками электрической цепи определяет напряженность кулоновского электрического поля \mathbf{E} внутри проводника (например, для изотропного проводника постоянного сечения $\mathbf{E} = -U/L$, где L - длина проводника) и соответствует работе электрического поля по перемещению единичного положительного заряда из одной точки проводника в другую.

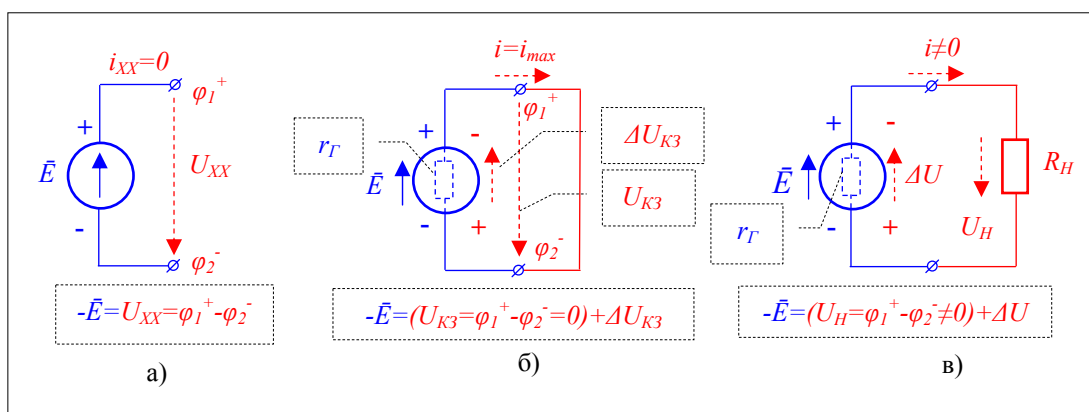


Рис.2.2.1 Схема электрической цепи с источником эдс \vec{E} : а) схема с работой источника в режиме холостого хода XX (разомкнутая схема, или схема без нагрузки), б) схема с работой источника в режиме короткого замыкания $KЗ$ (нулевая нагрузка), в) схема с работой источника на ненулевую нагрузку ($R_H \neq 0$)

Вектор эдс \vec{E} всегда направлен против вектора напряжения U : эдс разделяет и перемещает положительные заряды внутри источника в направлении более положительного потенциала (от «минуса» к «плюсу»), а напряжение, наоборот, - в проводнике в сторону более отрицательного потенциала (от «плюса» к «минусу»), т.е. ток i в проводнике течет от «плюса» к «минусу» (в металлическом проводнике движение реальных электрических зарядов - электронов - происходит в обратном направлении). Величину эдс источника определяют как электрическое напряжение на его зажимах при разомкнутой внешней цепи, т.е. в режиме холостого хода генератора, когда ток в цепи равен нулю (это справедливо при отсутствии или малости тока утечки через среду, окружающую источник эдс): $\vec{E} = -U_{XX}$ (рис.2.2.1,а).

Если эдс источника не меняется во времени, то в проводнике устанавливается **постоянный электрический ток**, а если меняется - **переменный электрический ток**.

Постоянный электрический ток - это ток, сила и направление которого в проводнике не изменяется в течение определенного времени

Количественно постоянный электрический ток i характеризуется скалярной величиной - **силой электрического тока** I и векторной величиной - **плотностью электрического тока** j . Единицей измерения силы тока в СИ является **ампер (А)** - сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н *. Согласно (2.1.2), $i = I = q/t$, и при токе в 1 А через поперечное сечение проводника в 1 с проходит 1 Кл электрического заряда (иногда кулон называют **ампер-секундой**, на практике используют и такую единицу заряда, как **ампер-час**: $1 \text{ А} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Кл}$). **Плотность электрического тока** – это векторная характеристика тока, равная по модулю электрическому заряду, проходящему за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению тока.

* В параграфе 2.1 показано, что два неподвижных заряда в 1 Кл каждый взаимодействуют на удалении в 1 м с силой $9 \cdot 10^9$ Н. Может возникнуть вопрос: почему же сила взаимодействия токов при прохождении через поперечное сечение проводников заряда 1 Кл/с столь ничтожна? Дело в том, что в проводнике заряды электронов скомпенсированы противоположными зарядами ионов кристаллической решетки (считается, что проводники, несмотря на прохождение через них токов, электрически нейтральны [2.6]), и взаимодействие двух параллельных проводников с токами обуславливается не электрическими, а **магнитными силами** (см. следующий параграф).

Если плотность заряда (заряда в единице объема проводника) обозначить через ρ , то плотность тока равна $j = \rho \cdot v$ (в СИ $[A/m^2]$, в СГСЭ $[ед. СГСЭ_q/cm^2]$), где v – **средняя скорость направленного движения заряженных частиц**. При равномерном распределении плотности тока по сечению проводника сила тока в нем равна $I = j \cdot S = q_0 n v S$, где q_0 - заряд частицы, n - число частиц в единице объема, S - площадь поперечного сечения проводника. Если через любое сечение проводника в единицу времени проходит одинаковое количество

электричества, то такой ток называют *установившимся*, или *стационарным*. Постоянный ток – это всегда установившийся ток.

При прохождении электрического тока в проводнике последний оказывает через свои связанные заряды электрическое и механическое *противодействие* упорядоченному, направленному движению свободных носителей зарядов, отклоняя их от этого движения, рассеивая и заставляя перемещаться хаотически при столкновениях со связанными зарядами (этот процесс аналогичен трению среды, тормозящему движению тел в ней). Например, в металлических проводниках рассеяние носителей заряда - *электронов проводимости* - происходит при их столкновениях с положительными ионами кристаллической решетки, находящимися в режиме тепловых колебаний, и с такими неоднородностями, как примесные атомы и дефекты решетки. При этом рассеяние зависит от температуры проводника и при ее уменьшении до значений, близких к *абсолютному нулю* ($T=-273,16^{\circ}K$), когда тепловые колебания ионов решетки практически исчезают, полностью определяется только самой кристаллической структурой проводника. В таком состоянии некоторые металлы и сплавы резко, в миллиарды раз уменьшают свое противодействие движению носителей зарядов, проявляя свойство *сверхпроводимости* [2.5].

Для характеристики величины проводимости проводников используют такие физические величины, как *электрическое сопротивление* и *электрическая проводимость* (*электропроводность*).

Электрическое сопротивление - это физическая величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи прохождению через них электрического тока

Электрическое сопротивление проводника, вследствие рассеяния и определенной хаотичности перемещения носителей заряда, приводит к переходу электрической энергии тока *в форму тепловой энергии* (в сверхпроводниках выделения теплоты не происходит). В этом смысле проводник можно рассматривать как преобразователь электрической энергии в тепловую энергию (электрическая энергия может быть преобразована и в другие виды энергии – химическую, механическую, световую и т.д.). Единицей сопротивления в *СИ* является **ом (Ом)** - *сопротивление проводника, между концами которого при силе тока 1А возникает напряжение 1В* ($1\text{Ом}\approx 1,11\cdot 10^{12}\text{ед.СГСЭ}$).

Проводники, поперечные размеры которых малы по сравнению с их длиной, называют *линейными* (к ним, в частности, относят проволоку, провода, кабели, шины и т.п.). Для однородного по составу линейного проводника при постоянном его сечении $S[\text{м}^2]$ и длине $L[\text{м}]$ сопротивление равно $R=\rho\cdot L/S$, где ρ [$\text{Ом}\cdot\text{м}^2/\text{м}=\text{Ом}\cdot\text{м}$] (в технике часто используется для ρ единица $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}=10^{-6}\text{Ом}\cdot\text{м}$) - *удельное электрическое сопротивление* материала проводника, т.е. сопротивление цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади поперечного сечения $S=\pi r^2=\pi d^2/4=1$, где r - радиус, а d - диаметр проводника.

Физическую величину, обратную электрическому сопротивлению и количественно характеризующую способность тела пропускать электрический ток под действием электрического поля, называют электропроводностью. Ее единица измерения - **сименс (См)**: $\text{См}=\text{Ом}^{-1}$. Физическую величину, обратную удельному сопротивлению, называют *удельной электропроводностью* $\sigma=1/\rho$ [$1/\text{Ом}\cdot\text{м}$, или $\text{См}/\text{м}$].

На чертежах электрических схем (под электрической схемой понимают как саму схему, собранную из реальных электрических элементов – например, резисторов, конденсаторов, так и чертеж или рисунок этой схемы в виде общепринятых графических элементов - образов реальных элементов) электрическое сопротивление проводника или участка электрической цепи принято изображать в виде *элемента сопротивления* (*резистора*), который распределенное в проводнике свойство противодействия

электрическому току отображает в виде локальной, сосредоточенной в элементе величины сопротивления R , в частности, в виде *сопротивления нагрузки* R_H (рис.2.2.1,б). При этом, идеализируя, полагают, что линии связи в схеме между полюсами (+) и (-) источника эдс и элементом сопротивления R_H являются идеальными проводниками, т.е. имеют нулевое сопротивление (в противном случае их сопротивление на схеме можно отобразить отдельными элементами или учесть в величине R_H).

Постоянный электрический ток в замкнутой электрической цепи подчиняется действию двух основных законов: *закону Ома* и *закону Джоуля-Ленца*.

Закон Ома устанавливает зависимость силы тока I от напряжения U между двумя любыми фиксированными точками (сечениями) проводника - *сила постоянного тока в электрической цепи прямо пропорциональна напряжению на участке цепи и обратно пропорциональна его сопротивлению*:

$$\begin{array}{l} \text{Закон Ома для участка цепи:} \\ I=U/R; U=R \cdot I; R=U/I \end{array} \quad (2.2.1)$$

где R - коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии, электрических свойств и температуры проводника - *омическое, или активное, сопротивление* данного участка проводника (это сопротивление отличается от других видов сопротивлений, которые появляются в цепях переменного тока, но для постоянного тока оно однотипно и поэтому о нем можно говорить без прилагательного).

В общем случае зависимость между физическими величинами I, U, R *нелинейная* (закон Ома в этом случае представляется в дифференциальном виде через малые приращения тока dI и напряжения dU), но на практике всегда можно в определенном интервале напряжений и токов считать ее *линейной*. Для металлов и их сплавов этот интервал практически неограничен. Если в (2.2.1) ток выразить через плотность как $I=jS$, а напряжение (разность потенциалов) – через напряженность поля как $U=E \cdot l$, то получим $j=E/\rho=\sigma E$, т.е. *плотность тока пропорциональна напряженности поля в данном сечении проводника*. Это выражение называют *законом Ома в дифференциальной форме*.

В форме (2.2.1) закон Ома справедлив для участков цепи, не содержащих эдс. При наличии же таких источников, их необходимо дополнительно учесть в *законе Ома для участка цепи с источниками эдс*. В разомкнутой цепи (режим холостого хода источника), как отмечалось выше, $-\vec{E}=U_{XX}$ (рис.2.2.1,а). Для замкнутой цепи, состоящей из источника эдс и сопротивления нагрузки (рис.2.2.1,в), имеет место равенство $-\vec{E}=\Delta U+U_H=\Delta U+R_H I$, где ΔU - падение напряжения в цепи на источнике эдс. В частности, при $R_H=0$ (режим короткого замыкания источника), $U_H=0$ и $-\vec{E}=\Delta U$ (рис.2.2.1,б).

В общем случае при $I \neq 0$ из-за того, что $\Delta U \neq 0$, всегда $|U_H| < |\vec{E}|$. Физический смысл неравенства $\Delta U \neq 0$ можно понять как уменьшение положительного и отрицательного потенциалов полюсов *источника эдс* из-за оттока положительных зарядов с полюса (+) и их поступления с током через внешнюю цепь на полюс (-). В результате ток уменьшает разность потенциалов U полюсов *источника эдс* (в случае холостого хода $U=U_{XX}$, в случае короткого замыкания $U=U_{KЗ}$, а в случае ненулевой нагрузки $U=U_H$), а эдс \vec{E} стремится ее восстановить, поддерживая тем самым ток в цепи. Рассмотренный процесс хорошо моделируется посредством *внутреннего сопротивления r_G источника эдс (генератора)*: через него, в случае замкнутой внешней цепи, протекает ток I , вызывающий падение на r_G напряжения $\Delta U=r_G I$ (рис.2.2.1,б,в). Вектор этого напряжения совпадает с направлением тока в цепи и вектором напряжения на нагрузке. С учетом этого можно записать в абсолютных величинах равенство, которое является формой закона Ома для простой замкнутой цепи:

$$\begin{array}{l} \text{Закон Ома для замкнутой цепи:} \\ \vec{E} = \Delta U + U_H = r_G I + R_H I = (r_G + R_H) \cdot I = R_{\Pi} I \end{array} \quad (2.2.2)$$

где R_{Π} - полное сопротивление замкнутой цепи, равное сумме сопротивлений нагрузки R_H и внутреннего сопротивления r_G генератора. В зависимости от соотношений между величинами R_H и r_G источник эдс классифицируют как **источник напряжения** (при $r_G \ll R_H$) или как **источник тока** ($r_G \gg R_H$). Действительно, в первом случае, согласно (2.2.2), $\vec{E} = R_H I = U_H$ и напряжение U_H не зависит от величины сопротивления нагрузки (определяется только величиной эдс), а во втором случае, наоборот, $\vec{E} = r_G I$ и уже ток I не зависит от величины сопротивления нагрузки (определяется только величиной эдс и внутренним сопротивлением источника эдс).

Обобщением закона Ома на случай разветвленной электрической цепи является **второе правило Кирхгофа** - в любом замкнутом контуре, выделенном в сложной цепи проводников, алгебраическая сумма падений напряжений $R_k I_k$, где R_k - сопротивление k -го участка, равна алгебраической сумме эдс \vec{E}_k в этом контуре.

Закон Джоуля-Ленца определяет количество теплоты, выделяемой током в проводнике, - в проводнике с сопротивлением R за время t при прохождении через него тока I выделяется количество теплоты Q прямо пропорциональное квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока:

$$\text{Закон Джоуля-Ленца:} \quad (2.2.3)$$

$$Q = a \cdot I^2 \cdot R \cdot t \text{ [Дж, кал]}$$

где a - коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единицы измерений: если I измеряется в амперах, R - в омах, t - в секундах, то при $a = 0,239$ Q выражается в калориях ($1 \text{ Дж} = 0,239 \text{ кал}$), а при $a = 1$ - в джоулях (см. параграф 1.2).

Поскольку $R \cdot I = U$ и $I \cdot t = q$ (2.1.2), то формулу (2.2.3) можно переписать в виде $Q = U \cdot q$ (см. 2.1.5), что является определением работы A , совершаемой электрическим полем при перемещении в нем электрического заряда q между разностью потенциалов U . В общем случае величина работы электрического тока может быть записана в виде:

$$\text{Работа (энергия) постоянного электрического тока:} \quad (2.2.4)$$

$$A(W) = I^2 \cdot R \cdot t = I \cdot U \cdot t = U^2 \cdot t / R = P \cdot t = U \cdot q \text{ [Дж]}$$

где $P = A/t$ - **электрическая мощность** электрического тока, т.е. работа, производимая током в единицу времени. В общем случае величина мощности электрического тока может быть записана в виде:

$$\text{Мощность электрического постоянного тока:} \quad (2.2.5)$$

$$P = I^2 \cdot R = I \cdot U = U^2 / R = U \cdot q / t \text{ [Вт]}$$

Единицей измерения мощности в СИ является **ватт (Вт)** - 1 Вт равен работе в 1 Дж, выполняемой за 1с. Производные этой единицы - киловатт (кВт), мегаватт (МВт), гигаватт (ГВт): $1 \text{ ГВт} = 10^9 \text{ Вт} = 10^6 \text{ кВт} = 10^3 \text{ МВт}$.

В предыдущем параграфе было показано, что электрические силы для неподвижных электрических зарядов превосходят во много раз гравитационные силы. Аналогично, рассмотрим соотношения между электрической энергией и механической (кинетической) энергией движущихся зарядов.

Пример 2.2.1[2.2, 2.7]. Пусть в медном проводнике длиной $l = 1 \text{ м}$ сечением $S = 1 \text{ мм}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2$ (объемом 10^{-6} м^3) течет постоянный ток силой $I = 1 \text{ А}$ (рис.2.2.2). Можно принять, что на каждый атом меди в проводнике имеется один электрон проводимости (медь одновалентна и ее внешний электрон наиболее слабо связан с атомом, что обеспечивает меди высокую электропроводность). Относительная атомная масса меди равна 63, т.е. на 63 г меди приходится $6 \cdot 10^{23}$ электронов проводимости (число Авогадро $N_A = 6,022045 \cdot 10^{23}$ - одна из фундаментальных постоянных, число атомов в моле простого вещества) или около 10^{25} электронов/кг (с

учетом массы электрона $m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$). При удельной плотности меди $8,9 \text{ г/см}^3$ в ее 1 м^3 содержится $8,9 \cdot 10^{28}$ электронов проводимости.

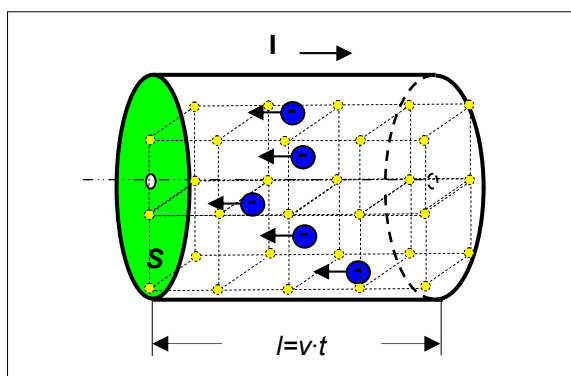


Рис.2.2.2

Проводник длиной l , сечением S со свободными носителями зарядов e^-

Если средняя скорость электронов в направлении тока (в отличие от их хаотических, тепловых движений в других направлениях) равна v , то за время t через отрезок проводника длиной $l=v \cdot t$ и сечением S пройдут все электроны выделенного объема, заряд которых определится соотношением $Snev t=It$, где n - количество электронов в указанном объеме проводника. Отсюда можно определить среднюю скорость движения электронов: $v=I/Sne=I[A] / (10^{-6} [м^2] \cdot 8,9 \cdot 10^{28} [e^-/м^3] \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} [Кл]) \approx 7 \cdot 10^{-5} [м/с] \approx 0,07 \text{ мм/с}$ (при токе в 100 А при том же сечении средняя скорость направленного движения электронов не превысит 7 мм/с). При скорости в 0,07 мм/с все электроны пройдут отрезок проводника примерно за 14286 с или 4 часа. На первый взгляд, такие цифры кажутся парадоксальными: ведь при включении тока он проявляет свое действие практически мгновенно во всех точках электрической цепи. Дело в том, что мгновенно при движении зарядов создается электромагнитное поле, которое передает свое силовое действие во все точки цепи со скоростью, близкой к скорости света, и поэтому на выходе цепи электроны приходят в упорядоченное движение почти одновременно с электронами на ее входе (следует различать понятия «скорость тока», понимаемое как скорость распространения электромагнитного поля и передачи электромагнитного взаимодействия, и «скорость движения носителей зарядов в токе»). Электрическую энергию тока $W_{эл}$ определим по (2.2.4) с учетом удельного сопротивления меди $\rho \approx 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$: $W_{эл}=I^2 \cdot R \cdot t=1 \cdot 0,0175 \cdot 14286 \approx 250 \text{ Дж}$. С учетом массы электрона кинетическая энергия всей совокупности из $8 \cdot 10^{28}$ электронов составит $W_{кин}=mv^2/2 \approx 9 \cdot 10^{31} \cdot 8,9 \cdot 10^{28} \cdot (7 \cdot 10^{-5})^2 \approx 3,9 \cdot 10^{10} \text{ Дж}$.

Из расчетов следует, что электрическая энергия электронов проводимости в миллиарды раз превышает их кинетическую энергию, т.е. последней, как и гравитационной энергией, в процессе передачи постоянного тока можно пренебречь. Таким образом, *основным источником электрической энергии являются силы электрического поля, изменяющие потенциальную энергию зарядов при их перемещении в поле и позволяющие эту энергию использовать в виде работы (в частности, в виде преобразования ее в тепловую энергию, выделяемую в проводнике).*

2.3 Электромагнитные взаимодействия движущихся зарядов и токов

Электромагнитное взаимодействие – это взаимодействие между неподвижными или движущимися электрическими зарядами и их полями (электрическими, магнитными или электромагнитными). В электростатике источник электрического поля – неподвижный электрический заряд, и действие его электрического поля на другой вносимый в поле электрический заряд полагают независимым от скорости движения последнего. *Электростатическое взаимодействие* между двумя или более неподвижными зарядами является частным случаем электромагнитного взаимодействия и подчиняется закону Кулона.

С помощью закона Кулона и принципа суперпозиции, зная заряды и их координаты, можно определить все электрические силы поля, а также найти состояние устойчивого распределения или равновесия системы электрических зарядов. Но этого закона недостаточно для описания электромагнитного взаимодействия между движущимися зарядами и их совокупностями (токами). Для этих целей используют понятия и законы *электродинамики*.

Классическая электродинамика основана на следующих представлениях [2.1-2.6]:

1) движущийся электрический заряд проявляет в окружающем его пространстве, помимо электрических (кулоновских) сил своего электрического поля, *дополнительные силы*, которые воздействуют на другие движущиеся электрические заряды, т.е. силы взаимодействия между движущимися электрическими зарядами отличаются от сил взаимодействия между неподвижными зарядами; эти дополнительные силы взаимодействия исторически названы *магнитными силами*;^{*}

2) движущиеся электрические заряды и токи создают в вакууме или среде вокруг себя *магнитное поле*, которое способно дистанционно воздействовать на другие движущиеся электрические заряды и токи; магнитное поле, подобно *электрическому полю*, рассматривается как материальный носитель соответствующих магнитных сил и магнитных взаимодействий;

3) постоянные электрические и магнитные поля всегда имеют своим источником электрические заряды, но переменные электрические и магнитные поля могут существовать в пространстве независимо от электрических зарядов (эти поля неразрывно связаны с *неподвижными* или *равномерно движущимися* зарядами, но *при ускорении* носителей зарядов «отрываются» от них, переходя в форму существования *электромагнитных волн*); *переменное магнитное поле* порождается не только движущимися электрическими зарядами, но и *переменными электрическими полями*, и в свою очередь, *порождает переменное электрическое поле*; такие поля не существуют обособленно, независимо друг от друга: бесконечный цикл преобразований переменных электрических и магнитных полей друг в друга представляет собой *электромагнитное поле*, которое распространяется в пространстве в виде *электромагнитных волн* и является носителем *электромагнитной энергии*;

4) скорость распространения электромагнитного поля и электромагнитного взаимодействия в вакууме равна скорости света $c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ (такова же скорость распространения и частных видов электромагнитного поля – электрического и магнитного); в среде, отличной от вакуума, скорость распространения электромагнитного поля меньше скорости света и зависит от свойств среды.

^{*}В природе не выявлены магнитные заряды и причиной существования как макроскопических, так и микроскопических магнитных сил признаны движущиеся электрические заряды и их электрические поля; магнитные силы, по существу, отражают специфические электрические взаимодействия движущихся электрических зарядов и являются удобной формой описания такого взаимодействия; возможно в будущем, по мере дальнейшего проникновения в сущность электричества, появится вместо косвенного способа описания электрических взаимодействий (через магнитные силы) иной прямой способ описания таких взаимодействий.

Приведенные положения позволяют объяснить множество фактов электромагнитного взаимодействия, установленных экспериментальным путем и широко используемых на практике: наличие разнообразных магнитных свойств у различных веществ (*диа-, пара- и ферромагнетизм*); взаимодействия магнитов (наличие у них противоположных полюсов, притяжение, отталкивание, вращение и ориентация магнитов в магнитном поле); возникновение вокруг проводника с током магнитного поля (магнитное действие тока, в отличие от теплового, химического, светового и других его эффектов, проявляется всегда и наиболее характерно для тока); тождественность магнитных свойств токов и магнитов (эта тождественность доказывает единую природу электрических и магнитных явлений); проявление в магнитном поле механических сил, действующие на другие магниты или

проводники с током, находящиеся в этом поле; явление электромагнитной индукции, разделяющей заряды и создающей токи в проводниках, движущихся в магнитном поле и т.д.

Простейшее действие магнитных сил можно проследить по движению двух одноименных электрических зарядов q_1 и q_2 , которые перемещаются параллельно друг другу на расстоянии r с одинаковой средней скоростью v относительно некоторой системы отсчета. При этом один движущийся заряд находится в электрическом поле второго движущегося заряда, а второй движущийся заряд находится в электрическом поле первого движущегося заряда (рис.2.3.1).

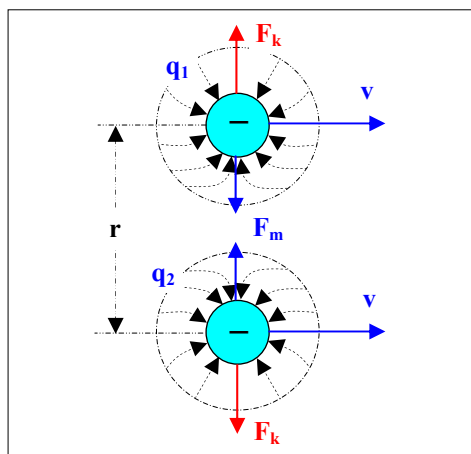


Рис.2.3.1 Проявление магнитных сил при взаимодействии двух одноименных параллельно движущихся электрических зарядов (взаимодействующие электрические поля зарядов ограничены на рисунке окружностями, внутри которых показаны фрагменты их деформированных от взаимного влияния радиальных силовых линий)

Кулоновские силы F_k неподвижных зарядов отталкивают заряды друг от друга в соответствии с законом Кулона (2.1.1), но при движении зарядов появляются дополнительные (магнитные) силы $F_m = F_k \beta^2$, которые уменьшают действие кулоновских сил.* В результате реальная сила взаимодействия движущихся зарядов равна $F_v = F_k - F_m = F_k(1 - \beta^2)$, где $\beta = v/c$ – отношение скорости движения зарядов к скорости света в вакууме (скорости передачи электромагнитного взаимодействия) [2.2,2.6]. Если скорость движения зарядов $v=c$, то $\beta=1$ и $F_v=0$, т.е. заряды, движущиеся со световой скоростью, вообще перестают взаимодействовать друг с другом. Если скорости обоих зарядов в системе отсчета равны нулю $v=0$, т.е. заряды неподвижны, то $\beta=0$, $F_v=F_k$ для каждого заряда и магнитное взаимодействие между ними отсутствует. Оно исчезает и в том случае, когда равна нулю скорость только одного из зарядов, т.е. магнитное взаимодействие движущегося заряда с другим неподвижным в данной системе отсчета зарядом отсутствует. Таким образом, магнитные силы зависят от скоростей движения зарядов и могут быть различными как по модулю, так и по направлению.

*Важно отметить, что с позиции ньютоновской механики, в которой все взаимодействия и их силы связаны только с ускорениями (второй закон динамики – $F=am$), не удастся объяснить происхождение магнитных сил. Согласно этой теории не должно быть различий между силами, действующими между неподвижными или движущимися равномерно зарядами (первый закон динамики). Различия в таких силах объясняет специальная теория относительности [2.2].

При малой скорости движения отдельных свободных зарядов этими силами можно пренебречь и все расчеты вести по формулам электростатики (например, при $v=7 \cdot 10^3$ м/с – см. пример 2.2.1 - получим $\beta^2 \approx 5,4 \cdot 10^{-22}$, т.е. $F_m \approx (5,4 \cdot 10^{-22} F_k) \ll 1$ и $F_v \approx F_k$: таким образом, если гравитационные силы примерно на сорок порядков слабее электрических, то магнитные слабее электрических примерно на двадцать порядков). Но в том случае, когда

квазисвободные заряды (например, электроны) движутся в проводнике, то электрические силы их взаимодействия *скомпенсированы связанными зарядами противоположного знака самого проводника* (например, положительными ионами кристаллической решетки в металлическом проводнике). При этом обнаруживается, пусть и весьма слабое по сравнению с кулоновскими силами, но *нескомпенсированное действие магнитных сил - именно этим объясняются магнитные взаимодействия проводников с током, а также все иные случаи магнитных взаимодействий* [2.2]. Таким образом, вокруг движущихся электрических зарядов и проводников с токами возникает магнитное поле, которое через свои магнитные силы оказывает силовое воздействие на другие движущиеся электрические заряды или проводники с током, расположенные в этом поле.

Как электрическое поле в вакууме количественно характеризуют *вектором напряженности E* (обозначают иногда как H_E), а в среде, отличной от вакуума, - *вектором электрической индукции D* , так и магнитное поле соответственно характеризуют *вектором напряженности H* (обозначают еще как H_M) и *вектором магнитной индукции B* . Наглядно магнитное поле изображают *магнитными силовыми линиями*, в каждой точке которых положение вектора B или H совпадает с соответствующей касательной. Направленность этих векторов определяет *направление поля*. Направление магнитного поля для любого магнита или тока можно практически определить с помощью магнитной стрелки: *в любой точке поля оно совпадает с направлением северного конца стрелки, помещенной в эту точку* (в магнитном поле Земли северный конец магнитной стрелки указывает на южный магнитный полюс планеты, расположенный в северном полушарии).

В отличие от электрических силовых линий, которые всегда направлены от положительных электрических зарядов к отрицательным или обрываются в пространстве, *силовые линии магнитного поля всегда замкнуты на себя, т.е. не имеют начала и конца* (этот факт еще раз свидетельствует об отсутствии магнитных зарядов и электрических истоках магнитного поля). В атомах и молекулах вещества силовые линии их элементарных круговых токов (токов Ампера), охватывая снаружи эти токи, замыкаются на их противоположных плоскостях, из которых одни, в зависимости от направления токов, соответствуют *северному*, а другие - *южному* полюсу магнита (токи Ампера, как и виток с током, эквиваленты коротким магнитам - *магнитным лепесткам*). *Поле магнита в целом образуется как результат суперпозиции магнитных полей ориентированных одинаковым образом элементарных токов*. Как нельзя отделить одну сторону плоскости кругового тока от другой, так же нельзя отделить и один полюс магнита от другого или «разорвать» силовые линии поля, соединяющие эти стороны-полюса. Характерные конфигурации некоторых часто встречающихся магнитных полей приведены на рис. 2.3.2.

Силовые линии и векторы магнитной индукции между плоскими полюсами постоянного магнита (рис.2.3.2,а) перпендикулярны этим полюсам, а *направление их исторически принято от северного полюса магнита N к южному S* , т.е. совпадает с направлением магнитной стрелки (силовые линии магнита продолжают и замыкаются на себя внутри тела магнита). Магнитное поле между плоскими полюсами постоянного изотропного магнита, так же как и поле внутри *соленоида* - цилиндрической катушки с большим числом витков проволоки, намотанной на каркас вплотную виток к витку (рис.2.3.2,д), является *однородным*, поскольку имеет во всех точках, за исключением краев торцов, не только одинаковое направление, но одну и ту же величину вектора индукции.

Силовые линии движущегося электрического заряда (рис.2.3.2,б) и линейного тока (рис.2.3.2,в) представляют собой правильные концентрические окружности, а витка с током (рис.2.3.2,г) – деформированные концентрические окружности, сжатые внутри и растянутые вне витка, пронизывающие плоскость витка и охватывающие собой каждый его участок по всей длине витка. Как магнитное поле тока есть результат суперпозиции полей, создаваемых отдельными движущимися электрическими зарядами, так и магнитное поле соленоида

можно рассматривать как результат суперпозиции полей, создаваемых отдельными рядом находящимися витками тока.

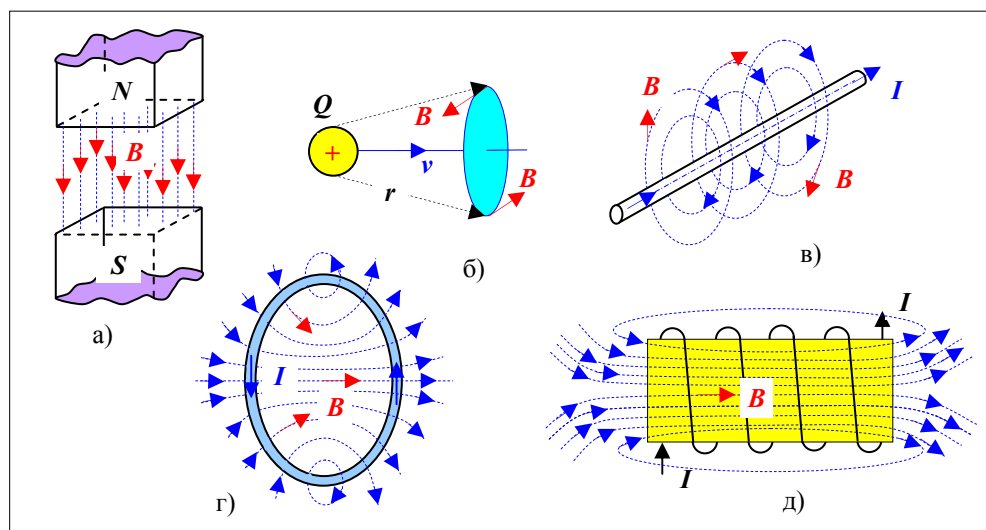


Рис.2.3.2 Силовые магнитные линии и векторы магнитной индукции B для постоянного магнита (а), движущегося электрического заряда (б) и проводников с током различной конфигурации: линейного проводника с током (в), витка с током (г) и соленоида (д)

В параграфе 2.1 напряженность электрического поля определялась как механическая сила, действующая на единичный неподвижный электрический заряд в данной точке поля.* Аналогичный подход для определения напряженности магнитного поля неприемлем, во-первых, из-за отсутствия магнитных зарядов и, во-вторых, из-за того, что свое действие магнитное поле оказывает только на движущиеся электрические заряды (токи) или тела, обладающие магнитным моментом, - *магнитные мишени*. В качестве таких мишеней, предназначенных для определения сил магнитного поля, могут использоваться как отдельные движущиеся единичные заряды, так и металлические проводники с током в виде линейных проводников единичной длины или в виде плоского контура (рамки) с единичным магнитным моментом.** Поскольку в последних случаях ток движется в физической среде проводника, отличной от вакуума, то для магнитного поля его основной силовой характеристикой выбирают не напряженность, а магнитную индукцию (напряженность определяют через магнитную индукцию, хотя, в принципе, возможно и обратное определение).

* Для установления количественной меры напряженности электрического или магнитного полей можно использовать любые их проявления (тепловые, химические, световые и т.п.), но исторически наиболее удобным способом определения меры признали их механические действия.

**В прошлом при определении напряженности магнитного поля использовали закон Кулона, имеющий для магнитного поля вид: $F=k \cdot M \cdot m / r^2$, где M, m рассматривались как «магнитные массы», «количество магнетизма» или «точечные магнитные полюса» - аналоги несуществующих магнитных зарядов [2.5]. В СГСМ принималось $k=1$ и единица «количества магнетизма» определялась как такое количество, которое действует на равное ему и расположенное на расстоянии 1 см «количество магнетизма» с силой в 1 дину. Тогда $H=F/m$, т.е. напряженность H определялась как сила, с которой магнитное поле действует на «количество магнетизма» $m=1$ (единицу напряженности магнитного поля, определенную таким образом, назвали эрстедом).

В зависимости от вида магнитной мишени, в СИ используют три варианта определения вектора магнитной индукции B [2.6].

Вектор магнитной индукции B - это вектор, модуль которого равен максимальной силе F , действующей на движущийся с единичной скоростью ($v=1\text{м/с}$) точечный положительный единичный ($q=1\text{Кл}$) электрический заряд q : $B=F/(q \cdot v)$ [Тл] (в СИ)

(2.3.1)

Как отношение F/q в случае электрического поля приводит силу к удельной электрической силе, т.е. относящейся к единичному заряду, – напряженности электрического поля, так и отношение $F/(qv)$ приводит силу F к удельной магнитной силе, т.е. относящейся к единичному заряду, движущемуся с единичной скоростью, – магнитной индукции. Силу, действующую на движущийся электрический заряд со стороны магнитного поля, называют силой Лоренца (см. ниже).

Единица магнитной индукции в СИ – **тесла (Тл)**. Магнитная индукция величиной в 1Тл – это такая индукция, которая действует с силой в 1Н на единичный заряд, движущийся с единичной скоростью перпендикулярно вектору индукции. Величина индукции в 1Тл – это большая величина: самые сильные в мире искусственные магниты имеют магнитную индукцию, не превышающую несколько десятков Тл . На практике чаще всего имеют дело с магнитными полями, измеряемыми в миллитеслах: $1\text{мТл}=10^{-3}\text{Тл}$. Из формулы (2.3.1) следует, что $1\text{Тл}=1\text{Н}/(\text{Кл}\cdot\text{м}/\text{с})=1\text{Н}/\text{А}\cdot\text{м}$, и индукцию в 1Тл можно по-другому определить через силу в 1Н , действующую на единичный элемент линейного тока, т.е. отрезок проводника длиной 1м с током в 1А . Единица магнитной индукции в абсолютной электромагнитной системе единиц СГСМ – **гаусс (Гс)**: $1\text{Гс}=10^{-4}\text{Тл}=10\text{мТл}$.

Направление вектора \mathbf{B} определяется **векторным произведением $\mathbf{F}\times\mathbf{v}$** (векторное произведение есть вектор, направленный перпендикулярно к обоим векторам сомножителей и совпадающий с направлением поступательного движения правого винта при его повороте от направления первого вектора ко второму на угол, меньший π) или **по правилу левой руки**: если положить левую ладонь вдоль направления тока так, чтобы линии магнитного поля, т.е. магнитной индукции, входили в ладонь, то отставленный в сторону большой палец укажет направление силы, действующей на ток (рис.2.3.3,а). Эти правила применимы как для прямолинейного движения электрических зарядов (линейных токов), так и для криволинейного движения (проводников нелинейной формы). В последнем случае их используют для малых участков элементов тока, которые можно условно считать линейными.

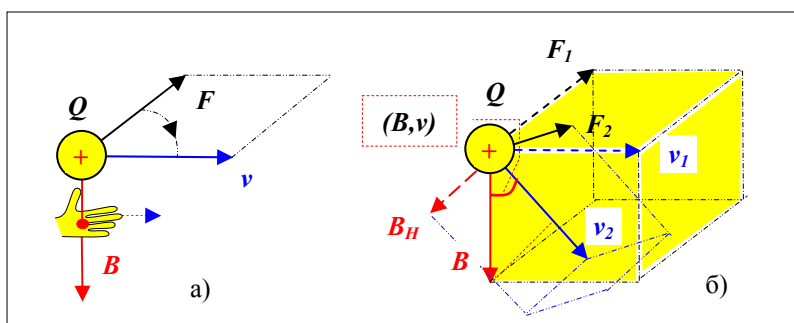


Рис.2.3.3 Направления векторов действующей силы \mathbf{F} и магнитной индукции \mathbf{B} в магнитном поле: а) при движении положительного электрического заряда со скоростью \mathbf{v} в направлении, перпендикулярном вектору индукции \mathbf{B} , б) в направления под углом к вектору индукции \mathbf{B}

Для электрического поля направление вектора напряженности E или электрической индукции D совпадает с направлением силы, действующей на электрический заряд в поле. Для магнитного же поля, как следует из приведенных правил определения направления силы, *магнитная сила F , действующая на движущийся в этом поле электрический заряд или неподвижный проводник с током, хотя и определяет модуль вектора магнитной индукции, не совпадает с направлением вектора индукции B , а всегда направлена перпендикулярно к нему.* В общем случае, когда вектор магнитной индукции B составляет с вектором средней скорости движения зарядов v или с направлением линейного проводника Δl некоторый угол (B, v) или $(B, \Delta l)$, для определения действия магнитного поля на магнитную мишень необходимо использовать *нормальную составляющую B_H вектора индукции B , равную по модулю $B_H = B \cdot \sin(B, v)$ или $B_H = B \cdot \sin(B, \Delta l)$* (рис.2.3.3, б).

Если движение заряда или размещение проводника с током происходит вдоль направления магнитного поля, т.е. $\sin(B, v) = \sin(B, \Delta l) = 0$, то $B_H = 0$ и соответственно $F = 0$, т.е. поле не действует на мишень. В этом случае максимальное значение имеет *тангенциальная составляющая вектора индукции $B_T = B \cdot \cos(B, v) = B \cdot \cos(B, \Delta l) = B$* , не оказывающая магнитного воздействия. Максимальное значение сила F имеет в том случае, когда движение заряда или размещение проводника с током в магнитном поле происходит перпендикулярно вектору магнитной индукции, т.е. $\sin(B, v) = \sin(B, \Delta l) = 1$ и $B_H = B$. Таким образом, из определения (2.3.1) следует, что для получения максимальной силы все три вектора B, F, v должны быть *взаимноперпендикулярны*.

Второе определение вектора магнитной индукции рассматривает в качестве магнитной мишени не отдельный движущийся электрический заряд, а элемент линейного тока, и, по сути, эквивалентно предыдущему определению:

**Вектор магнитной индукции B - это вектор, модуль которого равен максимальной силе F , действующей на единичный элемент тока:
 $B = F / (I \cdot \Delta l) [Тл]$ (в СИ)**

(2.3.2)

Направление вектора B определяется аналогично как векторное произведение $F \times j$ (где j - вектор плотности тока) или по правилу левой руки. Очевидно, что при равномерном распределении плотности тока по сечению проводника, направления векторов v (средней скорости движения зарядов) и j совпадают.

Третье определение вектора магнитной индукции связано с понятием *магнитного момента контура с током*. На плоский контур тока I малых размеров сечением S , помещенный в однородное магнитное поле с индукцией B , действует *механический момент M пары сил F : $M = I \cdot S (\mathbf{n} \times \mathbf{B}) = I \cdot S \cdot B \cdot \sin(\mathbf{n}, \mathbf{B})$* [$A \cdot m^2 \cdot Tл = A \cdot m^2 \cdot H/A \cdot m = H \cdot m$], где \mathbf{n} – *единичный вектор нормали к плоскости S* (рис.2.3.4). Векторную величину $\mathbf{p}_m = I \cdot S \cdot \mathbf{n}$ [$A \cdot m^2$] называют *магнитным моментом контура* (его модуль равен $p_m = I \cdot S$). Направление магнитного момента определяется по *правилу правого винта (правилу буравчика)*: *при вращении винта по направлению тока в контуре его поступательное движение совпадает с единичным вектором нормали \mathbf{n} и направлением \mathbf{p}_m* . Максимальное значение $M = I \cdot S \cdot B$ момент сил M имеет, когда $\sin(\mathbf{n}, \mathbf{B}) = 1$, т.е. \mathbf{n} перпендикулярен B и плоскость контура параллельна направлению магнитного поля. Очевидно, что $M = 0$, если $\sin(\mathbf{n}, \mathbf{B}) = 0$, т.е. векторы B и \mathbf{n} параллельны и плоскость контура перпендикулярна направлению поля.

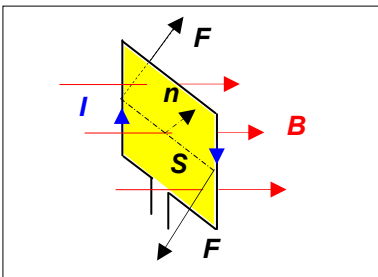


Рис.2.3.4 Направления векторов действующей силы F и магнитной индукции B в магнитном поле для плоского контура с током, обладающему механическим моментом M

Третье определение вектора индукции использует в качестве магнитной мишени плоский контур с током и имеет вид:

Вектор магнитной индукции B - это вектор, модуль которого равен максимальному механическому моменту, действующему на плоский контур тока с единичным магнитным моментом: $B=M/(I \cdot S)[Тл]$ (в СИ) (2.3.3)

Направление вектора B определяют векторным произведением $M \times n$, а вектора n – по правилу правого винта. Для уяснения характера действия магнитных сил на контур с током рассмотрим случай размещения в однородном магнитном поле прямоугольного контура. Пусть плоскость этого контура будет изначально установлена параллельно направлению поля так, чтобы первая пара противоположных сторон контура была бы параллельна, а вторая перпендикулярна направлению поля. Из такого положения максимальный механический момент M сил поля, действуя на вторую пару проводников контура (действие поля на первую пару сторон равно нулю), развернет его, установив плоскость контура перпендикулярно направлению поля. Очевидно, что в таком положении $M=0$, т.е. контур находится в устойчивом состоянии равновесия, несмотря на то, что на все его проводники продолжают действовать максимальные силы поля (все стороны контура перпендикулярны направлению поля), растягивающие его плоскость снаружи. В неоднородном поле такой контур продолжит перемещение в направлении действия большей силы.

Индукция магнитного поля, создаваемого проводником с током, всегда пропорциональна току $B \sim I$ и в каждой точке поля сложным образом зависит от размеров и формы проводника. В четырех рассмотренных выше случаях простейших источников магнитного поля (рис.2.3,2, а,б,в,г) она равна в СИ [2.6]:

$$B_Q = \mu_0 Q (v \times r) / (4\pi r^3), \quad (2.3.4)$$

$$B_L = \mu_0 I / (2\pi r), \quad (2.3.5)$$

$$B_O = \mu_0 I / (2R), \quad (2.3.6)$$

$$B_C = \mu_0 w I / l, \quad (2.3.7)$$

где B_Q – индукция движущегося заряда, B_L – индукция линейного тока, B_O – индукция в центре витка, B_C – индукция в точках на оси соленоида, r - радиус-вектор точки поля или расстояние r по нормали от линейного проводника до точки поля, Q – движущийся электрический заряд как источник магнитного поля, v – скорость движения электрического заряда Q ($v \ll c$); I - ток как источник магнитного поля; R - радиус витка с током; w – количество витков соленоида; l - длина соленоида ($l \gg R$); μ_0 - магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость. Для примера, магнитная индукция в вакууме ($\mu=1$) при движении заряда $Q=1Кл$ со скоростью $v=7 \cdot 10^5$ м/с (см. пример.2.2.1) или линейном токе $I=1А$ на расстоянии $r=1см=10^{-2}м$ от заряда или проводника с током составит, согласно формулам (2.3.4) и (2.3.5), соответственно $7 \cdot 10^{-3}$ мТл и $2 \cdot 10^{-3}$ мТл.

Магнитная индукция B характеризует силовое действие магнитного поля в среде, которое складывается из действия *внешнего* по отношению к этой среде магнитного поля и *магнитного поля самой среды*, автономного или индуцируемого и изменяющегося под влиянием внешнего магнитного поля.* Внешнюю силовую составляющую магнитного поля, не зависящую от магнитных свойств среды, определяют количественно **вектором напряженности магнитного поля H** .

Вектор напряженности магнитного поля H - это вектор, который определяет в среде ту составляющую вектора магнитной индукции B , которая задается внешним магнитным полем и не зависит от магнитных свойств среды

Для напряженности магнитного поля можно было бы использовать те же определения (2.3.1) – (2.3.3), что и для магнитной индукции, но во избежание путаницы между этими понятиями напряженность принято определять через магнитную индукцию. Единица измерения \mathbf{H} в СИ – *ампер на метр [А/м]*, а в СГСМ - *эрстед (Э)*: $1\text{Э}=(1/4\pi)\cdot 10^3\approx 79,5775\text{ А/м}$. Как в электрическом поле единица его напряженности В/м характеризует единичную силу, действующую со стороны поля на единичный неподвижный заряд q , расположенный в данной точке поля, так и в магнитном поле единица его напряженности А/м определяет единичную силу, с которой поле действует на единичный элемент тока $I\Delta l$, расположенный в некоторой точке поля, удаленной от источников магнитного поля, в качестве которых выступают определенные токи. Например, для случая источника магнитного поля в виде линейного проводника с током напряженность в А/м будет в точках поля, радиально удаленных от проводника на $l\text{ м}$ при токе в проводнике $I=2\pi A\approx 6,28A$ или удаленных на расстояние $1/2\pi\approx 0,16\text{ м}$ при токе $I=1A$, что следует из формулы (2.3.5) с учетом (2.3.16). В общем случае напряженность магнитного поля, как и его индукция, пропорциональна току источника поля $H\sim I$.

В вакууме векторы \mathbf{H} и \mathbf{B} (для вакуума индукцию обозначают иногда как \mathbf{B}_0) совпадают по направлению, а для СГСМ - и по величине: $\mathbf{H}=\mathbf{B}_0$ ($1\text{Э}=1\text{Гс}$). В СИ $\mathbf{H}[\text{А/м}]$ отличается по величине от $\mathbf{B}_0[\text{Тл}]$ из-за размерного коэффициента пропорциональности μ_0 :

$$\mathbf{H}=\mathbf{B}_0, \text{ (в вакууме, СГСМ)} \quad (2.3.8)$$

$$\mathbf{H}=\mathbf{B}/\mu_0 \text{ или } \mathbf{H}=\mathbf{B}_0/\mu_0, \text{ (в вакууме, СИ)} \quad (2.3.9)$$

где μ_0 – *магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума)*, $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}\text{ Гн/м}\approx 1,2566\cdot 10^{-6}\text{ Гн/м}$. Например, при $B_0=2\cdot 10^{-3}\text{ Тл}$ напряженность магнитного поля равна $H=2\cdot 10^{-6}/1,2566\cdot 10^{-7}\approx 15,9[\text{А/м}]$.

*Поскольку каждая физическая среда содержит в своем составе движущиеся электрические заряды, постольку она обладает присущими ей изначально магнитными свойствами, которые могут изменяться под воздействием внешнего (намагничивающего) магнитного поля. По магнитным свойствам все вещества разделяют на три вида: *диамагнетики* (у них вектор магнитной индукции собственного магнитного поля ориентируется противоположно вектору магнитной индукции внешнего поля, $\mu\leq 1$, $\kappa<0$; к этим веществам относятся медь, серебро, золото, цинк, инертные газы, вода и т.д.), *парамагнетики* (у них вектор индукции собственного магнитного поля ориентируется одинаково с вектором магнитной индукции внешнего поля, $\mu\geq 1$, $\kappa>0$; к этим веществам относятся алюминий, платина, азот, воздух и т.д.) и *ферромагнетики* (у них $\mu\gg 1$; к этим веществам относятся железо, никель, кобальт, некоторые сплавы). Для диамагнетиков и парамагнетиков зависимость их намагничивания от напряженности внешнего поля носит линейный, а для ферромагнетиков - нелинейный характер (эта зависимость задается кривой намагничивания).

В среде, отличной от вакуума, магнитная напряженность \mathbf{H} определяет тот вклад в магнитную индукцию \mathbf{B} , который дают внешние относительно среды источники магнитного поля. Для такой среды индукция определяется согласно формулам:

$$\mathbf{B}=\mathbf{H}+4\pi\mathbf{J}, \text{ (в среде, СГСМ)} \quad (2.3.10)$$

$$\mathbf{B}=\mathbf{B}_0+\mu_0\mathbf{J}=\mu_0\mathbf{H}+\mu_0\mathbf{J}=\mu_0(\mathbf{H}+\mathbf{J}), \text{ (в среде, СИ)} \quad (2.3.11)$$

где \mathbf{J} (иногда обозначают как \mathbf{M}) - *намагниченность среды*, или *магнитный момент единицы объема среды*, - векторная величина, характеризующая вещество как источник магнитного поля. Магнитный момент равен векторной сумме магнитных моментов \mathbf{p}_i молекул в единичном объеме: $\mathbf{J}=(\sum\mathbf{p}_i)/\Delta V[\text{А}\cdot\text{м}^2/\text{м}^3=\text{А/м}]$ (единица измерения намагниченности аналогична единице измерения напряженности магнитного поля - $[\text{А/м}]$). В изотропной среде для статического магнитного поля

$$\mathbf{J}=\kappa\mathbf{H}, \quad (2.3.12)$$

где κ - магнитная восприимчивость среды, безразмерная величина, характеризующая связь намагниченности вещества с магнитным полем в этом веществе ($\kappa > 0$ или $\kappa < 0$ в зависимости от магнитных свойств среды). С учетом (2.3.12) формулы (2.3.10) и (2.3.11) можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi(\kappa\mathbf{H}) = \mathbf{H}(1 + 4\pi\kappa) = \mu\mathbf{H}, \quad (\text{в среде, СГСМ}) \quad (2.3.13)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \kappa\mathbf{H}) = \mu_0(1 + \kappa)\mathbf{H} = \mu_0\mu\mathbf{H}, \quad (\text{в среде, СИ}) \quad (2.3.14)$$

где $\mu = (1 + 4\pi\kappa)$ в СГСМ или $\mu = (1 + \kappa)$ в СИ - относительная магнитная проницаемость среды, безразмерная физическая величина, характеризующая изменение магнитной индукции \mathbf{B} среды при воздействии на нее внешнего магнитного поля напряженностью \mathbf{H} . Для вакуума $\kappa = 0$ и $\mu = 1$. С учетом формул (2.3.13) и (2.3.14), для изотропной среды напряженность магнитного поля определится в общем случае как:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu, \quad (\text{в среде, СГСМ}) \quad (2.3.15)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu\mu_0. \quad (\text{в среде, СИ}) \quad (2.3.16)$$

Значения напряженности магнитного поля для источников, приведенных на рис.2.3.2 (б-д), можно определить соответственно по формулам (2.3.4)-(2.3.7), разделив их левые и правые части на сомножитель $\mu\mu_0$.

Механические действия магнитного поля на движущиеся заряды и токи в общем случае описываются силой Лоренца и законами Ампера и Био-Савара-Лапласа.

Сила Лоренца – это та сила, понятие о которой уже использовалось в первом определении вектора магнитной индукции (2.3.1).

<p>Сила Лоренца – это магнитная сила F_L, действующая со стороны магнитного поля с индукцией \mathbf{B} на движущийся в этом поле со скоростью \mathbf{v} электрический заряд Q: $F_L = Q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) [H]$ (в СИ)</p>	(2.3.17)
--	----------

Сила Лоренца, в отличие от потенциальных сил электрического поля, которые определяются только координатами взаимодействующих точек, зависит от величины и направления скорости движения электрического заряда в магнитном поле. Направление действия этой силы на заряд, находящийся в данной точке поля, перпендикулярно вектору магнитной индукции (определяется по правилу векторного произведения или правилу левой руки), а модуль силы равен $F_L = Q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\mathbf{v}, \mathbf{B})$. Сила Лоренца имеет максимальное значение $F_L = Q \cdot v \cdot B$, если векторы \mathbf{v} и \mathbf{B} перпендикулярны, и нулевое значение, если они параллельны. Так как эта сила перпендикулярна скорости движению носителя заряда \mathbf{v} , то она не совершает работы по его перемещению в поле, не изменяет его энергии, а лишь искривляет траекторию движения частицы (в вакууме в постоянном однородном магнитном поле частица движется под влиянием силы Лоренца по винтовой линии, а в присутствии еще и электрического поля – по более сложной траектории).

В том случае, когда движение носителя заряда происходит в электромагнитном поле, то на него действуют обе составляющие этого поля: электрическая и магнитная. Поэтому в формуле силы необходимо учитывать воздействие на заряд как силы Лоренца F_L , так и электрической силы поля $F_E = Q \cdot E$: $F = F_E + F_L$. Формулу обобщенной силы Лоренца для электромагнитного поля записывают в виде:

$$\mathbf{F} = Q \cdot \mathbf{E} + Q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (\text{в СИ}) \quad (2.3.18)$$

$$\mathbf{F} = Q \cdot \mathbf{E} + c^{-1} \cdot Q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (\text{в СГСМ}) \quad (2.3.19)$$

где c – безразмерный коэффициент пропорциональности, равный скорости света $3 \cdot 10^{10} [см/с]$. Формулы (2.3.18), (2.3.19) являются важнейшими соотношениями электродинамики, связывающими уравнения электромагнитного поля с уравнениями движения носителей электрических зарядов.

Закон Ампера обобщает понятие силы Лоренца для проводника с током: действующая в магнитном поле на проводник с током сила (сила Ампера) равна векторной сумме сил Лоренца, действующих на движущиеся носители заряда (электроны) внутри проводника.

Закон Ампера определяет магнитную силу ΔF (силу Ампера), действующую со стороны магнитного поля с индукцией \mathbf{B} на элементарный отрезок $\Delta \mathbf{l}$ тонкого проводника с током I : $\Delta \mathbf{F} = I(\Delta \mathbf{l} \times \mathbf{B})$ [Н] (в СИ) (2.3.20)

Направление действия силы Ампера на отрезок линейного проводника с током, находящийся в данной точке поля, перпендикулярно вектору магнитной индукции (определяется по правилу векторного произведения или правилу левой руки), а модуль силы равен $F = I \Delta l \cdot B \cdot \sin(\Delta \mathbf{l}, \mathbf{B})$, где $I \Delta l$ – **элемент тока**. Направление $\Delta \mathbf{l}$ совпадает с направлением вектора плотности тока \mathbf{j} . Сила Ампера имеет максимальное значение $F = I \Delta l \cdot B$, если векторы $\Delta \mathbf{l}$ и \mathbf{B} перпендикулярны, и нулевое значение, если они параллельны. Закон Ампера используется, в частности, для нахождения, согласно определению единицы тока в СИ, силы взаимодействия двух параллельных элементов тока $I_1 \cdot l$ и $I_2 \cdot l$, находящихся на удалении a друг от друга (эти элементы тока притягиваются, если токи в них имеют одинаковое направление, и отталкиваются в противоположном случае): $F = \mu_0 \mu I_1 \cdot I_2 \cdot l / 2\pi a$.

Закон Био-Савара-Лапласа определяет, по аналогии с отдельным движущимся электрическим зарядом (формула 2.3.4), магнитную индукцию элемента тока во внешнем пространстве:

Закон Био-Савара-Лапласа – магнитная индукция \mathbf{B} элемента тока $I \Delta \mathbf{l}$ во внешнем пространстве от него на расстоянии радиуса-вектора \mathbf{r} равна: $\mathbf{B} = \mu_0 \mu I \cdot (\Delta \mathbf{l} \times \mathbf{r}) / (4\pi r^3)$ [Тл] (2.3.21)

Этот закон можно использовать для определения величины магнитной индукции не только от отдельного элемента тока, но от контуров с токами любой конфигурации. Для этого результирующая индукция в точке поля, создаваемого контуром с током, рассчитывается путем векторного суммирования индукций от всех элементов $\Delta \mathbf{l}_i$ этого контура ($i=1, 2, \dots, n$).

Из других понятий электродинамики, важных для дальнейшего понимания электрических процессов, отметим понятия **магнитного потока** и **магнитодвижущей силы**.

Магнитный поток Φ – это поток вектора магнитной индукции \mathbf{B} через какую-то поверхность площадью S , расположенную в пространстве магнитного поля. В случае однородного магнитного поля, вектор индукции которого \mathbf{B} перпендикулярен площадке S , магнитный поток равен $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$ и представляет собой вектор, совпадающий по направлению с вектором \mathbf{B} . Единицей магнитного потока в СИ является **вебер (Вб)**, его размерность – $[Вб = Тл \cdot м^2]$. В СГСМ единицей потока является **максвелл (Мкс)**, его размерность – $[Мкс = Гс \cdot см^2]$, а поскольку $1Тл = 10^4 Гс$ и $1м^2 = 10^4 см^2$, то $1Вб = 10^8 Мкс$.

В общем случае неоднородного магнитного поля и криволинейной поверхности S , магнитный поток $\Delta \Phi$ определяется для малого приращения поверхности ΔS как скалярное произведение векторов \mathbf{B} , \mathbf{n} и скаляра ΔS : $\Delta \Phi = \Delta S \cdot (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n})$, где \mathbf{n} – единичный вектор, нормальный к ΔS (полагается, что площадка ΔS плоская и в ее пределах магнитное поле однородно). Очевидно, что модуль магнитного потока равен $\Delta \Phi = \Delta S \cdot B \cdot \cos(\mathbf{B}, \mathbf{n})$, где $B \cdot \cos(\mathbf{B}, \mathbf{n})$ – проекция вектора \mathbf{B} на нормаль к площадке. Для определения полного магнитного потока через всю конечную поверхность S необходимо найти интеграл $\oint d\Phi dS$.

Магнитодвижущая сила (мдс) F (иногда ее называют **намагничивающей** силой) является магнитным аналогом эдс источника электрического поля для случая магнитного поля и определяет способность источника магнитного поля (тока) создавать магнитную индукцию и магнитные потоки в вакууме или иной среде. Она измеряется в СИ в **амперах (А)**, а в СГСМ – в **гильбертах (Гб)**: $1А = 0,4\pi \approx 1,2566 Гб$. В технике часто, особенно при использовании соленоидов и трансформаторов, мдс измеряют в **ампер-витках (ав)** как произведение силы тока I на количество витков w в обмотке, которая создает мдс: $F = I \cdot w$.

В таблице сведены воедино рассмотренные в данном параграфе магнитные величины, их единицы измерения и эквивалентные преобразования между единицами СИ и СГСМ.*

Таблица единиц измерения магнитных величин

Физическая величина	Системы единиц		Эквивалентность единиц
	СИ	СГСМ	
Магнитная индукция, В	тесла, Тл; <i>tesla, T</i> $1\text{Тл}=1\text{Н}/(\text{Кл}\cdot\text{м}/\text{с})=1\text{Н}/\text{А}\cdot\text{м}$	гаусс, Гс; <i>gauss, Gs</i>	$1\text{Тл}=10^4\text{Гс}$ $1\text{Гс}=10^{-4}\text{Тл}$
Магнитная напряженность, Н	ампер на метр, А/м	эрстед, Э; <i>oersted, Oe</i>	$1\text{Э}\approx 79,58\text{А}/\text{м}$ $1\text{А}/\text{м}=1,256\cdot 10^{-2}\text{Э}$
Магнитный поток, Ф	вебер, Вб; <i>weber, Wb</i> $1\text{Вб}=1\text{Тл}\cdot\text{м}^2$	максвелл, Мкс; <i>maxwell, Mx</i>	$1\text{Вб}=10^8\text{Мкс}$ $1\text{Мкс}=10^{-8}\text{Вб}$
Магнитодвижущая сила, F	ампер, А (ампер-виток, ав)	гильберт, Гб; <i>gilbert, Gb</i>	$1\text{А}=1,2566\text{Гб}$ $1\text{Гб}=0,7958\text{А}$

*Помимо систем СГСЭ и СГСМ, каждая из которых определяет как электрические, так и магнитные единицы, в электродинамике применяется симметричная (смешанная) СГС, или система единиц Гаусса, в которой используют из СГСЭ только электрические, а из СГСМ только магнитные единицы и полагают $\mu_0=1$, $\epsilon_0=1$. В настоящей работе СГСЭ и СГСМ рассматриваются как части системы единиц Гаусса.

2.4 Явление и закон электромагнитной индукции

Открытие в 1831г. явления и закона электромагнитной индукции стало началом новой эры в практическом освоении электрической энергии, создании электрических машин (генераторов, трансформаторов, двигателей) и в развитии теории электромагнетизма, включая теорию электромагнитного поля. Электромагнитная индукция позволила окончательно обосновать единство электрических и магнитных явлений: движущиеся электрические заряды оказались способны порождать магнитное поле и, наоборот, магнитное поле оказалось способно создавать электрический ток. Образно говоря, стало ясно, что «электричество создает магнетизм», а «магнетизм превращается в электричество».

Электромагнитная индукция – это возникновение эдс индукции \vec{E} в проводящем контуре, движущемся в постоянном магнитном поле или находящемся в переменном магнитном поле

Электрический ток, вызванный эдс индукции, назвали **индукционным током**. Механизм возникновения эдс индукции в линейном проводнике (проводящем контуре), движущемся в постоянном магнитном поле, объясняется действием силы Лоренца F_L (2.3.17)-(2.3.19) на электрические заряды в проводнике, так как движение проводника есть ни что иное, как движение составляющих его структуру положительных и отрицательных зарядов. Эта сила разделяет квазисвободные электрические заряды противоположного знака, находящиеся внутри проводника. При этом на одном, «минусовом» конце проводника появляется избыток отрицательных зарядов (электронов), который создает электрический потенциал ϕ^- , а на другом, «плюсовом» – их недостаток, или избыток нескомпенсированных положительных зарядов ионов кристаллической решетки проводника с потенциалом ϕ^+ (рис.2.4.1).

Поскольку эдс индукции перемещает положительные заряды внутри проводящего контура от меньшего (отрицательного) потенциала к большему (положительному), постольку численно ее можно определить как разность потенциалов $\vec{E}=\phi^--\phi^+$. Очевидно, что на концах разомкнутого контура она равна напряжению $U=\phi^+-\phi^-$, взятому с противоположным знаком: $\vec{E}=-U$. Внутри проводника напряжение U создает электростатическое кулоновское поле с напряженностью $E_K=F_K/q=U/l$, где l - длина проводника. В общем случае лоренцову силу в проводнике можно рассматривать как следствие действия некоторого стороннего электрического поля неэлектростатической природы с напряженностью $E_L=F_L/q$, направленной против E_K .

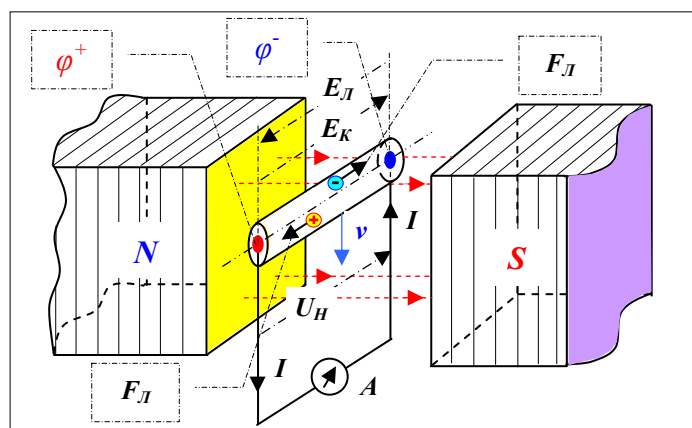


Рис.2.4.1 Электромагнитная индукция в линейном проводнике, движущемся в постоянном однородном магнитном поле перпендикулярно его силовым линиям со скоростью v (А -

При *разомкнутой* внешней цепи перемещение зарядов внутри проводника и повышение разности потенциалов U на его концах будет происходить только до тех пор, пока увеличивающаяся с ростом U электрическая сила поля F_K не уравнивает силу Лоренца F_L : $F_L = -F_K$ или $E_L = -E_K$. При *замыкании* концов проводника на внешнюю электрическую цепь в ней под действием U и кулоновского поля начнется движение электронов от потенциала ϕ^- к потенциалу ϕ^+ , т.е. возникнет индукционный ток I (его направление противоположно движению электронов). При этом из-за оттока электронов увеличится потенциал ϕ^- (станет более положительным), а из-за их притока уменьшится потенциал ϕ^+ , что снизит в целом разность потенциалов на концах проводника с U до U_H - величины падения напряжения на нагрузке внешней цепи (на рис.2.4.1 такой нагрузкой является измерительный прибор - амперметр). Соответственно уменьшится величина $E_K < E_L$ и сила Лоренца продолжит дальнейшее разделение противоположных зарядов в проводнике уже при установившемся индукционном токе I .

В общем случае сила Лоренца и напряженность стороннего поля зависят от индукции магнитного поля и скорости движения проводника (от значений этих векторов и их взаимного направления), но не зависят от того, замкнута или разомкнута внешняя электрическая цепь. Поэтому, если в разомкнутом проводнике $E_L = E_K$ и $U = \phi^+ - \phi^-$, то в замкнутой цепи $E_L = (E_K + \Delta E) > E_K$ и $U_H = U - \Delta U$, где ΔE - разность напряженностей стороннего и кулоновского электрических полей, а ΔU - падение напряжения на проводнике при индукционном токе $I \neq 0$, снижающее U до уровня U_H . Именно напряженность ΔE результирующего поля продолжит разделять заряды в проводнике в процессе прохождения индукционного тока по его внутренней и внешней цепи. Таким образом, пока проводник движется в магнитном поле, пересекая его силовые линии, на его концах будет поддерживаться определенная разность потенциалов U_H , а в самом проводнике и в подключенной к нему внешней цепи будет протекать индукционный ток I .

На практике для получения индукционного тока, вместо поступательного перемещения в магнитном поле линейного проводника, применяют проводящий контур в виде рамки, вращающийся в этом поле, - *индукционный контур* (рис.2.4.2). Почти вся электрическая энергия, вырабатываемая в современном мире, производится **электромагнитными, или индукционными генераторами**, т.е. электрическими машинами, использующими электромагнитную индукцию и индукционные контуры. Эти машины содержат вращающуюся часть с индукционным контуром (*ротор*), расположенный внутри неподвижной части (*статора*), создающей магнитное поле. Ротор генератора приводится во вращательное движение паровыми, газовыми, водяными или другими турбинами, а генератор преобразует механическую работу, передаваемую с турбины на вал ротора, в

электрическую энергию на своем выходе - на генераторных клеммах и во внешних электрических цепях, подключенных к этим клеммам.

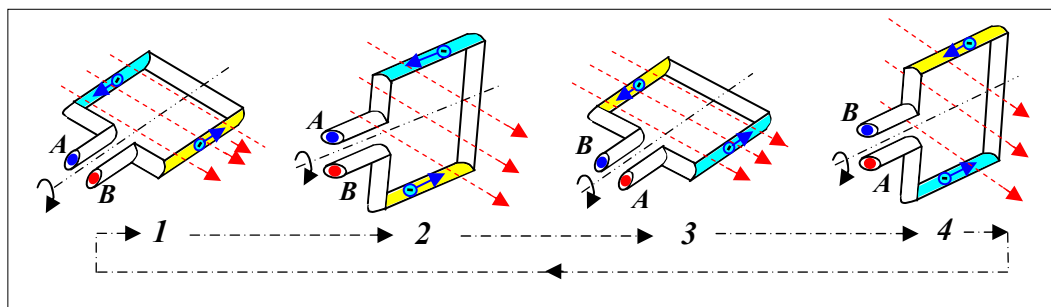


Рис.2.4.2 Вращение индукционного контура в однородном магнитном поле (1,2,3,4 – последовательные позиции контура в поле, различающиеся углом $\pi/2$ поворота контура по часовой стрелке; A,B –горизонтальные стороны и клеммы контура)

Как известно, не всякое перемещение электрического проводника в магнитном поле приводит к возникновению силы Лоренца: она проявляет себя лишь в том случае, если направления движения проводника и индукции магнитного поля не коллинеарны, т.е. когда проводник *пересекает силовые линии поля*. В общем случае движения в магнитном поле индукционного контура любой формы индукционный ток в нем возникает *только при изменении магнитного потока $\Delta\Phi$ через поверхность ΔS этого контура*. Если магнитный поток не изменяется, то нет и индукционного тока. Эта зависимость определяет следующую качественную формулировку **закона электромагнитной индукции**:

Закон электромагнитной индукции: при всяком изменении магнитного потока $\Delta\Phi$ через проводящий контур ΔS в этом контуре возникает электрический ток I

В предыдущем параграфе показано, что $\Delta\Phi = \Delta S \cdot (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n}) = \Delta S \cdot B \cdot \cos(\mathbf{B}, \mathbf{n})$, т.е. изменение магнитного потока $\Delta\Phi$ через поверхность ΔS , ограниченную контуром, может происходить в трех случаях: а) при изменении магнитной индукции \mathbf{B} (в неоднородном постоянном или переменном магнитном поле); б) при изменении площади контура ΔS и в) при изменении положения контура относительно вектора магнитной индукции (\mathbf{B}, \mathbf{n}) . Заметим, что в отличие от генерации эдс в химических источниках тока, которая происходит только в зоне наличия контактной разности потенциалов их компонентов, в случае электромагнитной индукции эдс не сосредоточена в том или ином участке цепи проводящего контура, а *развивается одновременно во всех его точках, где изменяется поток магнитной индукции*.

Направление индуцированного тока в проводящем контуре определяется **правилом Ленца**:

Правило Ленца: индуцированный ток имеет такое направление, при котором его магнитное поле уменьшает (компенсирует) изменение магнитного потока, являющегося причиной возникновения этого тока

Это правило является следствием закона сохранения энергии и отражает инерционный характер электромагнитного взаимодействия индуцированного тока с вызвавшим его изменением магнитного потока: если поток возрастает, то магнитное поле индукционного тока направлено навстречу этому потоку, ослабляя его действие, и, наоборот, при уменьшении магнитного потока индукционный ток меняет свое направление на противоположное, поддерживая этот поток.

Непосредственной причиной появления тока в индукционном контуре является эдс индукции \vec{E} (создает индукционный ток внутри контура) и напряжение $U = -\vec{E}$ (создает индукционный ток во внешней цепи). Их величина зависит от скорости изменения

магнитного потока через поверхность индукционного контура, что выражается в количественной формулировке **закона электромагнитной индукции**:

$$\vec{E} = -k \cdot d\Phi/dt [B] \text{ или } U = k \cdot d\Phi/dt [B] \quad (2.4.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, связанный с выбором системы единиц. В СИ принимается $k=1, \Phi [B\cdot m^2 = T\cdot m^2], t [c]$ и $\vec{E}, U [T\cdot m^2/c = H\cdot m^2/A\cdot m\cdot c = H\cdot m/Kл = Дж/Кл = B]$, а в СГСМ - $k=1/c=3^{-1}\cdot 10^{-10}$ (c - скорость света в вакууме, $[см/с]$), $\Phi [Mкc], t [c]$ и $\vec{E}, U [B]$. Знак минус в формуле определяет направление индукционного тока по правилу Ленца. Используя (2.4.1), можно дать альтернативное определение единице магнитного потока в СИ: *один вебер – это магнитный поток, при убывании которого до нуля за одну секунду в индукционном контуре возникает эдс индукции величиной в один вольт.*

Вернемся к рассмотрению процесса вращения индукционного контура в однородном магнитном поле (рис.2.4.2). На рисунке показаны четыре позиции положения контура, отличающиеся углом его поворота относительно вектора магнитной индукции этого поля, причем в позициях 1 и 3 плоскость контура параллельна этому вектору, а в позициях 2 и 4 – перпендикулярна. Соответственно, в позициях 1,3 поток магнитной индукции через плоскость контура минимален $\Phi_{1,3} = 0$, а в позициях 2,4 – максимален $\Phi_{2,4} = \Phi_m$. Кроме того, следует учесть, что при движении контура из позиции 1 в 2 (из 3 в 4) магнитный поток увеличивается, а при движении из 2 в 3 (из 4 в 1) – уменьшается.

Если угловая (круговая) частота вращения контура равна $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ [рад/с], где $T [c]$ – период, а $f = 1/T$ [Гц = 1/с] – частота колебаний, то величину потока в любой временной точке t вращения контура можно определить как гармоническую функцию

$$\Phi(t) = \Phi_m \cdot \sin(\omega t + \psi), \quad (2.4.2)$$

где Φ_m – амплитуда - максимальное значение магнитного потока, ψ - начальная фаза положения контура в поле относительно его направления (в нашем случае $\psi = 0$), $\varphi = (\omega t + \psi)$ – фаза поворота контура в момент времени t .

Физические величины, изменяющиеся по гармоническому закону, удобно изображать в виде *векторов*, вращающихся вокруг нулевой точки координатной плоскости, разделенной осями абсцисс x и ординат y на четыре *квадранта* (угловые размеры каждого квадранта равны $\pi/2 = 90^\circ$). При этом модуль вектора определяется максимальным значению соответствующей величины, а ее текущее значение - *углом поворота* вектора относительно оси x и проекцией вектора на координатную ось того или иного квадранта (рис.2.4.3). *Направление вращения вектора против часовой стрелки определяет положительный, а по часовой стрелке - отрицательный угол поворота.*

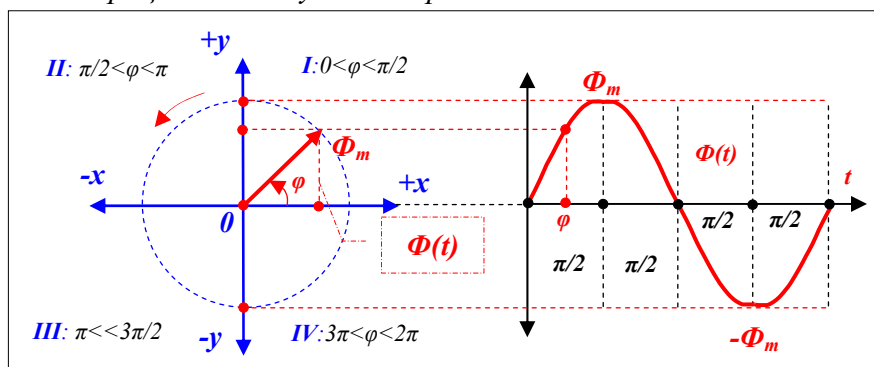


Рис.2.4.3 Векторное и развернутое во времени изображение физической величины на примере магнитного потока Φ , изменяющейся по гармоническому закону ($\omega=1$; I, II, III, IV – квадранты)

Выбор функции \sin или \cos в (2.4.2) условен, так как эти функции различаются между собой только начальной фазой $\psi = \pi/2$: $\sin(x + \pi/2) = \cos(x)$ или $\cos(x + \pi/2) = -\sin(x)$. Очевидно,

что в позициях 1,3 $\Phi_{1,3}=\Phi_m \cdot \sin(0)=0$, а в позициях 2,4 $\Phi_2=\Phi_m \cdot \sin(\pi/2)=\Phi_m$ и $\Phi_4=\Phi_m \cdot \sin(3\pi/2)=-\Phi_m$. Согласно формуле (2.4.1) и правилам нахождения производных $\sin(x)'=\cos(x)$ или $\cos(x)'=-\sin(x)$, напряжение на клеммах контура равно $U(t)=\omega \cdot \Phi_m \cdot \cos(\omega t)$. Заменяя по правилам приведения косинус на синус, получим

$$U(t)=\omega \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega t+\pi/2)=U_m \cdot \sin(\omega t+\pi/2), \quad (2.4.3)$$

где $U_m=\omega \cdot \Phi_m$. Очевидно, что в точках 1,3 $U_1=U_m \cdot \sin(\pi/2)=U_m$ и $U_3=U_m \cdot \sin(3\pi/2)=-U_m$, а в точках 2,4 - $U_{2,4}=U_m \cdot \sin(\pi;2\pi)=0$. Графики магнитного потока Φ , потенциалов φ и напряжения $U(t)$ приведены на рис.2.4.4.

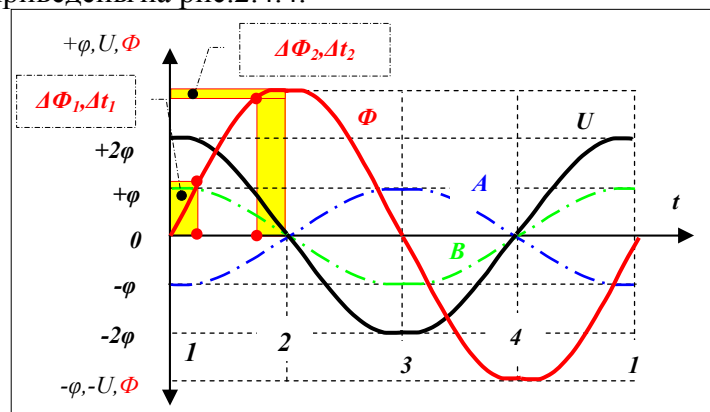


Рис.2.4.4 Графики физических величин Φ , φ и U при вращении индукционного контура в однородном магнитном поле (последовательные позиции 1,2,3,4 различаются углом $\pi/2$ поворота контура по часовой стрелке, φ - значения потенциалов на клеммах A,B контура)

График $U(t)$ формируется как разность графиков $U(t)=\varphi_B(t)-\varphi_A(t)$ противоположных потенциалов φ_B и φ_A , которые изменяются на клеммах горизонтальных сторон A и B контура при перетоках в них отрицательных и положительных электрических зарядов в процессе пересечения этими сторонами магнитного поля (вертикальные стороны контура параллельны полю, и в них сила Лоренца отсутствует). Когда левая половина контура совершает движение по часовой стрелке *снизу вверх*, к клемме этой половины притекают отрицательные заряды (электроны) проводника в соответствии с правилом левой руки (см. рис.2.3.3,а). Аналогично, при одновременном движении правой половины контура *сверху вниз* у клеммы этой половины формируется избыток положительных зарядов. Поскольку стороны A и B полпериода вращения пересекают поле в одном направлении и полпериода в противоположном направлении, постольку на их клеммах за период дважды происходит изменение знака зарядов и потенциалов на противоположные, что и демонстрируют рис.2.4.2 и графики на рис.2.4.4.

Магнитный поток за период оборота контура дважды меняет свой знак, обращаясь в нуль в те моменты, когда плоскость контура параллельна полю, и достигая максимума в моменты, когда она перпендикулярна полю. В соответствии с законом (2.4.1), величина эдс индукции \vec{E} или напряжения U определяется не величиной самого магнитного потока, а скоростью его изменения: она максимальна в позициях 1,3 и минимальна в позициях 2,4 (на рис.2.4.4 показаны соответствующие изменения магнитного потока $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ за одинаковые промежутки времени $\Delta t_1=\Delta t_2$). Аналогично, в позициях 1,3 напряжение максимально по абсолютной величине $U_{1,3}=U_m$, а в позициях 2,4 минимально $U_{2,4}=0$. Соответственно, по правилу Ленца, по мере увеличения магнитного потока напряжение и индукционный ток, вызванный им, уменьшаются - магнитное поле тока ослабляет действие внешнего магнитного поля, а при уменьшении этого потока, наоборот, увеличиваются, меняя свой знак на противоположный - магнитное поле тока усиливает внешнее магнитное поле.

Временные и количественные соотношения между физическими величинами, изменяющимися по гармоническому закону и представляемыми в виде векторов, удобно

изображать в виде *векторной диаграммы*, в которой через фазовые сдвиги между векторами отражается порядок их временного следования, а через модули векторов – их максимальные или иные определенные величины. Вектор, расположенный на диаграмме левее в диапазоне углов от 0 до π , имеет *большую фазу* и *опережает* вектор, расположенный правее, и, наоборот, последний *отстает* от первого. Векторная диаграмма для магнитного потока Φ , эдс индукции \vec{E} , напряжения U и индукционного тока I приведена на рис.2.4.5. Из рисунка видно, что вектор эдс \vec{E} *отстает* от вектора магнитного потока Φ на угол $\pi/2$, а напряжение U и ток I , наоборот, *опережают* Φ на такой же угол.

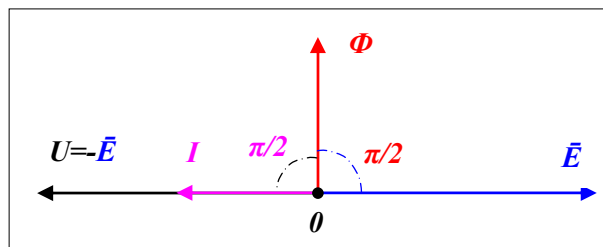


Рис.2.4.5 Векторная диаграмма гармонических физических величин Φ, \vec{E}, U, I процесса электромагнитной индукции

Действие силы Лоренца объясняет возникновение *эдс индукции* в проводящем контуре, движущемся в магнитном поле. В общем случае причиной появления *эдс индукции* в индукционном контуре, независимо от того, движется или покоится он, является *переменное магнитное поле, порождающее в пространстве (в проводнике, в вакууме или диэлектрике) электрическое вихревое поле*, т.е. поле, силовые линии которого, в отличие от электростатического поля, замкнуты, т.е. образуют *вихрь*, или *ротор*. В свою очередь переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, замыкая цикл образования электромагнитного поля. Эти зависимости описываются в классической макроскопической электродинамике для произвольной среды (проводника, вакуума, диэлектрика) *уравнениями Максвелла*, которые связывают векторы напряженности \vec{E}, \vec{H} и индукции \vec{D}, \vec{B} электрических и магнитных полей в каждой их пространственно-временной точке (x, y, z, t) с источниками этих полей – электрическими зарядами и токами (с их плотностями ρ и $\vec{j}=\rho\vec{v}$ как функциями координат и времени).*

*Четыре уравнения Максвелла записывают в *дифференциальной* (определяют векторы напряженности и индукции в отдельных точках пространства в форме математических функций *ротора* $\text{rot } \vec{H}, \text{rot } \vec{E}$ и *дивергенции* $\text{div } \vec{B}, \text{div } \vec{D}$) или в *интегральной* форме (определяют интегральные величины - *циркуляцию* векторов напряженности \vec{E}, \vec{H} вдоль произвольных замкнутых контуров и *поток* векторов индукции \vec{D}, \vec{B} через произвольные замкнутые поверхности - в форме соответствующих интегралов). Эти уравнения являются теоретическим обобщением установленных эмпирических законов: *закона Био-Савара* (магнитное поле порождается не только токами в проводнике – *токами проводимости*, но и *переменными электрическими полями* в вакууме и диэлектрике, создающими *токи смещения*; полный ток, равный сумме тока смещения и тока проводимости, всегда замкнут), *закона электромагнитной индукции* (циркуляция вектора напряженности электрического поля вдоль замкнутого контура определяется скоростью изменения потока вектора магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром), данных *об исключительно электрической природе магнитного поля и отсутствии магнитных зарядов* (поток вектора магнитной индукции через произвольно замкнутую поверхность равен нулю) и *закона кулоновского взаимодействия электрических зарядов или теоремы Гаусса* (поток вектора электрической индукции через произвольную замкнутую поверхность определяется электрическим зарядом, находящимся внутри этой поверхности). Уравнения Максвелла сами по себе не образуют замкнутой системы, позволяющей рассчитывать электромагнитные процессы в физической среде, и дополняются *уравнениями состояния* этой среды, связывающими ее свойства с усредненными значениями векторов напряженности и индукции. Эти уравнения в общем случае сложны, но для большинства изотропных сред имеют простую линейную форму вида, например, $\vec{D}=\epsilon\vec{E}, \vec{B}=\mu\vec{H}$ и т.д.

2.5 Переменный электрический ток.

Активная и реактивная энергия в электрических цепях переменного тока

В генераторах постоянного тока (гальванических элементах, аккумуляторах и др.) эдс и напряжение на их полюсах не меняются во времени, определяя ток во внешней цепи в одном и том же направлении – прямой или постоянный ток $i(t)=I=const$ (его величина не изменяется при постоянной нагрузке, по крайней мере до тех пор, пока в длительной перспективе внутренние процессы в генераторе не изменят величины его эдс). Напротив, электромагнитные (электрохимические) генераторы, установленные на всех электростанциях мира, создают внутри себя переменную эдс $\bar{e}(t)$, порождающую на внешних полюсах генераторов переменное напряжение $u(t)$ и соответственно переменный ток $i(t) \neq const$ во внешних электрических цепях. Главное преимущество в использовании переменного тока перед постоянным – это эффективность его преобразований по различным уровням силы тока и напряжения и экономичность передачи с его помощью больших объемов электрической энергии на дальние расстояния.

Переменный электрический ток в широком смысле – это электрический ток $i(t)$, изменяющийся во времени. В технике под переменным током понимают периодический ток, изменяющий как свою величину, так и направление, причем средние за период T значения силы тока I_{cp} и напряжения U_{cp} равны нулю. Период переменного тока T – это наименьший промежуток времени в секундах, через который одни и те же значения силы тока и напряжения повторяются. Величину, обратную периоду T , т.е. равную числу периодов или колебаний в секунду, называют частотой переменного тока f и выражают в герцах (один герц – одно колебание в секунду): $f=1/T$ [Гц=1/с]. В современных электроэнергетических системах выбрана по историческим причинам частота f переменного напряжения и тока, равная 50 или 60 Гц (напряжение такой частоты создается, например, двухполюсными электромагнитными генераторами, роторы которого вращаются со скоростью 3000 или 3600 об/мин).

В простейшем и наиболее важном практическом случае мгновенное значение силы переменного тока $i(t)$ изменяется во времени по гармоническому (синусоидальному) закону:

$$i(t)=I_m \cdot \sin(\omega t + \alpha), \quad (2.5.1)$$

где $I_m[A]$ – амплитуда тока, или его максимальное значение в амперах, $\omega=2\pi/T=2\pi f$ [рад/с] – круговая (угловая) частота (определяет число полных колебаний физической величины за цикл 2π секунд; $\omega=1$, если за период $T=2\pi$ секунд происходит одно колебание); α – начальная фаза колебания тока относительно некоторого условного фиксированного момента времени $t=0$; $(\omega t + \alpha)$ – фаза колебания тока, определяемая с точностью до произвольного слагаемого, кратного 2π (фаза позволяет сопоставлять различные гармонические величины одинаковой частоты на один и тот же момент времени). Такой ток создается гармоническим напряжением той же частоты:

$$u(t)=U_m \cdot \sin(\omega t + \beta), \quad (2.5.2)$$

где $U_m [B]$ – амплитуда напряжения, или его максимальное значение в вольтах; β – начальная фаза колебания напряжения (рис.2.5.1).

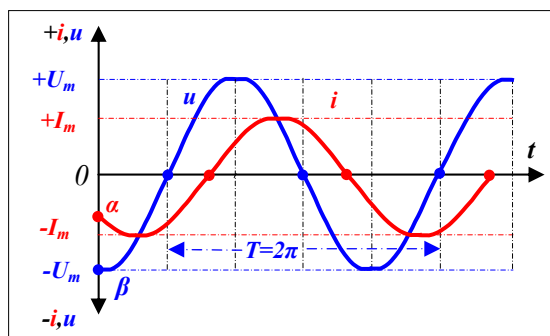


Рис.2.5.1 Графики синусоидальных напряжения $u(t)$, тока $i(t)$ и их характеристики $T, \alpha, \beta, \pm I_m, \pm U_m$ ($\omega=1$; ток отстает по фазе от напряжения на угол $\beta-\alpha < \pi/2$)

Если $\alpha=\beta$, то говорят, что ток и напряжение в цепи *совпадают* по фазе, или *синхфазны*, т.е. в любой момент времени при увеличении (уменьшении) одной из величин одновременно увеличивается (уменьшается) и другая величина. Это имеет место в электрической цепи переменного тока с *активным сопротивлением*. В общем же случае $\alpha\neq\beta$, т.е. напряжение на участке электрической цепи и ток в ней могут быть *смещены* или *сдвинуты* по фазе относительно друг друга на величину *сдвига*, или *разности фаз* $\varphi=\pm(\alpha-\beta)$. Считают, что на один и тот же момент времени величина с большей фазой *опережает* величину с меньшей фазой или последняя *отстает* от первой.

Причина сдвига фаз (фазового сдвига) между током и напряжением на участке электрической цепи переменного тока – это наличие в данном участке *реактивных (емкостных и индуктивных) элементов*, которые способны *запасать электромагнитную энергию* и выдавать ее в цепь на определенном временном интервале в виде *дополнительной эдс* или *разности потенциалов*, отличной по своему источнику от эдс внешнего генератора – источника основного напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ в цепи. В зависимости от времени выдачи и направления дополнительной эдс или разности потенциалов по отношению к основному напряжению в цепи, сила тока в цепи на время действия этих источников энергии *дополнительно либо увеличивается, либо уменьшается*, причем величина ее изменения зависит от величины этой дополнительной разности потенциалов.

Таким образом, гармонический переменный ток и напряжение в электрической цепи характеризуются *системой трех величин: частотой, амплитудой и фазой* (точнее, *сдвигом фазы* тока и напряжения относительно друг друга *в однофазной цепи* или других токов и напряжений в случае рассмотрения *многофазных цепей* переменного тока). Если эта система величин не меняется во времени, то такой переменный ток называют *стационарным*. Если же она подвержена во времени медленным изменениям, которыми можно пренебречь (по их малости), то такой ток называют *квазистационарным*. В цепях переменного тока различают *мгновенные, максимальные, средние и действующие значения* токов и напряжений (см. ниже).

В общем случае (рис.2.5.2) *полная электрическая цепь переменного тока содержит генератор переменной эдс $\bar{e}(t)$, к полюсам которого подключена нагрузка, состоящая из комбинации активного (сопротивления R) и реактивных элементов – электрической емкости C и индуктивности L* (в данных понятиях физические свойства элементов - R, C, L - отождествлены с самими элементами и использованы для их именованя).

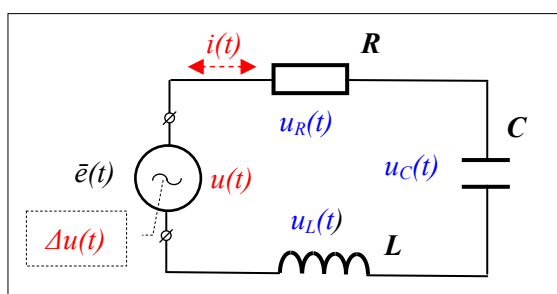


Рис.2.5.2 Обобщенная полная замкнутая электрическая цепь переменного тока с генератором и нагрузкой: активным сопротивлением R , емкостью C и индуктивностью L , где u –напряжение на генераторе, $\Delta u(t)$ - падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора, u_R, u_C, u_L – напряжения на соответствующих элементах нагрузки

В *разомкнутой цепи* переменного тока, как и в цепи постоянного тока (см. параграф 2.2), $i(t)=0$ и эдс генератора $\bar{e}(t)$ в любой момент времени *равна и противоположна по знаку напряжению холостого хода $u(t)=u_{XX}(t)$ на его полюсах: $-\bar{e}(t)=u_{XX}(t)$* . Аналогично, в *замкнутой цепи* с ненулевой нагрузкой $-\bar{e}(t)=u(t)+\Delta u(t)$, где $\Delta u(t)=i(t)\cdot r_G$ - падение напряжения на внутреннем сопротивлении r_G генератора при токе $i(t)$ в цепи.

В том случае, если цепь *не содержит реактивных элементов* (или они имеются, но *компенсируют* действие друг друга), то ток $i(t)$ и напряжение $u_R(t)$ на активном сопротивлении R совпадают по фазе и, согласно закону Ома, в каждый момент времени равны $i(t)=u_R(t)/R$ (рис.2.5.3). При этом $u(t)=u_R(t)=i(t) \cdot R$ и $-\bar{e}(t)=u_R(t)+\Delta u(t)=i(t) \cdot (R+r_{Г})=i(t) \cdot R_{П}$, где $R_{П}$ – полное активное сопротивление замкнутой цепи. Очевидно, что *в режиме короткого замыкания* ($R=0$) $u(t)=u_R(t)=0$ и $-\bar{e}(t)=\Delta u(t)$, а величина тока в цепи максимальна и равна $i(t)_{КЗ}=\bar{e}(t)/r_{Г}=u_{ХХ}(t)/r_{Г}$. Заметим, что абсолютная величина эдс $\bar{e}(t)$ генератора определяется его конструкцией (см. параграф 2.4) и не зависит от режима работы внешней цепи: в случае разомкнутой цепи эдс равна напряжению холостого хода и уравнивается этим напряжением, а в случае замкнутой цепи эта же величина эдс уравнивается суммой напряжений на нагрузке и на внутреннем сопротивлении генератора (при КЗ – только последним).

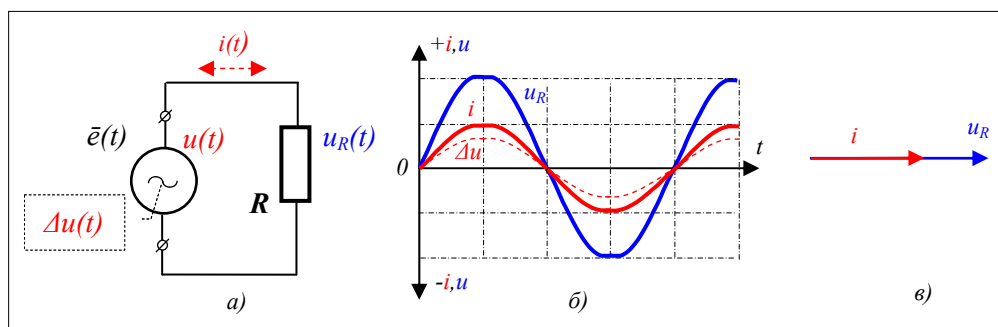


Рис.2.5.3 Схема цепи с активным сопротивлением (а), графики тока и напряжений (б) и их векторная диаграмма (в)

В идеализированной цепи с $r_{Г}=0$, содержащей в качестве нагрузки генератора *только электрическую емкость* C , временные соотношения между током и напряжением имеют иной вид (рис.2.5.4). В простейшем случае *электрической емкостью обладает конденсатор, представляющий собой систему двух разноименно заряженных и изолированных друг от друга проводников или обкладок конденсатора*. Например, *плоский конденсатор* состоит из двух параллельных проводящих пластин, разделенных диэлектриком, расстояние между которыми мало по сравнению с размерами этих пластин.

Электрическая емкость конденсатора C (электроемкость, емкость) характеризуется отношением заряда q , накапливаемого на его обкладках, к разности потенциалов U между этими обкладками:

$$C = q/U[\Phi]; \quad q = C \cdot U [\text{Кл}].$$

(2.5.3)

Емкость характеризует не отдельную пластину конденсатора, а систему обеих пластин в их взаимном расположении относительно друг друга.* Емкость плоского конденсатора с площадью каждой пластины S и расстоянием между ними d равна $C = \epsilon_0 \epsilon S/d$, где ϵ_0 – *электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума)*, ϵ – *диэлектрическая проницаемость (относительная электрическая проницаемость)* (см. параграф 2.1; ϵ_0 зависит только от выбора единиц измерения, в отличие от ϵ , зависящей от вещества и его характеристик). *Единицей емкости в СИ является фарада (Φ): $1\Phi = 1\text{Кл}/1\text{В}$. Одна фарада – это емкость такого конденсатора, в котором заряд на его обкладках в 1Кл создает между ними разность потенциалов в 1В . Емкость в 1Φ является очень большой величиной и на практике используют ее дольные единицы: микрофараду ($1\text{мк}\Phi = 10^{-6}\Phi$) и пикофараду ($1\text{пк}\Phi = 10^{-6}\text{мк}\Phi = 10^{-12}\Phi$). В единицах СИЭ $1\text{Кл} = 3 \cdot 10^9 \text{ед.СИЭ}_q$, $1\text{В} = 1/300 \text{ед.СИЭ}_v$, и поэтому $1\Phi = 9 \cdot 10^{11} \text{ед.СИЭ}_c$ или $1\text{пк}\Phi = 0,9 \text{ед.СИЭ}_c$.*

*В общем случае понятие емкости относится не только к системе проводников, в частности, к двум проводникам (конденсатору), но и к единичному уединенному проводнику. Оно определяет меру способности проводника удерживать электрический заряд: $C=q/\varphi$, где φ - потенциал этого проводника. Чем больше C , тем больший заряд при данном потенциале может накопить проводник. Емкость проводника зависит от его геометрических размеров, формы и электрических свойств окружающей среды. В системе СГСЭ единица емкости определяется как емкость проводящего шара радиусом $r=1\text{см}$ и измеряется в сантиметрах. Шар с $r=1\text{см}$ способен накопить заряд в ед. СГСЭ $_q$ при потенциале ед.СГСЭ $_v$. Соответственно шар с емкостью 1Ф будет иметь радиус $r=9\cdot 10^{11}\text{см}=9\text{ млн. км}$, что в несколько раз больше диаметра Солнца.

Конденсатор в электрической цепи постоянного или переменного тока является накопителем энергии электрического поля. Для заряда конденсатора необходимо создать на одной его обкладке заряд одного знака q^+ , а на другой – равный заряд противоположного знака q^- , т.е. разделить положительные и отрицательные заряды, преодолев силу их взаимного притяжения. Это всегда связано с затратами работы сторонних сил, заряжающих конденсатор. Заряженный конденсатор обладает запасом потенциальной энергии, равной той работе, которая была затрачена на его заряд. Этот запас энергии существует в конденсаторе в виде электрического поля между его обкладками (в плоском конденсаторе это поле однородно и имеет напряженность $E=U/d$). При разряде конденсатора заряды на его обкладках и электрическое поле между ними исчезают, превращаясь в работу электрических сил, перемещающих заряды, т.е. создающих ток. Таким образом, электрическое поле обладает запасом потенциальной энергии, освобождаемой при исчезновении этого поля с одновременной генерацией им соответствующего электрического тока в цепи.

Для плоского конденсатора его запас электрической энергии можно определить учитывая, что при заданных q^+ и q^- на его обкладках напряженность E равна сумме напряженностей, создаваемых этими зарядами: $E^+=E^-=E/2$. Разряд конденсатора можно рассматривать как процесс компенсации зарядов $q^+-q^-=0$ при $d=0$. Тогда работа сил поля при разряде конденсатора равна $A=F\cdot d=q\cdot(E/2)\cdot d=q\cdot U/2$ или, с учетом (2.5.3), $A=C\cdot U^2/2$. Следовательно, запас электрической энергии в конденсаторе равен

$$W_E=A=C\cdot U^2/2[\text{Дж}], \quad (2.5.4)$$

т.е. пропорционален емкости конденсатора и квадрату напряжения на нем. Если в СИ $C[\Phi]$, $U[V]$, то $W_E[\Phi\cdot B^2]=\text{Кл}\cdot B^2/B=B\cdot A\cdot c=\text{Дж}$. В случае переменного тока под U понимается его действующее значение (см. ниже).

В цепи переменного тока периодические изменения величины и направления эдс генератора вызывают периодические изменения заряда q и тока $i=dq/dt$ через конденсатор (емкостного тока). С учетом формул (2.5.2), (2.5.3) и приняв для определенности $\beta=-\pi/2$, получим $i(t)=C\cdot du/dt=\omega\cdot C\cdot U_m\cdot \cos(\omega t-\pi/2)$. Заменив по формуле приведения функцию косинуса на синус, имеем:

$$i(t)=\omega\cdot C\cdot U_m\cdot \sin(\omega t-\pi/2+\pi/2)=I_m\cdot \sin(\omega t), \quad (2.5.5)$$

где $I_m=U_m/X_c$ - амплитуда тока, $X_c=1/(\omega\cdot C)$ - емкостное сопротивление. На момент времени $t=0$ ток равен $i=I_m\cdot \sin(0)=0$ (заметим, что при выборе начальной фазы напряжения на емкости $\beta=0$ ток был бы равен $i=I_m\cdot \sin(\pi/2)=I_m$, т.е. сохранился бы тот же самый фазовый сдвиг $\pi/2$). Из (2.5.5) следует, что ток i опережает по фазе напряжение u_C на конденсаторе на четверть периода, т.е. на угол $\pi/2$, или напряжение u_C , наоборот, отстает от тока на этот же угол (рис.2.5.4). При этом $u(t)$ и $u_C(t)$, хотя и совпадают по амплитуде и частоте, но имеют разные фазы, и поэтому $u(t)\neq u_C(t)$, т.е. $u_C(t)$ может рассматриваться как независимый дополнительный источник электрического поля, влияющий на величину тока в цепи.

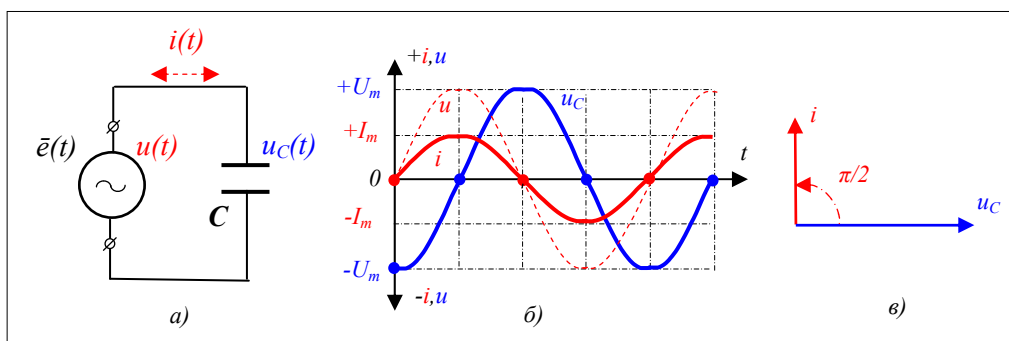


Рис.2.5.4 Схема цепи с емкостью (а), графики тока и напряжений (б) и их векторная диаграмма (в)

Физически носители заряда (электроны в металлическом проводнике) не могут в своем движении преодолеть диэлектрик между пластинами конденсатора, и в этом смысле конденсатор препятствует прохождению тока (в цепи постоянного тока после заряда конденсатора ток в цепи прекращается). Однако в цепи переменного тока происходит не постоянное перемещение носителей заряда в одном направлении, а их *колебательное движение* с изменением направления перемещения дважды за период колебания. В процессе такого движения периодически происходит *заряд конденсатора током от внешнего генератора и его разряд с превращением электрического поля конденсатора в цепи в электрический ток* (рис.2.5.5).

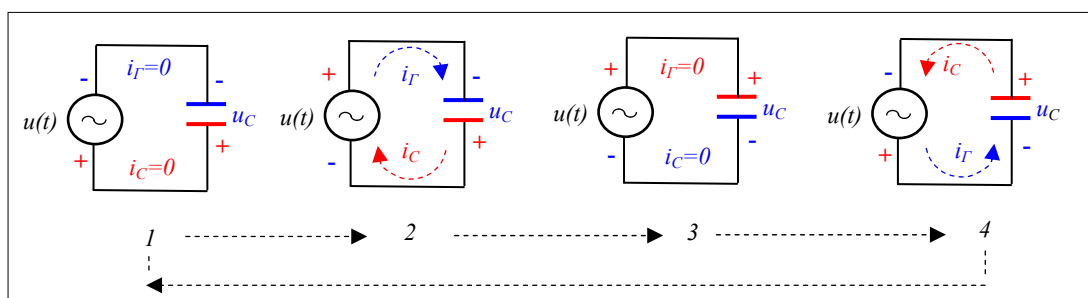


Рис.2.5.5 Схема перезаряда емкости в цепи переменного тока

К началу первой четверти периода колебаний тока ($t=0$) конденсатор заряжен до напряжения $u_C = -U_m$, равного отрицательной амплитуде напряжения внешнего генератора, и ток в цепи равен нулю (см. рис 2.5.4 и рис.2.5.5, поз.1). В первой четверти (поз.2) напряжение генератора меняет по закону электромагнитной индукции полярность на противоположную, и в цепи возникает *ток прямого направления*. Он имеет две составляющие: *ток генератора* i_G , который меняет величину и знак заряда одной из обкладок конденсатора, и *ток разряда конденсатора* i_C , который меняет величину и знак заряда другой обкладки конденсатора. В конце первой четверти периода ($t=\pi/2$) ток достигает максимума $i_C = i_G = +I_m$, а напряжение u_C на конденсаторе становится равным нулю (конденсатор разряжен). Далее, во второй четверти периода, по мере перезаряда конденсатора до напряжения $u_C = +U_m$, ток уменьшается и к началу третьей четверти периода ($t=\pi$) он равен нулю (поз.3).

В третьей четверти периода (поз.4) напряжение генератора опять меняет полярность на противоположную и в цепи нарастает *ток обратного направления*, который в конце этой четверти ($t=3\pi/2$) достигает максимума $i_C = i_G = -I_m$, а напряжение u_C на конденсаторе становится равным нулю. В последней, четвертой четверти периода, по мере заряда конденсатора до напряжения $u_C = -U_m$, ток уменьшается и к началу первой четверти

очередного цикла ($t=2\pi=0$) равен нулю (ноз.1). Далее процесс повторяется. Таким образом, в цепи переменного тока, содержащей емкость, происходят гармонические колебания тока и напряжения, вызванные взаимодействием внешнего генератора переменного напряжения с процессами заряда-разряда емкости. Напряжение эдс генератора и ток перезаряда емкости являются инициаторами этих процессов, причем ток опережает по фазе напряжение на емкости на угол $\varphi=\pi/2$ (рис.2.5.4, в).

Рассмотрим идеализированную цепь с $r_T=0$, содержащую индуктивность L (рис.2.5.6,а). Индуктивность характеризует магнитные свойства электрической цепи. Ток I , текущий в проводящем контуре, создает в окружающем пространстве магнитное поле с магнитной индукцией B , поток которой через площадь контура S – магнитный поток $\Phi=B\cdot S$ – пронизывает и сам контур как источник этого потока. Величина потока равна

$$\Phi=L\cdot I; L=\Phi/I, \quad (2.5.6)$$

где L – коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью или коэффициентом самоиндукции контура. Если в формуле (2.5.6) положить, согласно СИ, $I=1A$, $\Phi=1Вб$, то $L=1Вб/1A=1Гн$ (генри), т.е. индуктивность в 1Гн – это индуктивность такого контура, который при токе в 1А создает магнитный поток в 1Вб. Индуктивность зависит от размеров и формы контура, а также магнитной проницаемости окружающей среды. Например, индуктивность соленоида с площадью поперечного сечения $S[m^2]$, длиной $l[m]$ и имеющего w витков равна $L=\mu_0\mu w^2 S/l$ [Гн] (при условии, что $l\geq 10d$, где d – диаметр соленоида). * В СИГСИ единицей индуктивности является сантиметр: $1Гн=10^9$ см.

* Индуктивностью L обладают не только соленоиды (катушки) или проводящие контуры, но и проводники любой формы, в том числе и *прямолинейные* (для них L настолько мала, что в большинстве случаев ею можно пренебречь; только при токах высокой частоты $f > 50$ Гц с нею приходится считаться и в линейных проводниках).

Из формулы (2.5.6) следует, что при постоянном токе постоянен и магнитный поток, пронизывающий контур с током, а, в соответствии с законом электромагнитной индукции, в таком контуре отсутствуют индукционные явления. Но при изменении тока меняется и созданный им магнитный поток, а, следовательно, в контуре возбуждается эдс индукции.

Явление возбуждения эдс индукции током в той же цепи, по которой он проходит, называют самоиндукцией, а возникающую при этом эдс – эдс самоиндукции

Величина эдс самоиндукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока или скорости изменения силы тока и индуктивности контура:

$$\bar{e}_L(t)=-L\cdot di(t)/dt. \quad (2.5.7)$$

Знак эдс самоиндукции определяется согласно правилу Ленца: если ток $i(t)$ в цепи увеличивается, то индуцированное поле препятствует этому росту, и знак эдс самоиндукции противоположен знаку внешнего напряжения $u(t)$, вызвавшему этот ток в индуктивности. Если же ток в цепи убывает, то индуцированное поле препятствует этому убыванию, и знак эдс самоиндукции совпадает со знаком напряжения $u(t)$. При этом, очевидно, индуктивное напряжение $u_L(t)$, создаваемое эдс самоиндукции на индуктивности, как и в случае любой эдс, разделяющей электрические заряды, противоположно по знаку этой эдс: $u_L(t)=-\bar{e}_L(t)$. Отметим, что сам по себе ток $i(t)$ не вызывает падения напряжения на индуктивности, поскольку, по определению, ее активное сопротивление равно нулю.

Если в формуле (2.5.7) положить $di(t)/dt=1A/c$, $u(t)=1В$, то $L=1В/(1A/c)=1Гн$, т.е. получим альтернативное определение единицы индуктивности: 1Гн – это индуктивность такого контура, при изменении в котором силы тока со скоростью 1А/с в нем генерируется напряжение 1В. Существенное отличие индуктивности, как реактивного источника эдс, от активного источника эдс состоит в том, что величина индуцируемой эдс зависит не от величины тока в цепи, а от скорости его изменения (для переменного тока – от его частоты).

Индуктивность L проводника с током характеризует его конструктивные свойства изменять (усиливать или ослаблять) создаваемый при изменениях тока переменный магнитный поток и эдс самоиндукции, генерируемую в проводнике при изменениях этого магнитного потока

Индуктивность играет в цепях постоянного и переменного тока роль *дополнительного генератора эдс*, использующего эффект превращения в него накопленного в индуктивности запаса энергии магнитного поля, который равен

$$W_M = L \cdot I^2 / 2 \text{ [Дж]}, \quad (2.5.8)$$

т.е. пропорционален индуктивности и квадрату силы тока (для переменного тока под I подразумевается его действующее значение, см. ниже). Если в СИ $L[\text{Гн}]$, $I[\text{А}]$, то $W_M[\text{Гн} \cdot \text{А}^2] = \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}^2 / \text{А} = \text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} = \text{Дж}$. Эта энергия сопоставима по своим свойствам с кинетической энергией движущегося тела $W = mv^2/2$ (индуктивность влияет на ток в цепи так же, как инертная масса влияет на скорость движения тела: масса препятствует изменению его скорости, а индуктивность препятствует изменению тока).

В цепи переменного тока с индуктивностью с учетом формул (2.5.1), (2.5.7) и приняв для определенности $\alpha=0$, получим $u_L(t) = L \cdot di(t)/dt = L \cdot \omega \cdot I_m \cdot \cos(\omega t)$. Заменяя по формулам приведения функцию косинуса на синус, имеем:

$$u_L(t) = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2) = U_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2), \quad (2.5.9)$$

где $U_m = I_m \cdot X_L$ – амплитуда индуктивного напряжения, $X_L = \omega \cdot L$ – индуктивное сопротивление. На момент времени $t=0$ напряжение равно $U_m \cdot \sin(\pi/2) = U_m$. Из (2.5.9) следует, что индуктивное напряжение u_L опережает по фазе ток i_L на угол $\pi/2$ (рис.2.5.6). При этом $u(t)$ и $u_L(t)$, хотя и совпадают по амплитуде и частоте, но имеют разные фазы, и поэтому $u(t) \neq u_L(t)$, т.е. $u_L(t)$ может рассматриваться как *независимый дополнительный источник эдс (разности потенциалов)*, влияющий на величину тока в цепи.

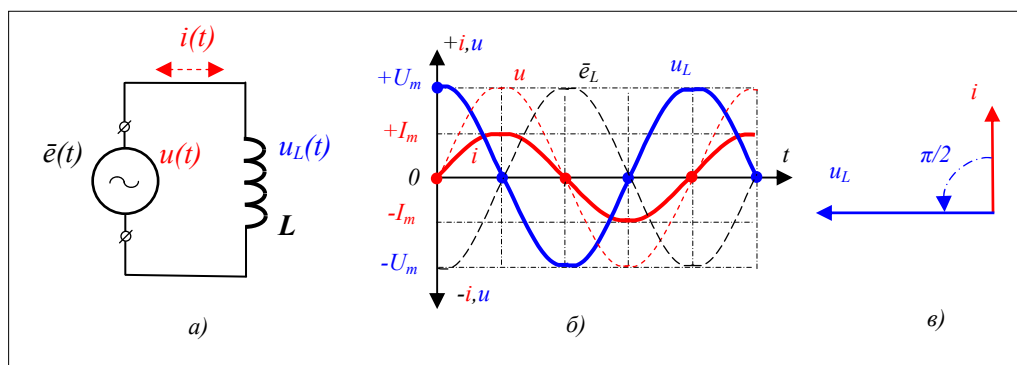


Рис.2.5.6 Схема цепи с индуктивностью (а), графики тока, эдс и напряжений (б) и их векторная диаграмма (в)

В начальный момент времени ($t=0$) ток в цепи $i(t)$ и напряжение $u(t)$ внешнего генератора, проходя через нуль, меняют свое направление по закону электромагнитной индукции на противоположное: с отрицательного, или обратного направления, на положительное, или прямое направление, причем это изменение происходит с максимальной скоростью. В этот момент эдс самоиндукции \bar{e}_L максимальна и отрицательна (совпадает по направлению с напряжением, вызвавшим убывающий ток обратного направления), а напряжение на индуктивности, наоборот, положительно: $u_L = +U_m$. В начале первой четверти периода под воздействием возрастающего напряжения $+u(t)$ в цепи увеличивается ток прямого направления $+i(t)$, но его магнитное поле стремится этому противодействовать. Эдс самоиндукции \bar{e}_L отрицательна, т.е. направлена против основного напряжения, но уменьшается по абсолютной величине (уменьшается и напряжение $+u_L$), так как убывает

скорость изменения тока. В конце первой четверти периода ($t=\pi/2$) $u(t)=+U_m$ и значение тока максимально, но скорость его изменения и соответственно величина *эдс самоиндукции* (и напряжения на индуктивности) равны нулю.

Во второй четверти периода напряжение $+u(t)$ и ток прямого направления уменьшаются, но магнитное поле тока этому препятствует. *Эдс самоиндукции* \bar{e}_L и напряжение u_L меняют свою полярность на противоположную, противодействуя уменьшению тока. По мере возрастания скорости убывания тока $+i(t)$ увеличиваются абсолютные величины \bar{e}_L и u_L , достигая своего максимума в момент $t=\pi$. В третьей четверти периода напряжение $u(t)$ и ток $i(t)$ вновь меняют по закону электромагнитной индукции свое направление на противоположное и начинают увеличиваться по абсолютной величине. Соответственно *эдс самоиндукции* \bar{e}_L и напряжение u_L , сохраняя свою полярность, противодействуют возрастанию тока, но с уменьшением скорости его изменения уменьшают свою величину до нуля к моменту времени $t=3\pi/2$. При убывании напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ в четвертой четверти *эдс самоиндукции* \bar{e}_L и напряжение u_L с ростом скорости изменения тока увеличиваются по абсолютной величине, достигая максимума в точке $t=2\pi$. Далее процесс повторяется.

Таким образом, индуктивность в цепи переменного тока выступает как *генератор дополнительной эдс*, которая в одни фазы колебаний тока и напряжения направлена против, а в другие - согласно напряжению внешнего генератора, соответственно противодействуя увеличению или, наоборот, уменьшению тока в цепи. Заметим, что в *цепях постоянного тока* индуктивность оказывает влияние на процесс только в момент включения и выключения *постоянной эдс источника* этой цепи (при включении ток в цепи из-за *эдс самоиндукции* установится не мгновенно, а лишь через некоторый промежуток времени, зависящий от соотношений активного и реактивного сопротивлений цепи – так называемой, *постоянной цепи*, а при размыкании цепи также исчезнет не мгновенно, и, более того, из-за *эдс самоиндукции* может во много раз превысить значения, определяемые *эдс источника* этой цепи и ее активным сопротивлением).

Вернемся к рассмотрению *полной электрической цепи переменного тока* (рис.2.5.2). В этой цепи на активное сопротивление R , через которое проходит ток $i(t)$, действуют три переменных электрических поля: поле внешнего генератора $u(t)$, поле емкости $u_C(t)$ и поле индуктивности $u_L(t)$. В соответствии с законом Ома можно записать:

$$u(t)=u_R(t)+u_C(t)+u_L(t)=i(t)\cdot Z_H, \quad (2.5.10)$$

где $Z_H=f(R,X)$ – *полное (или кажущееся) сопротивление* цепи нагрузки переменного тока. Согласно выражению (2.5.10), вместо рассмотрения действия трех полей на одно активное сопротивление, можно перейти к рассмотрению действия одного внешнего поля $u(t)$ на последовательно включенные сопротивления нагрузки: *активное* R и *реактивные* X – *емкостное* $X_C=1/\omega C$ и *индуктивное* $X_L=\omega L$.

Напряжения на всех трех сопротивлениях с учетом формул (2.5.5), (2.5.9) и начальной фазы $\alpha=0$ тока $i(t)$, который одинаков во всех точках полной замкнутой цепи, можно представить в виде:

$$\begin{aligned} u_R &= i \cdot R = R \cdot I_m \cdot \sin(\omega t), \\ u_L &= i \cdot X_L = X_L \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2), \\ u_C &= i \cdot X_C = X_C \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - \pi/2). \end{aligned} \quad (2.5.11)$$

В цепи переменного тока гармонические ток и напряжение совпадают по фазе на активном сопротивлении, напряжение на индуктивном сопротивлении опережает ток на угол $\pi/2$, а напряжение на емкостном сопротивлении отстает от тока на угол $\pi/2$.

Для нахождения *мгновенных значений суммарного напряжения* $u(t)$ в полной цепи переменного тока в соответствии с формулами (2.5.10) и (2.5.11) можно воспользоваться

соответствующими табличными значениями тригонометрических функций или их временными графиками (рис.2.5.7). На рисунке амплитуда индуктивного напряжения превышает амплитуду емкостного напряжения, т.е. общая нагрузка носит индуктивный характер. При этом амплитуда суммарного напряжения $u(t)$ оказывается больше амплитуды активного напряжения, и $u(t)$ опережает ток $i(t)$ в цепи, совпадающий по фазе с активным напряжением u_R . В общем случае, при сложении двух гармонических величин с одной и той же частотой, но разными амплитудой и фазой, образуется гармоническая величина той же частоты, амплитуда и фаза которой находятся, в зависимости от разности фаз, между разностью или суммой амплитуд и фаз слагаемых.

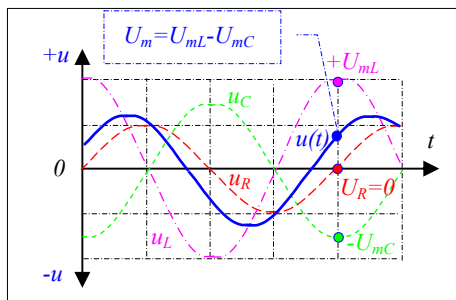


Рис.2.5.7 Суммирование мгновенных значений напряжений $u(t)=u_R+u_L+u_C$, сдвинутых по фазе относительно друг друга

В случае векторного представления рассматриваемых величин их суммирование производится геометрически в рамках векторной диаграммы (рис.2.5.8), которая строится не для мгновенных, а фиксированных или интегральных (максимальных, средних или действующих) значений гармонического тока и напряжения.

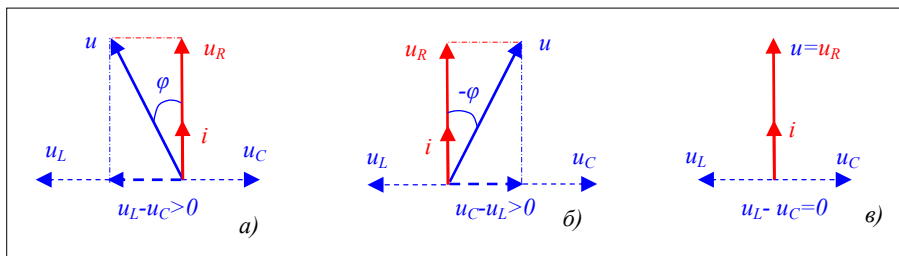


Рис.2.5.8 Векторные диаграммы тока и напряжений в полной электрической цепи переменного тока: а) преобладание индуктивной нагрузки, б) преобладание емкостной нагрузки, в) скомпенсированная реактивная нагрузка

В общем случае в полной цепи переменного тока напряжение внешнего генератора, равное сумме напряжений на активном и реактивном сопротивлениях цепи, смещено относительно тока на угол φ , величина которого лежит в диапазоне $(-\pi/2, \dots, +\pi/2)$ и определяется соотношением между этими сопротивлениями. Значения реактивного X и полного Z сопротивления определяются выражениями:

$$X = X_L - X_C = \omega L - 1/\omega C \quad (2.5.12)$$

$$Z_H = (R^2 + X^2)^{1/2} = (R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2)^{1/2}. \quad (2.5.13)$$

Если $(\omega L - 1/\omega C) = 0$, т.е. $\omega L = 1/\omega C$ или $\omega^2 LC = 1$, то $Z = R$, т.е. индуктивное и емкостное сопротивления компенсируют действие друг друга, и полное сопротивление равно активному сопротивлению. Из рис. 2.5.8 и формул (2.5.9), (2.5.13) следует, что угол сдвига фаз φ между током и напряжением в полной цепи зависит от соотношения активного и полного или реактивного сопротивления:

$$\cos \varphi = R/Z; \quad \operatorname{tg} \varphi = X/R. \quad (2.5.14)$$

Величину $\cos \varphi$ называют **коэффициентом мощности (КМ)**, а $\operatorname{tg} \varphi$ – **коэффициентом реактивной мощности (КРМ)**. Значение КМ лежит в диапазоне от нуля до единицы, а КРМ – от нуля до бесконечности. Если $Z=R$, то $\cos \varphi=1$ и $\varphi=0$ (соответственно $\operatorname{tg} \varphi=0$). При этом $\omega=\omega_0=1/(LC)^{1/2}$, где ω_0 – резонансная частота цепи. При $Z=R$, согласно закону Ома $I=U/Z$ и неравенству $R \leq Z$, сила тока I максимальна. Наоборот, с ростом X увеличивается Z и соответственно при одном и том же напряжении U внешнего генератора в цепи уменьшается сила тока. Если $R \ll Z$, то $\cos \varphi$ близок к нулю, а сам угол – к $\pi/2$ (соответственно $\operatorname{tg} \varphi$ стремится к бесконечности).

В цепи постоянного тока его энергия и мощность определяются по формулам (2.2.2) и (2.2.5), в частности, $W=I^2 \cdot R \cdot t=I \cdot U \cdot t$ и $P=I^2 \cdot R=I \cdot U$, где U – постоянное напряжение на входе цепи, подключенной к выходу внешнего генератора. В цепи переменного тока без реактивных элементов переменное напряжение $u(t)$ внешнего генератора совпадает по фазе с переменным током $i(t)$, и мгновенная активная мощность тока в любой момент времени t может быть определена по формуле

$$P(t)=u(t) \cdot i(t); \varphi=0. \quad (2.5.15)$$

С учетом формул (2.5.1), (2.5.2), формулы преобразования степени синуса $\sin^2 x=(1-\cos 2x)/2$ и приняв, что $\alpha=\beta=0$, получим:

$$P(t)=U_m \cdot I_m \cdot (1-\cos 2\omega t)/2=P_m \cdot (1-\cos 2\omega t)/2, \quad (2.5.16)$$

где $P_m=I_m \cdot U_m$ – максимальное значение активной мощности. График активной мощности синусоидального тока приведен на рис.2.5.9. Из графика видно, что, в отличие от тока и напряжения, активная мощность не является гармонической функцией (такую функцию называют пульсирующей). Среднее значение активной мощности за полупериод и период колебания тока отлично от нуля и положительно. Оно может быть вычислено как интеграл от мощности за период колебания T (геометрически интеграл определяет площадь под кривой мощности, т.е. энергию за период T), деленный на величину этого периода: $\int_0^T P(t) dt / T$.

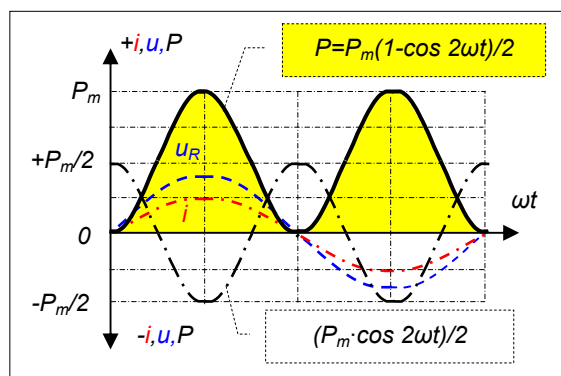


Рис.2.5.9 Графики синусоидальных напряжения $u(t)$, тока $i(t)$ и активной мощности $P(t)$ при $\varphi=0$

В общем случае, т.е. при наличии в цепи реактивных элементов, между током $i(t)$ и напряжением $u(t)$ появляется фазовый сдвиг φ , и формула (2.5.15) определяет уже не активную, а мгновенную **полную** (кажущуюся) мощность S переменного тока:

$$S(t)=u(t) \cdot i(t). \quad (2.5.17)$$

При этом активная мощность тока, определяемая при нулевом сдвиге фаз между током и напряжением (см. векторную диаграмму на рис.2.5.8), зависит от проекции вектора напряжения на вектор тока, т.е. от его тангенциальной составляющей:

$$P(t)=i(t) \cdot u(t) \cdot \cos \varphi = S(t) \cdot \cos \varphi. \quad (2.5.18)$$

Если $\varphi=0$, то активная мощность и, соответственно, работа, выполняемая током, максимальны: $P(t)=u(t) \cdot i(t)=P_{\max}(t)$ и $A(t)=P_{\max}(t) \cdot \Delta t=A_{\max}(t)$. Если же напряжение в цепи сдвинуто относительно тока на прямой угол $\varphi=\pi/2$ (идеализированный случай реактивной

нагрузки при нулевой активной нагрузке в цепи), то коэффициент мощности $\cos \pi/2$, активная мощность $P(t)$ и работа $A(t)$, как следует из формулы (2.5.18), равны нулю.

В случаях, когда $\varphi=+\pi/2$ (индуктивная нагрузка при $R=0$) или $\varphi=-\pi/2$ (емкостная нагрузка при $R=0$) мгновенная полная мощность для синусоидального тока в соответствии с формулами (2.5.17), (2.5.11) и с учетом формулы преобразования произведения синусов ($\sin x \cdot \sin y = 1/2[\cos(x-y) - \cos(x+y)]$) и приведения косинуса к синусу $\cos(x+\pi/2) = -\sin x$, $\cos(x-\pi/2) = \sin x$, равна:

$$S(t)_L = U_m \cdot I_m \cdot [\cos(\pi/2) - \cos(2\omega t + \pi/2)]/2 = (S_m \cdot \sin 2\omega t)/2; \quad \varphi = +\pi/2; \quad (2.5.19)$$

$$S(t)_C = U_m \cdot I_m \cdot [\cos(-\pi/2) - \cos(2\omega t - \pi/2)]/2 = -(S_m \cdot \sin 2\omega t)/2; \quad \varphi = -\pi/2. \quad (2.5.20)$$

где $S_m = I_m \cdot U_m$ – максимальное значение полной мощности [8]. Соответствующие графики мгновенных полных (реактивных) мощностей приведены на рис. 2.5.10.

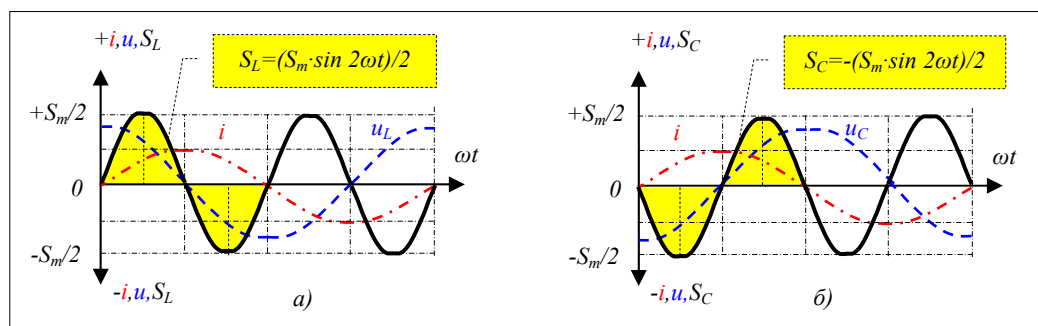


Рис.2.5.10 Графики синусоидальных напряжения $u(t)$, тока $i(t)$ и полных мощностей:
а) индуктивной, б) емкостной

Из формул (2.5.19), (2.5.20) и графиков следует, что мгновенная полная мощность, как в случае индуктивности, так и емкости, *изменяется по синусоидальному закону, но с двойной частотой*. В течение одного полупериода тока мгновенная мощность дважды достигает максимумов: *положительного* $+S_m/2 = i^2 \cdot X$ и *отрицательного* $-S_m/2 = (-i)^2 \cdot X = i^2 \cdot X$, где $X = X_L$ или $X = X_C$ (при этом в течение одной половины этого полупериода напряжение на реактивном элементе *положительно*, а в течение другой – *отрицательно*). Среднее значение полной мощности, в отличие от активной мощности, имеет ненулевое значение только в пределах каждой четверти периода колебания тока, но за полупериод или период этого колебания равно нулю (площадь положительной полуволны мощности, возникающей при совпадении полярности напряжения и тока, равна площади ее отрицательной полуволны, образуемой при различии этих полярностей).

Процесс передачи энергии и мощности в идеализированной цепи (рис.2.5.6,а) с индуктивной нагрузкой и нулевой активной нагрузкой (нулевым внутренним сопротивлением генератора), имеет следующее физическое содержание. В течение первой четверти периода тока и *положительного полупериода синусоиды мощности*, когда ток в цепи положителен и нарастает, а напряжение на индуктивности положительно, но убывает, энергия с током от внешнего генератора, преодолевая встречное действие эдс самоиндукции (сопротивление), поступает в индуктивность, накапливаясь в ней в виде энергии магнитного поля. В течение второй четверти периода тока и *отрицательного полупериода синусоиды мощности*, когда ток еще положителен, но убывает, а напряжение на индуктивности становится отрицательным и увеличивается по абсолютной величине, магнитное поле индуктивности возвращает с током энергию обратно генератору. В итоге,

за один положительный полупериод тока и полный период синусоиды мощности сумма положительной и отрицательной мощности (энергии) в цепи равна нулю. В течение следующего, отрицательного полупериода тока и полного периода синусоиды мощности процессы повторяются.

В случае аналогичной идеализированной цепи с емкостью процесс передачи энергии и мощности происходит с точностью наоборот (рис.2.5.6,б). В течение первой четверти периода тока и отрицательного полупериода синусоиды мощности, когда ток в цепи положителен и нарастает, а напряжение на емкости отрицательно (емкость заряжена «в минус»), энергия разряда емкость отдается с током в генератор. В течение второй четверти периода тока и положительного полупериода синусоиды мощности, когда ток в цепи положителен, но убывает, происходит заряд емкости (емкость заряжается «в плюс»): энергия с током от генератора преобразуется в энергию электрического поля емкости. В итоге, за один положительный полупериод тока и полный период синусоиды мощности сумма положительной и отрицательной мощности (энергии) в цепи равна нулю. В течение следующего, отрицательного полупериода тока и полного периода синусоиды мощности процессы повторяются.

Таким образом, в рассмотренных идеализированных электрических цепях переменного тока с индуктивностью или емкостью имеет место колебательный процесс передачи энергии и мощности между генератором и нагрузкой с отсутствием каких-либо необратимых потерь энергии и мощности. В случае не идеализированных, а реальных электрических цепей, содержащих помимо реактивных элементов активную нагрузку и генератор с ненулевым внутренним сопротивлением, под энергией генератора, передаваемой в реактивные элементы и возвращаемой обратно в генератор, следует понимать не всю энергию генератора, а только ту ее часть - приращение энергии, которая не теряется в процессе указанного колебательного процесса на полном активном сопротивлении замкнутой электрической цепи.

Полную мощность электрического тока, передаваемую в идеализированной цепи с реактивными элементами, называют **реактивной мощностью Q** . Из векторных диаграмм для полной цепи (рис.2.5.8) следует, что реактивная мощность зависит от проекции вектора напряжения u не на вектор тока, как для активной мощности, а на вектор напряжения реактивного элемента, т.е. от *нормальной составляющей* вектора u . Следовательно, *мгновенная реактивная мощность* может быть определена из выражения:

$$Q(t)=u(t) \cdot i(t) \cdot \sin \varphi = S(t) \cdot \sin \varphi. \quad (2.5.21)$$

Если $\varphi=0$, т.е. в цепи отсутствуют реактивные элементы или их индуктивные и емкостные сопротивления скомпенсированы (см. рис.2.5.8,в), то $\sin \varphi=0$ и $Q=0$. Наоборот, если $\varphi=\pm\pi/2$, то $Q=S$. В общем случае $\varphi\neq 0\neq\pi/2$. При этом *полная мощность S может рассматриваться как векторная сумма активной P и реактивной Q мощностей*. Соответственно, абсолютные значения этих мощностей могут быть определены из выражений:

$$S=(P^2+Q^2)^{1/2}; \quad (2.5.22)$$

$$P=(S^2-Q^2)^{1/2}; \quad (2.5.23)$$

$$Q=(S^2-P^2)^{1/2}, \quad (2.5.24)$$

где S, P, Q – действующие значения мощностей (аналогично вычисляются и их максимальные, или амплитудные значения S_m, P_m, Q_m).

Реактивная мощность и энергия не выполняют в электрической цепи полезной работы, а носят вспомогательный характер, сопровождая колебательные процессы использования активной мощности и энергии. При этом, в одних случаях, например, при дистанционной передаче активной энергии, реактивная энергия выступает как неизбежная помеха, которую требуется исключить, или скомпенсировать, а в других случаях, например,

при трансформаторном преобразовании уровней тока или напряжения, наоборот, выступает как необходимое условие таких преобразований.

Мгновенное значение $i(t)$ переменного тока все время изменяется, колеблясь между нулем, положительными и отрицательными амплитудными значениями. В качестве значения, характеризующего величину переменного тока или напряжения, можно было бы принять их *амплитуду*, но ее практически трудно измерить с помощью традиционных аналоговых приборов (например, амперметра или вольтметра). Поэтому для характеристики силы переменного тока или напряжения исторически было принято решение использовать одно из свойств тока, независимое от его направления, - *свойство нагревать проводник* (заметим, что нагревание проводника переменным током происходит при движении зарядов в обоих направлениях – прямом и обратном). За основу определения величины переменного тока принято *сопоставление его теплового действия с тепловым действием постоянного тока соответствующей силы*. Полученное таким путем значение силы переменного тока назвали *действующим* или *эффективным* (обозначают как I_d , $I_{ЭФФ}$ или просто I).

Действующая или эффективная сила переменного тока – это сила постоянного тока, выделяющего в проводнике то же количество тепла, что и данный переменный ток

Из формулы закона Джоуля-Ленца (2.2.3) следует, что энергия постоянного тока равна $Q=I^2 \cdot R \cdot t$ [Джс]. Для переменного синусоидального тока с учетом значения его активной мощности P по формуле (2.5.16) и ее амплитуды $P_m=I_m^2 \cdot R$, результата интегрирования этой мощности за время $t=T$ (2.5.16) и равенства $I^2 \cdot R \cdot T = \int_0^T P(t) dt = I_m^2 \cdot R \cdot T/2$, получим:

$$I=I_m / \sqrt{2} \approx 0,707 \cdot I_m. \quad (2.5.25)$$

Таким образом, измерив прибором эффективную силу синусоидального тока, можно найти его амплитуду: $I_m=1,414 \cdot I$. Аналогичным образом определяется *действующее или эффективное значение переменного напряжения*:

$$U=U_m / \sqrt{2} \approx 0,707 \cdot U_m. \quad (2.5.26)$$

Действующие значения тока и напряжения используют для измерений и вычислений действующих значений мощности и энергии переменного тока.

Выше рассматривалась одноконтурная замкнутая электрическая цепь, состоящая из генератора эдс и его нагрузки. В общем случае, такие одноконтурные цепи с различными генераторами эдс могут соединяться друг с другом проводниками, образуя *перетоки электроэнергии* из одной цепи в другую (см. параграф 2.6). Условно переток электроэнергии из одной схемы в другую считают *положительным*, а в обратном направлении – *отрицательным*. Соответственно говорят о *положительном и отрицательном направлении передачи активной и реактивной энергии*. В таких разветвленных электрических цепях фазовый сдвиг между током и напряжением (в пределах одного периода тока) в той или иной точке цепи может находиться, в отличие от одноконтурной цепи (см. рис.2.5.8), в диапазоне $\varphi=\{0, \dots, 2\pi\}$. Векторная диаграмма мощности и энергии для электрических цепей с перетоками приведена на рис.2.5.11.

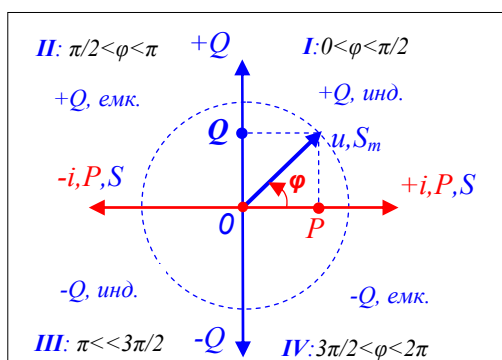


Рис.2.5.11 Векторная диаграмма мощности в электрических цепях переменного тока с перетоками энергии и мощности (I-IV – квадранты, соответствующие фазовому сдвигу между током и напряжением в точке перетока, зависящему от направления перетока и характера

Диаграмма содержит четыре квадранта, соответствующие диапазону сдвига фаз между током и напряжением в точке перетока. В первом квадранте активная, реактивная (индуктивная) и полная мощность положительны. Во втором квадранте положительна реактивная (емкостная) мощность, а активная и полная отрицательны. В третьем квадранте отрицательны все виды мощности (реактивная носит индуктивный характер). В четвертом квадранте реактивная (емкостная) отрицательна, а другие виды мощности положительны.

2.6 Трехфазный ток. Генерация, передача, распределение и потребление электрической энергии

Трехфазная система переменного электрического тока (сокращенно – *трехфазный ток*) – это наиболее распространенная в современном мире централизованная система *генерации* (производства), *передачи* (транспорта), *распределения* и *сбыта* электрической энергии ее потребителям [2.5, 2.9]. От *генераторов электростанций* через *электрические сети* различного уровня напряжения, содержащие *линии электропередачи* и *трансформаторные подстанции*, энергия трехфазного переменного тока поступает к трехфазным и однофазным *приемникам электрической энергии* (*электроприемникам*) потребителей, где преобразуется в конечные виды и формы непосредственно используемых энергий - световую, тепловую, механическую, звуковую и другие.

Основой этой системы являются *синхронные электрические машины**, работающие в генераторном режиме – ***синхронные трехфазные генераторы переменного тока***. Они, как и однофазные генераторы, действуют на основе *принципа электромагнитной индукции* (поэтому их иногда называют *индукционными*, или *электромагнитными*) и содержат два главных конструктивных элемента: *источник постоянного магнитного поля (индуктор)* и *источник эдс индукции (иэдс)* (рис.2.6.1).

* *Синхронная машина* – электрическая машина переменного тока, в которой скорость вращения ротора n [об/мин] связана с частотой f сети формулой $n=60 \cdot f/p$, где p – число пар магнитных полюсов машины (например, для двухполюсной машины $n=3000$ об/мин при частоте сети $f=50$ Гц). Среди синхронных машин различают *синхронные генераторы* (генераторы активной мощности), *синхронные электродвигатели* (двигатели с постоянной частотой вращения) и *синхронные компенсаторы* (генераторы реактивной мощности). Синхронные генераторы являются источником переменного тока постоянной частоты. Для вращения их роторов используют паровые, гидравлические и газовые турбины, а также различные другие механические приводы: двигатели внутреннего сгорания, электродвигатели, ветродвигатели и т.п. Генератор совместно со своим механическим приводом (турбиной) образует *турбогенератор*. В синхронных генераторах увеличение числа пар полюсов позволяет пропорционально снижать скорость вращения их роторов и использовать тем самым для привода более тихоходные турбины (например, гидравлические). Увеличение числа пар полюсов применяют также в особом классе синхронных генераторов для выработки *тока повышенной частоты*.

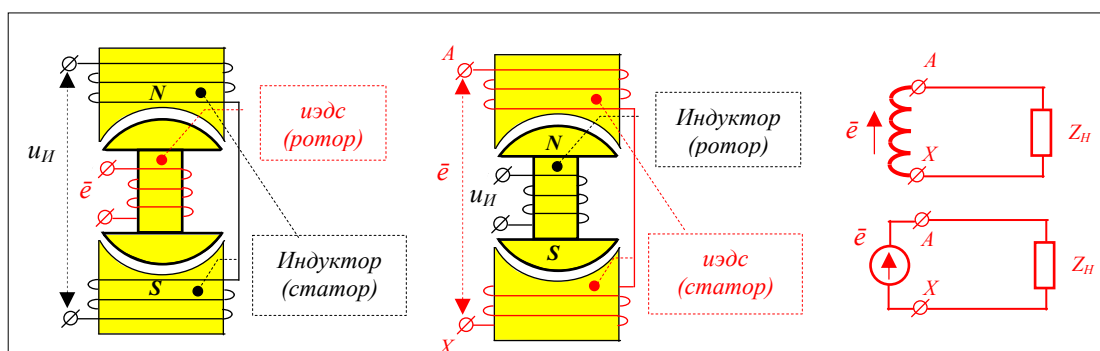


Рис.2.6.1 Модель однофазного двухполюсного индукционного генератора переменного тока: а) конструкция с неподвижным индуктором (статором) и подвижным иэдс (ротором), б) конструкция с подвижным индуктором (ротором) и неподвижным иэдс (статором), в) эквивалентные схемы иэдс с подключенной нагрузкой

Индуктор мощных генераторов выполняется в виде *электромагнита* с ферромагнитным сердечником, в обмотке которого (*обмотке возбуждения*) под действием внешнего постоянного напряжения U_H протекает постоянный ток, создающий соответствующее постоянное магнитное поле с заданной магнитной индукцией. Напряжение для питания индуктора может подаваться как от независимого генератора постоянного тока (*в генераторах с независимым возбуждением*), так и от самого генератора переменного тока после выпрямления его выходного тока, поступающего в цепь возбуждения генератора (*в генераторах с самовозбуждением*). В последнем случае, при нахождении генератора в *состоянии останова* и отсутствия в силу этого внешнего напряжения на обмотке возбуждения, индуктор сохраняет, тем не менее, слабую остаточную магнитную индукцию, которая позволяет в процессе *пуска генератора* получить в иэдс ненулевую эдс индукции, лавинообразно нарастающую в ходе пуска до установленного значения (величина эдс регулируется током обмотки возбуждения).

Иэдс генератора представляет собой проводящий контур (одну или несколько *рабочих обмоток переменного тока*, или *обмоток эдс*), в котором под воздействием магнитного потока, создаваемого индуктором, и перемещения (вращения) иэдс и индуктора относительно друг друга генерируется соответствующая величина переменной эдс. Изменение магнитного потока, пронизывающего иэдс генератора, может создаваться двумя различными путями: а) за счет вращения иэдс в постоянном магнитном поле индуктора (рис.2.6.1, а); б) за счет вращения индуктора при стационарной установке иэдс (рис.2.6.1, б). Вращающуюся часть генератора называют *ротором* (в генераторах постоянного тока вращающуюся часть, в обмотках которой индуцируется эдс, называют *якорем*), а неподвижную – *статором*. В первом случае индуктор является статором, а иэдс – ротором (такая конструкция называется *обращенной* и используется в генераторах небольшой мощности – до 20 кВт), а во втором случае, наоборот, индуктор является ротором, а иэдс – статором.

Поскольку съем или подача напряжения на ротор осуществляется с помощью системы *контактных колец* и скользящих контактных пластин (*щеток*), то чем больше ток ротора, тем сложнее (из-за трения, процессов искрения, обгорания и износа колец и щеток) осуществить съем или подачу тока на него. Величина тока для питания индуктора всегда значительно меньше величины тока в рабочих обмотках генератора и поэтому в мощных генераторах съем генерируемой эдс (напряжения) осуществляют с неподвижного иэдс-статора, т.е. используют второй, наиболее типичный вид конструкции генератора. Эквивалентную схему (*схему замещения*) иэдс изображают в виде индуктивности, имеющей контакты или зажимы *начала* (А) и *конца* (Х), к которым через проводные линии подключается внешняя нагрузка генератора Z_H (иногда индуктивность, как источник эдс индукции, заменяют обобщенным изображением в виде кружка со стрелкой или знаком переменного тока «~» внутри) (рис. 2.6.1,в).

Трехфазная электрическая цепь переменного тока является частным случаем многофазной системы и представляет собой совокупность трех электрических цепей, называемых фазами, в которых действуют три переменных напряжения одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга. Исторически всемирное применение, начиная с 1891года, получили симметричные трехфазные системы, в которых синусоидальные напряжения в фазах трехфазного генератора равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на угол 120^0 или $2\pi/3$ радиан. Трехфазную систему называют электрически несвязанной, если отдельные фазы представляют собой независимые электрические цепи, и электрически связанными, если эти фазы соединены между собой. Практическое использование получили электрически связанные трехфазные системы, образованные, в простейшем случае, фазными обмотками трехфазного генератора, электроприемниками (фазами нагрузки) и соединительными (линейными) проводами.

Трехфазная симметричная система переменного электрического тока – это совокупность электрически взаимосвязанных цепей, в которых действуют три синусоидальные эдс одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по фазе относительно друг друга на углы 120^0

Признаком симметрии трехфазной системы в сети одного и того же уровня напряжения является равенство амплитуд и углов сдвига фаз между каждой из трех пар эдс, действующих в этой сети (соответственно признак несимметрии - это неравенство амплитуд и/или углов сдвига фаз). В трехфазных электрически связанных сетях различного уровня напряжения амплитуды эдс также различны, хотя частота и углы сдвига фаз между ними одинаковы.

Принцип работы трехфазного генератора переменного тока представлен на рис. 2.6.2 (для наглядности в качестве индуктора-ротора изображен постоянный магнит). Иэдс-статор генератора содержит три отдельные проводные обмотки с одинаковым количеством витков каждая, пространственно смещенные по окружности статора на углы 120^0 относительно друг друга (рис.2.6.2,а), в которых наводятся соответствующие эдс индукции, одинаковые по частоте и величине, но сдвинутые в соседних фазах последовательно на один и тот же угол (рис.2.6.2,б,в):

$$\begin{aligned} \bar{e}_A &= E_m \cdot \sin \omega t, \\ \bar{e}_B &= E_m \cdot \sin (\omega t - 2\pi/3), \\ \bar{e}_C &= E_m \cdot \sin (\omega t - 4\pi/3). \end{aligned} \quad (2.6.1.)$$

Каждая эдс создает в нагрузке своей обмотки соответствующий переменный ток – ток фазы i_A, i_B, i_C (фазы именуют латинскими буквами A, B, C или a, b, c , а иногда нумеруют как $1, 2, 3$). Если принять на векторной диаграмме эдс (рис.2.6.2,в) вектор \bar{E}_A за исходный, то вектор \bar{E}_B отстает от \bar{E}_A , а вектор \bar{E}_C отстает от \bar{E}_B . Иными словами, максимальные значения эдс достигаются в фазах в порядке от фазы A к фазе B и далее к фазе C . Такой порядок чередования фаз называют *прямой последовательностью фаз* (при обратном вращении ротора генератора образуется *обратная последовательность фаз* - A, C, B). При рассмотрении трехфазных систем прямая последовательность фаз считается *нормальной*.

Для передачи электроэнергии трехфазного тока от генератора к нагрузке можно было бы использовать (как это показано на рис.2.6.2,а) шесть проводных линий: по две от каждой из трех электрически несвязанных между собой фаз. Но такое решение приводит к большому расходу провода и поэтому технически и экономически неэффективно. Экономия провода достигается путем электрического объединения начала и конца соответствующих обмоток фаз в *трехпроводную* или *четырепроводную* систему трехфазного переменного тока.

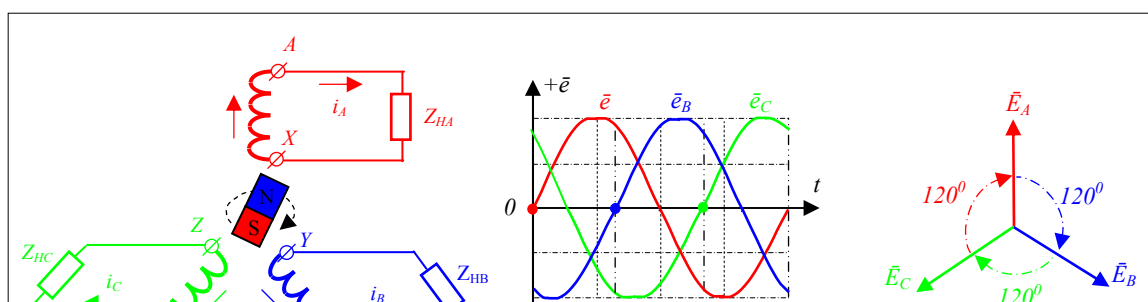


Рис.2.6.2 Трехфазный генератор переменного тока с электрически несвязанными рабочими обмотками эдс: а) модель с неподжным трехфазным иэдс и вращающимся индуктором (в виде постоянного магнита), б) временные диаграммы фазных эдс, в) векторная диаграмма действующих значений фазных эдс

Электрическое соединение трех фаз генератора возможно осуществить тремя способами: а) *звездой с нулем*, или *с нейтралью*, когда концы всех трех обмоток генератора объединяются в одну точку (нуль), и соединение генератора с электроприемниками осуществляется четырьмя проводами: *линейными A,B,C* и *нейтралью N*; б) *звездой без нуля*, или *без нейтрали*, когда соединение генератора с электроприемниками осуществляется тремя линейными проводами *A,B,C*; в) *треугольником*, когда конец каждой фазы соединяется с началом следующей, а соединение генератора с электроприемниками осуществляется тремя линейными проводами *A,B,C* (рис.2.6.3; положительное направление эдс в каждой обмотке условно принимают от конца к началу обмотки). В нижнем ряду рисунка приведены обозначения синхронных трехфазных генераторов с различным соединением обмоток, используемые в *трехлинейных* и *однолинейных* (упрощенных) электрических схемах (в самом общем случае, когда схема соединения обмоток не важна, в кружке генератора помещают обозначение *GS*).

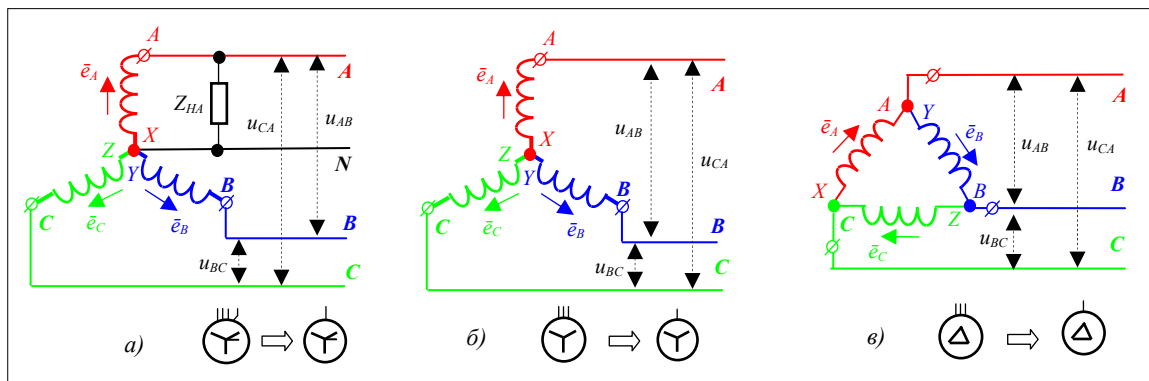


Рис.2.6.3 Виды электрического соединения обмоток эдс синхронного трехфазного генератора переменного тока и их условные обозначения в трехлинейных и однолинейных схемах : а) 4-проводное соединение звездой с нейтралью, б) 3-проводное соединение звездой без нейтрали, в) к и три однофазного приемника Z_{HA}). Заметим, что наличие нейтрали в схеме звезды уменьшает взаимное влияние режимов работы фаз и обеспечивает возможность подключения к трехфазной цепи *однофазной нагрузки*. В случае *трехфазного приемника* (например, трехфазных трансформатора или двигателя), нагрузка может быть организована, подобно фазам генератора, по тем же самым схемам звезды и треугольника, причем независимо от того, как это сделано в генераторе (рис. 2.6.4).

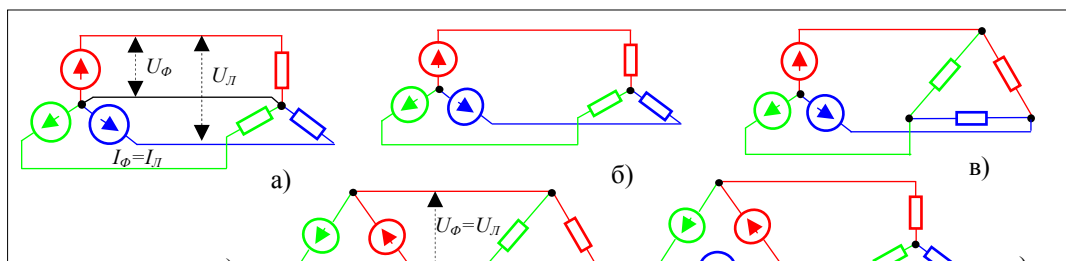


Рис.2.6.4 Трехфазные цепи с трехфазной нагрузкой: а) звезда с нейтралью по фазам генератора и нагрузки, б) звезда без нейтрали по фазам генератора и нагрузки, в) звезда без нейтрали по фазам генератора и треугольник по фазам нагрузки, г) треугольник по фазам генератора и нагрузки, д) треугольник по фазам генератора и звезда по фазам нагрузки

Напряжения между линейными проводами A, B, C и протекающие по этим проводам токи называют **линейными**, или **междуфазными**, а их действующие значения обозначают как U_L (в частности, U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}) и I_L (I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}). Напряжения на фазах и токи, протекающие по фазным обмоткам генератора, называют **фазными** и обозначают как U_ϕ (U_A, U_B, U_C) и I_ϕ (I_A, I_B, I_C). Фазные напряжения генератора есть напряжения между началами и концами фаз, они отличаются от эдс фаз на величину падения напряжения в обмотках генератора (при разомкнутых обмотках фазные напряжения равны эдс и имеют по отношению к ним противоположное направление). В 4-проводной и симметричной 3-проводной цепях фазные напряжения в электроприемнике меньше, чем в генераторе, на величину падения напряжения в линейных проводах (если этим падением напряжения можно пренебречь, то фазные напряжения в генераторе и приемнике считают одинаковыми).

В общем случае линейные токи и напряжения отличаются от соответствующих фазных. Так, в схемах звезды с симметричной нагрузкой (одинаковой по модулю и активно-реактивному характеру в каждой фазе), между амплитудами или действующими значениями фазных и линейных напряжений имеется соотношение (его легко можно получить из треугольника, образованного, например, векторами двух фазных U_A, U_B и одного линейного напряжения U_{AB} : $U_{AB} = 2 \cdot U_A \cdot \cos 30^\circ$, где $\cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$):

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi = 1,73 \cdot U_\phi. \quad (2.6.2)$$

Например, если $U_\phi = 220V$, то $U_L = 380V$. При соединении звездой в точках перехода от генератора в линию и из линии в приемник нет разветвлений, и поэтому фазные и линейные токи одинаковы в каждой фазе: $I_L = I_\phi$. В соответствии с положительным направлением эдс в обмотках генератора положительное направление токов в линейных проводах принимают от генератора к приемнику, а в нейтрали – от приемника к генератору.

В случае симметричной нагрузки всех трех фаз в схеме звезды с нейтралью токи в каждой из фаз одинаковы, а результирующий ток в нейтрали равен $I_N = 0$. В таком режиме работы схема звезды с нейтралью эквивалентна схеме звезды без нейтрали, т.е. нейтраль может быть исключена (при этом нагрузка включается между соответствующими парами линейных проводов). При несимметричной нагрузке в нейтрали течет ненулевой ток, величина которого, тем не менее, меньше величины тока в линиях, и поэтому для передачи тока по нейтрали может использоваться провод меньшего сечения, чем в линейных проводах.

В схеме правильного треугольника фаз генератора образуется замкнутый контур, в котором сумма действующих значений всех эдс равна нулю: $\vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C = 0$. При этом в режиме холостого хода генератора, т.е. при отключенной нагрузке, ток в обмотках генератора отсутствует. В случае несимметрии системы эдс их сумма не равна нулю, и поэтому уже при холостом ходе в обмотках генератора появится ток, который даже при малой несимметрии может быть значительным из-за низкого сопротивления обмоток

генератора. В случае *неправильного* включения двух обмоток генератора, когда их соединяют началами или концами, сумма эдс в контуре равна двойному значению эдс фазы, а величина тока в замкнутом контуре может стать критической.

В схеме треугольника конец одной фазы соединен с началом другой и поэтому *линейное напряжение генератора равно фазному* $U_{\Gamma}=U_{\Phi}$, т.е. переключение обмоток эдс генератора со звезды на треугольник снижает линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз. В *схеме треугольника с симметричной нагрузкой* (рис.2.6.4,г,д) токи во всех фазах одинаковы, но отличаются от линейных, которые можно, подобно линейному напряжению в случае схемы звезды, определить из соответствующей векторной диаграммы токов как:

$$I_{\Gamma}=\sqrt{3}\cdot I_{\Phi}=1,73\cdot I_{\Phi} . \quad (2.6.3)$$

Заметим, что формулы (2.6.2) и (2.6.3) справедливы *только для симметричных систем напряжений и токов*. В целом, при эксплуатации систем трехфазного тока всегда стремятся сделать нагрузку различных фаз по возможности симметричной.

Мощность тока в каждой фазе трехфазной цепи определяется аналогично тому, как это делается для однофазных цепей переменного тока (см. предыдущий параграф). В случае *несимметричной нагрузки*, например, для фазы *A* имеем:

$$\begin{aligned} P_A &= U_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi_A, \\ Q_A &= U_A \cdot I_A \cdot \sin \varphi_A, \\ S_A &= U_A \cdot I_A. \end{aligned} \quad (2.6.4)$$

Активная мощность всей трехфазной цепи равна арифметической, а *реактивная мощность* алгебраической сумме соответствующих мощностей фаз: $P=P_A+P_B+P_C$ и $Q=\Sigma Q_{\Phi}$ (в этой сумме индуктивная нагрузка считается положительной, а емкостная - отрицательной).

При *симметричной нагрузке* вместо суммы мощностей фаз можно использовать общее выражение:

$$\begin{aligned} P &= 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi, \\ Q &= 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \sin \varphi, \\ S &= 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi}. \end{aligned} \quad (2.6.5)$$

Выразив фазные токи и напряжения через линейные, с учетом формул (2.6.2) и (2.6.3), получим:

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3} \cdot U_{\Gamma} \cdot I_{\Gamma} \cos \varphi, \\ Q &= \sqrt{3} \cdot U_{\Gamma} \cdot I_{\Gamma} \sin \varphi, \\ S &= \sqrt{3} \cdot U_{\Gamma} \cdot I_{\Gamma}. \end{aligned} \quad (2.6.6)$$

Выбор того или иного способа соединения элементов трехфазной цепи производится исходя из конкретных условий ее работы. Так, например, в случае соединения обмоток генератора звездой требуется меньшее число витков в обмотках, но большее сечение проводов, чем в случае их соединения треугольником, и поэтому соединение звездой более выгодно при высоких напряжениях генератора: обмотки могут быть рассчитаны на напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньшие, чем линейные. При больших токах нагрузки генератора, наоборот, предпочтительнее соединение его обмоток треугольником (за счет меньшего линейного напряжения при той же мощности генератора можно увеличить ток в его обмотке). В практике электротехнических расчетов в целях их упрощения часто прибегают к эквивалентной замене соединения звездой треугольником или наоборот (такие преобразования проводят по известным расчетным формулам) [2.9].

В реальных электрических сетях электроприемники потребителей, как правило, непосредственно не связаны с генератором, установленным на электростанциях. На пути электроэнергии от генераторов к приемникам устанавливаются *силовые трансформаторы напряжения*, с помощью которых в сетях неоднократно изменяется напряжение. Поэтому для электроприемников потребителей источником электроэнергии служат чаще всего

трехфазные трансформаторы, которые сами по отношению к генераторам являются приемниками энергии. В общем случае под *источником трехфазного электрического тока* подразумевают трехфазные генераторы и силовые трансформаторы напряжения.

Передача электроэнергии от электростанций, где установлены генераторы, потребителям производится через *электрические сети*, содержащие *линии электропередачи* и *трансформаторные подстанции*. Этот процесс связан с неизбежной (*технологической*) потерей части электроэнергии, величина которой существенно зависит от величины передаваемого тока. Наиболее значительные потери, до десяти и более процентов, имеют место в линиях электропередачи и связаны с неизбежным преобразованием в них электрической энергии в рассеиваемую в окружающем пространстве тепловую энергию (использование в будущем *сверхпроводящих* линий электропередачи позволит эти потери сократить). При одной и той же мощности передаваемого тока эти *потери квадратично зависят от величины тока*, и, следовательно, уменьшив, например, в десять раз величину тока и повысив во столько же раз величину напряжения в сети (чтобы сохранить величину передаваемой мощности тока), потери в линиях можно уменьшить в сто раз. *Эта зависимость является главной причиной создания в электроэнергетике электрических сетей различного уровня напряжения* для передачи электрической энергии.

Электрические сети в зависимости от уровня напряжения подразделяют на:

- а) сети низкого напряжения (НН) – 0,4-1 кВ;
- б) сети первого среднего напряжения (СН1) – выше 1 до 6-10 кВ;
- в) сети второго среднего напряжения (СН2) – выше 10 до 35 кВ;
- г) сети высокого напряжения (ВН) – выше 35 (в частности, 110 и 220) до 330 кВ;
- д) сети сверхвысокого напряжения (СВН) – выше 330 (в частности, 500, 750 и 1150)

кВ.

Выходное напряжение *синхронных генераторов*, установленных на электростанциях, как правило, выбирается в диапазоне 3-20 кВ, а их единичная активная мощность колеблется от нескольких мегаватт до тысячи и более мегаватт (типичные величины – 150,250,300,400,500,800 и 1000 МВт). Соответственно действующее значение тока в их обмотках эдс может достигать величины 3000-30000 А. Поэтому с выходов генераторов трехфазный ток подается на *повышающую трансформаторную подстанцию* (в зависимости от передаваемой мощности эта подстанция увеличивает напряжение до уровня ВН или СВН) и только после нее поступает в *электрические сети* для дальнейшей передачи.

В зависимости от назначения электрические сети подразделяют на:

а) *передающие* или *системообразующие сети* (сети ВН и СВН), которые передают электроэнергию на большие расстояния (сотни и тысячи км) и являются основой построения *объединенных энергосистем*;

б) *распределительные сети* (сети СН1 и СН2), которые распределяют электроэнергию на определенной территории среднего размера (в масштабах административного района или области) для ее использования различными группами потребителей (промышленными, сельскохозяйственными, бытовыми и т.п.);

в) *сети потребителей* (сети НН), к которым непосредственно подключены электроприемники потребителей.

В зависимости от величины потребителей (мелкие, средние, крупные и сверхкрупные) входной уровень напряжения в их сетях может изменяться от НН до СН и ВН (для крупных и сверхкрупных потребителей с мощностью нагрузки в сотни мегаватт). На границах сетей различного уровня напряжения находятся *повышающие* или *понижающие* трансформаторные подстанции, осуществляющие соответствующие преобразования уровня напряжения между сетями.

Наиболее массовыми сетями являются сети потребителей с уровнем действующего трехфазного напряжения 0,4 кВ (линейное напряжение 380 В и фазное 220 В). Такие сети

строятся по 4-проводной схеме (звезда с нейтралью) в целях обеспечения подключения к ним не только трехфазных, но и *однофазных* нагрузок. Кроме того, использование в таких сетях нейтрали позволяет свести до минимума взаимовлияние фаз из-за несимметрии их нагрузки. Дело в том, что *несимметрию в трехфазной сети создают именно однофазные приемники*, такие, например, как осветительные и другие бытовые приборы. Даже при разнесении осветительной и иной бытовой нагрузки поровну между фазами сети нагрузка останется несимметричной из-за неодновременности использования ее. Однако, при большом количестве однофазных приемников несимметрия нагрузки, вызванная неодновременностью включения/отключения приборов, становится сравнительно невелика в силу вероятностного характера этого процесса и его подчинения действию закона больших чисел.

В отличие от однофазных нагрузок, *трехфазные электроприемники* при правильном их подключении к трехфазной сети представляют из себя *симметричную нагрузку* (например, трехфазные электродвигатели имеют одинаковые фазы обмотки) и не нарушают симметрию в сети. Поэтому электрические сети напряжением выше 0,4кВ, предназначенные для электроснабжения промышленных предприятий или аналогичных потребителей с трехфазной нагрузкой выполняют *3-проводными*, независимо от схемы соединения групп приемников (звездой или треугольником).

Другие, более частные вопросы, связанные с генерацией, передачей, распределением и потреблением электрической энергии и мощности рассматриваются в соответствующих разделах книги в связи с решением соответствующих вопросов измерения и учета электрической энергии в энергосистемах и у потребителей.

Историческая справка **Развитие основных идей по электричеству и магнетизму** [2.10-2.14]

От древности до 1600г. н.э.

Явление *магнетизма* было известно в Китае еще в начале 2-го тыс. до н.э., но в Европе первые сведения об *электричестве* и *магнетизме* дал **Фалес Милетский** (625-547), один из семи греческих мудрецов: около 590г. он описал свойства натертого тканью *янтаря* (по гр. *электрон*) притягивать легкие предметы, а также притяжения некоторыми видами *железной руды* отдельных кусков железа. В 124 г.н.э. в Китае зарегистрировано первое упоминание о *магнитной стрелке*, ее намагничивании и использовании в мореплавании (в Европе эти знания появились в XII в.).

В 1269 г. фр. физик **Петр Перегрин** (Пьер де Марикур) провел первое опытное исследование магнитов и описал в трактате «*Послание о магните*» эксперименты, доказывающие, что *разные полюса магнита притягиваются, а одинаковые отталкиваются*; ввел обозначения для полюсов – *северный и южный*, показав, каким образом можно их определить; установил факт неразделимости полюсов: *при разделении продолговатого магнита образуются два магнита с противоположной полярностью в месте раздела*, а также описал явление намагничивания железа на расстоянии - явление *магнитной индукции* (от лат. *inductio* наведение). В 1599г. нидерл. ученый **Симон Стевин** (1548-1620) первым стал применять *изображение силы в виде вектора*, которое впоследствии перешло из механики в электростатику и электродинамику.

От 1600г. до 1800г.

В 1600г. вышел в свет трактат англ. физика, придворного врача королевы Елизаветы **Уильяма Гильберта** (1544-1603) «*О магните, магнитных телах и о большом магните-Земля*», в котором были описаны многочисленные исследования *электрических и магнитных свойств* тел, рассмотренные как *различные свойства*. Эта книга впервые *разделила электрические и магнитные явления*, сформировала *научный подход* к их исследованию и ввела термин «*электричество*». В 1629г. ит. математик **Никола Кабео** (1586-1650) опубликовал работу «*Магнитная философия*», в которой сделал попытку на основе исследований распространения «*магнитной силы*» в пространстве *определить ее величину*. В 1650г. нем. физик **Отто Герике** (1602-1686) построил *первую электростатическую машину* – шар из серы, вращавшийся на железном стержне и натиранный

руками. В 1668г. фр. естествоиспытатель **Винцент Лейто** (1595-1672) в трактате «Магнитология» высказал гипотезу, что каждый магнит является суммой элементарных небольших магнетиков с одинаково ориентированными полюсами. Англ. физик **Фрэнсис Гауксби** (1666-1713) в 1707-1709 гг. сконструировал электрические машины, позволяющие получать за счет трения большие электрические заряды. В 1729г. англ. физик **Стефен Грей** (1666-1736) открыл явление электропроводности, ввел разделение тел на проводники и непроводники, подтвердил существование электростатической индукции.

В 1733г. фр. физик **Шарль Дюфе** (1698-1739) открыл существование двух видов электричества – «стеклянного» и «смоляного», т.е. положительных и отрицательных зарядов. В 1745г. нидерл. физиком **Питером Мушенбруком** (1692-1761) и нем. физиком **Эвальдом Клейстом** (1700-1748) изобретен первый накопитель электрической энергии – конденсатор («лейденская банка»). В 1747г. амер. физик **Бенджамин Франклин** (1706-1790) высказал основные положения «теории единой электрической субстанции» и предложил конструкцию молниеотвода. В 1759г. рус. физик **Франц Эпинус** (1724-1802) открыл явление возникновения электрических зарядов на поверхности кристаллических диэлектриков при их нагревании или охлаждении – явление пирозлектричества (от гр. руг огонь). В 1778г. введены термины «плюс» и «минус» для обозначения положительного и отрицательного электрического заряда.

В 1785г. фр. физик **Шарль Кулон** (1736-1806) с помощью изобретенных им крутильных весов установил и сформулировал основной закон электростатики («закон Кулона»), а в 1788г. распространил его и на область магнетизма, введя понятие об «элементарных магнетиках» - точечных магнитных полюсах. В 1786г. ит. физиолог **Луиджи Гальвани** (1737-1798) открыл явление «животного электричества» - сокращение мышц лапок лягушки под действием электрических разрядов или присоединений двух различных металлов. В 1797г. ит. физик **Алессандро Вольт** (1745-1827) обнаружил существование контактной разности потенциалов, а в 1799г. изобрел первый источник постоянного электрического тока - гальванический элемент, или «элемент Вольты» (впоследствии были другими изобретателями созданы элементы Даниэля - 1836г., Бунзена – 1840г., Лекланше - 1868г., первый свинцовый аккумулятор -1859г.). В 1798г. швед. химик **Якоб Берцелиус** (1779-1818) создал теорию, согласно которой каждое вещество имеет электрические заряды – положительные или отрицательные.

От 1800г. до 1900г.

В 1800г. англ. ученые **Энтони Карлейль** (1768-1840) и **Уильям Никольсон** (1753-1815) открыли электролитическое разложение воды - явление электролиза. В 1807г. англ. физик **Томас Юнг** (1773-1829) ввел в научный оборот термин «энергия» (для обозначения кинетической энергии, которая называлась до этого «живой силой»), который впоследствии из механики перешел и в электричество. В 1811г. фр. физик **Симеон Пуассон** (1781-1840) распространил представление о поле сил тяготения на электростатику. В 1820г. дат. физик **Ханс Эрстед** (1777-1851) открыл явление магнитного действия электрического тока, а фр. физик **Андре Ампер** (1775-1836) сформулировал правило для определения направления отклонения стрелки током («правило Ампера»), установил закон взаимодействия электрических токов («закон Ампера») и открыл магнитный эффект соленоида. В 1820г. фр. физиками **Жан Био** (1774-1862) и **Феликсом Саваром** (1791-1841) установлен закон нахождения величины напряженности магнитного поля, создаваемого проводником с током - «закон Био и Савара», который позже был обобщен **Пьером Лапласом** (1749-1827) в законе «Био-Савара-Лапласа».

В 1821г. англ. физик **Майкл Фарадей** (1791-1867) начал публиковать свои исследования по электричеству, в которых указал на возможность движения проводника с током, находящимся вблизи магнита. В 1821г. нем. физик **Томас Зебек** (1770-1831) открыл явление возникновения эдс при нагревании спая двух различных металлов - явление термоэлектричества. В 1825г. англ. изобретатель **Уильям Стерджен** (1783-1850) построил первый электромагнит с железным сердечником. В 1826г. нем. физик **Георг Ом** (1789-1854) установил свой «закон Ома». В 1827г. А.Ампер обобщил теорию электродинамических явлений на основе «закона Ампера». В 1831г. М.Фарадей открыл явление электромагнитной индукции, в следующем году сконструировал первый генератор электрического тока, в 1833-1834гг. открыл законы электролиза и ввел термины «электрод», «анод», «катод», «ион», «электролит» и др. В 1834г. рус. физик **Эмилий Ленц** (1804-

1865) сформулировал правило, для определения направления индуцированного электрического тока («правило Ленца»), а в 1838г. экспериментально доказал обратимость генераторного и двигательного режимов электрических машин. В 1835 г. открыто явление самоиндукции.

В 1833-1839гг. нем. физик **Вильгельм Вебер** (1804-1891) сконструировал приборы для измерения магнитных величин, а в 1841г. установил абсолютную электромагнитную единицу электрического тока. В 1841г. англ. физик **Джеймс Джоуль** (1818-1889) опубликовал результаты исследований о тепловом действии электрического тока и вывел «закон Джоуля-Ленца» (независимо от Дж.Джоуля аналогичные результаты получил и Э.Ленц). В 1845г. М.Фарадей открыл диамагнетизм и явление вращения плоскости поляризации света в магнитном поле, а в 1852г. ввел понятие о магнитных и электрических силовых линиях. В 1845г. нем. физик **Густав Кирхгоф** (1824-1887) сформулировал правила о распределении электрического тока в разветвленных электрических цепях («правила Кирхгофа»). В 1848г. В.Вебер опубликовал свою теорию магнетизма и диамагнетизма. В 1863г. нем. физик Иоганн Гитторф (1824-1914) доказал существование ионов с различными зарядами, подтвердив тем самым предположения М.Фарадея, а в 1869г. обнаружил катодные лучи - их природа установлена в 1895г. фр. физиком **Жаном Перреном** (1870-1942), а в 1900г. ирл. физик **Джордж Стони** (1826-1911) назвал частицы катодных лучей «электронами».

В 1870г. англ. физик **Уильям Томсон** (1824-1907) сконструировал электрометр для измерения абсолютного значения электрического заряда. В 1871г. англ. физик **Джеймс Максвелл** (1831-1879) разработал электромагнитную теорию света. В 1874г. рус. электротехник **Ф.А.Пироцкий** (1845-1898) провел первые опыты передачи электрической энергии постоянного тока на расстояние до 1 км. В 1880г. открыто явление магнитного гистерезиса. В 1880г. фр. учеными братьями **Кюри** открыт пьезоэффект в кристаллах кварца. В 1881г. на первом международном конгрессе электриков в Париже приняты абсолютные электромагнитная (СГСМ) и электростатическая (СГСЭ) системы единиц. В 1883г. **Томас Эдисон** обнаружил явление термоэлектронной эмиссии. В 1886г. обнаружены вихревые токи – «токи Фуко». В 1886-89 гг. нем. физик **Генрих Герц** (1857-1894) экспериментально доказал существование электромагнитных волн, установив тождественность их основных свойств световым волнам, а в 1887г. впервые наблюдал явление фотоэффекта. В 1888г. рус. электротехник **М.О.Доливо-Добровольский** (1861-1919) изобрел систему трехфазного тока, в следующем году – трехфазный трансформатор и трехфазный асинхронный электродвигатель, а в 1891г. осуществил первую электропередачу трехфазного тока.

Литература к главе 2

- 2.1 Парселл Э.М. Электричество и магнетизм, т.2/Берклеевский курс физики/Пер. с англ. – М.: Наука, 1975.
- 2.2 Яворский В.М., Пинский А.А. Основы физики, т.1 – М.: Наука, 1969.
- 2.3 Физика/Большой энциклопедический словарь. – М.: Большая российская энциклопедия, 1999.
- 2.4 Гершензон Е.М., Малов Н.Н. Курс общей физики. Механика. – М.: Просвещение, 1979.
- 2.5 Элементарный учебник физики под ред. акад. Г.С. Ландсберга, т.1,2 – М.: Наука, 1971.
- 2.6 Кошкин Н.И., Васильчикова Е.Н. Элементарная физика: Справочник. – М.: Высш.шк., 2003.
- 2.7 Зельдович Я.Б., Яглом И.М. Высшая математика для начинающих физиков и техников. – М.: Наука, 1982.
- 2.8 Минин Г.П. Реактивная мощность. – М., Энергия, 1978.
- 2.9 Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники. – М., Высш.шк., 1968
- 2.10 Фолта Я., Новы Л. История естествознания в датах. – М.: Прогресс, 1987.
- 2.11 Бачинский А.И., Путилов В.В., Суворов Н.П. Справочник по физике/Хронологическая таблица выдающихся событий в развитии физико-математических наук и смежных областей техники. – М.: Госучпедгиз.- 1951.
- 2.12 Кудрявцев П.С. История физики, т.1, т.2 – М., Госучпедгиз, 1956.

2.13 Биографический словарь деятелей естествознания и техники, т.1,т.2. – М., Большая советская энциклопедия, 1958.

2.14 Большой российский энциклопедический словарь. – М., Большая российская энциклопедия, 2003.